

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ СОСКОВОГО КАНАЛА В ПРОЦЕССЕ ДОЕНИЯ

Д.А. Григорьев,

зав. каф. технологий и механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.О. Китиков,

директор ГНУ «Институт жилищно-коммунального хозяйства» НАН Беларуси, докт. техн. наук, профессор

А.М. Кравцов,

зав. каф. энергетики БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

К.В. Король,

соискатель каф. математики и технических дисциплин ГГАУ

В статье теоретически обоснованы условия извлечения молока через сосковый канал в процессе доения. Расчетные значения получены на основании математической модели динамики изменения площади отверстия соскового канала во время такта сосания в зависимости от уровня внутривыменного и вакуумметрического давления в подсосковой камере доильного стакана. Результаты расчета свидетельствуют о незначительном влиянии уровня вакуумметрического давления на поток молока, что ограничивает возможность использования данного параметра для интенсификации процесса. При этом повышение интенсивности и длительности воздействия вакуумметрического давления на сосок формирует негативное рефлекторное восприятие животными процесса доения, как стрессообразующего фактора технологии.

Ключевые слова: доильное оборудование, физиология доения коров, фазы пульсации, уравнение площади соскового канала, гидравлика истечения жидкостей, доильный стакан, вакуумметрическое давление.

The article gives a theoretical basis for the conditions of milk extraction through the teat canal in the process of milking. The calculated values have been obtained on the basis of the mathematical model of the change dynamics of the teat canal opening area during the suckling tact depending on the level of intra-oval and vacuum pressure in the suckling chamber of the milking cup. The results of calculation indicate insignificant influence of vacuum pressure level on milk flow, which limits the possibility of using this parameter for intensification of the process. At the same time, increasing the intensity and duration of vacuum pressure on the teat forms a negative reflex perception of the milking process by animals as a stress-forming factor of the technology.

Key words: milking equipment, cow milking physiology, phases of pulsation, teat canal area equation, fluid flow hydraulics, milking cup, vacuum pressure.

Введение

Основным вопросом современного молочного животноводства является разработка и применение адаптивных технологий и технических средств, обеспечивающих физиологически щадящую эксплуатацию животных в рамках интенсивных технологий производства молока [1]. Одним из наиболее чувствительных процессов для животных является машинное доение, интенсификация которого должна сопровождаться созданием и внедрением физиологичных технологических приемов и нового оборудования, обеспечивающих сохранение здоровья и долголетие коров при постепенном увеличении их продуктивности.

Проблема извлечения молока через сосковый канал рассматривается многими исследователями с точки зрения физиологии и гидравлики процесса [2].

Процессы прохождения молока через сосковый канал различного размера подробно описаны исследователями крупных производителей оборудования для доения коров. Они отмечают, что цикличность открытия и закрытия соскового сфинктера создает повторяющееся напряжение на кончике соска во время доения, при этом требуется корректная работа доильной установки для предотвращения повреждения сосков. Неправильная работа доильного стакана приводит к повреждению соскового сфинктера, что препятствует полному закрытию соскового канала после окончания доения и способствует проникновению бактерий внутрь соска. В результате возникают условия для развития мастита, которые отрицательно влияют на молокоотдачу коровы [3].

Теоретическое моделирование и экспериментальное обоснование лежит в основе создания новых

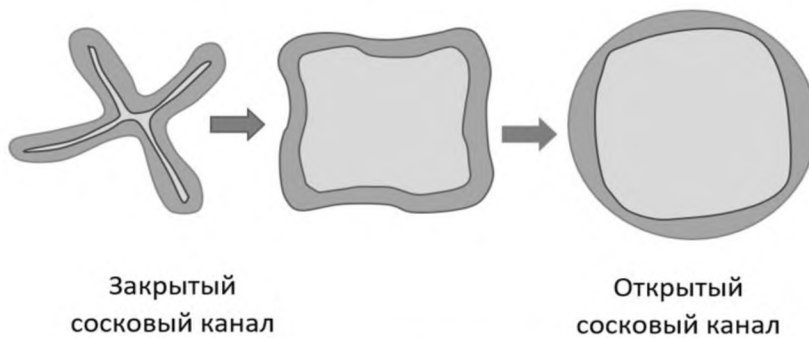
элементов оборудования, физиологических режимов и алгоритмов управления технологическими процессами, разработка которых ведется в Республике Беларусь (в рамках государственных научных инновационных программ) коллективами исследователей под руководством ведущих ученых в области физиологии и техники доения – М.В. Барановского, В.И. Передни и других.

Целью данной работы является обоснование теоретических зависимостей и определение количественных параметров процесса выхода молока из соскового канала, обеспечивающих возможность дальнейшего развития общей теории молоковыведения в процессе доения.

Основная часть

В нижней части соска коровы имеется отверстие – сосковый канал или сосковый проток. Сфинктер, окружающий сосковый канал, состоит из группы кольцевых гладких мышц, которые находятся в сжатом состоянии и удерживают сосковый канал закрытым в перерывах между доениями. Мягкий кератиновый слой герметично закрывает канал и предотвращает попадание бактерий в отверстие соска. Сохранение целостности соскового канала в процессе доения является важнейшей задачей. При этом для эффективного и полного выдаивания требуется, чтобы сосок был полностью открыт и обеспечивал беспрепятственное попадание молока в доильный аппарат. На рисунке 1 приведена схема раскрытия соскового канала в ходе такта сосания.

Сосковый канал при расслабленном сфинктере практически полностью раскрывается под действием вакуумметрического давления в ходе переходной фазы A такта сосания [4]. В процессе раскрытия



Закрытый
сосковый канал

Открытый
сосковый канал

Рисунок 1. Схема раскрытия соскового канала в ходе такта сосания

сечение канала меняет форму (от крестообразной до прямоугольной), и только в полностью открытом состоянии имеет форму, близкую к круглой. Уровень вакуума, необходимый для полного открытия соска, составляет приблизительно $-40,8$ кПа [3].

Расчетные параметры динамики площади соскового канала могут быть определены на основании уравнений, полученных в ходе разработки теории молоковыведения в процессе доения. Предположим,

что в соответствии с теоремой о среднем значении интеграла, существует некоторый расход потока Q_{in} , соответствующий среднему значению интеграла функции, описывающей графики изменения расхода потока молока, полученного в течение фаз A и B такта сосания [5]. Тогда Q_{in} может быть вычислен из уравнения, определяющего объем молока, полученного за один такт сосания:

$$V_{TC} = Q_{inA} \tau_A + Q_{inB} \tau_B = \int_0^{\tau_A} \left(\frac{Q_{max}}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{t_c \pi}{\tau_A} \right) \right) \right) dt_c + \int_{\tau_A}^{\tau_c} \left(Q_{ампл} \left(\cos \left(\frac{\pi}{\tau_B} (t_c - \tau_A) \right) + 1 \right) + Q_{min} \right) dt_c, \quad (1)$$

где Q_{inA} – средний расход потока молока через сфинктер в фазе A , m^3/c ;

Q_{inB} – средний расход потока молока через сфинктер в фазе B , m^3/c ;

τ_A – длительность фазы A такта сосания, c ;

τ_B – длительность фазы B такта сосания, c ;

τ_c – длительность такта сосания, c ;

t_c – момент времени такта сосания, c ;

Q_{max} , $Q_{ампл}$, Q_{min} – соответственно максимальное, амплитудное и минимальное значения расхода потока, m^3/c .

Учитывая, что количество молока, извлеченного в фазу A , намного меньше, чем количество молока, извлеченного в фазу B , а также принимая во внимание, что подынтегральные функции в уравнении являются тригонометрическими и описывают процесс в интервале от 0 до π , для удобства расчета можно принять условие, что $Q_{in} = Q_{inB}$.

Предположим, что в момент максимальной (пиковой) молокоотдачи, когда отверстие сфинктера полностью раскрыто, скорость истечения молока через венное кольцо крайне мала. Тогда в начале доения давления в сечении над поверхностью молока в сосковом канале соответственно равны значениям внутреннего давления вымени и разрежения под соском, за минусом падения давления в венном кольце и сфинктере, которое учитывается коэффициент μ_c . На основании ранее полученных зависимостей [6], уравнение для определения количества молока, извлеченного в фазу B , можно записать:

$$V_B = Q_{inB} \tau_B = \int_{\tau_A}^{\tau_c} \left(\mu_c S_c \sqrt{2g \left(H + \frac{P_{BH} - P_{PA3}}{\rho g} \right)} \right) dt_c, \quad (2)$$

где μ_c – коэффициент расхода для отверстия сфинктера;

S_c – площадь сфинктера, м²;

H – высота соска, м;

P_{BH} – внутривыменное давление, Па;

P_{PA3} – давление разряжения (вакуумметрическое) в подсосковой камере доильного стакана, Па;

ρ – плотность молока, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

В упрощенной форме можно записать:

$$V_B = Q_{inB} \tau_B = \int_{\tau_A}^{\tau_c} \left(\mu_c S_c \sqrt{2g H_D} \right) dt_c, \quad (3)$$

где $H_D = H + \frac{P_{BH} - P_{PA3}}{\rho g}$ – действующий суммарный напор. (4)

Точное определение значений P_{BH} в интервале интегрирования уравнения (2) не представляется возможным, однако характер процесса, описанный в источниках [3, 4], а также ход предшествующих рассуждений, позволяют предположить, что изменение давления, действующего в цистерне соска, происходит по некой убывающей зависимости, которая может быть описана при помощи уравнения экспоненциальной функции, максимум которой соответствует максимальному значению внутривыменного давления по аргументу, соответствующему началу фазы B такта сосания:

$$P_{BH}(t) = P_{BH \max} e^{-\frac{\left(\frac{\pi}{\tau_B} (t - \tau_A) \right)^2}{\pi}}, \quad (5)$$

где $P_{BH \max}$ – максимальное значение внутривыменного давления, Па.

График функции 5 имеет вид, представленный на рисунке 2.

Тогда уравнение (2) принимает следующий вид:

$$V_B = Q_{inB} \tau_B = \int_{\tau_A}^{\tau_c} \left(\mu_c S_c \sqrt{2g \left(H + \frac{P_{BH \max} e^{-\frac{\left(\frac{\pi}{\tau_B} (t - \tau_A) \right)^2}{\pi}} - P_{PA3}}{\rho g} \right)} \right) dt_c. \quad (6)$$

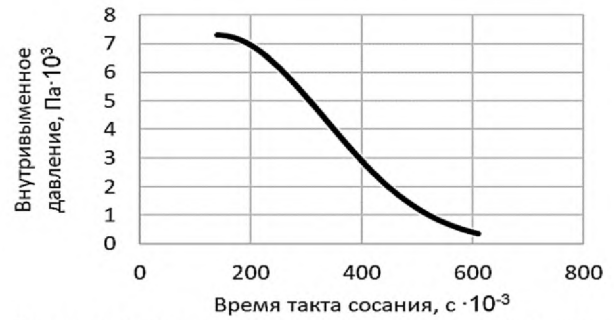


Рисунок 2. Теоретическая зависимость внутривыменного давления от времени такта сосания

В момент начала такта сосания скорость молока в венном кольце незначительна, поэтому потерями напора в нем можно пренебречь. Очевидно, что напор, созданный молоком на высоте соска, не сможет оказывать существенного влияния на процесс, поскольку значение его намного меньше действующих давлений ($H = 0,03 \dots 0,05$ м, $P_{PA3} = -42 \dots -48$ кПа = $-4,28 \dots -4,89$ м вод. ст.), тогда

$$V_B = Q_{inB} \tau_B = \int_{\tau_A}^{\tau_c} \left(\mu_c S_c \sqrt{\frac{2P_{BH \max} e^{-\frac{\left(\frac{\pi}{\tau_B} (t - \tau_A) \right)^2}{\pi}} - 2P_{PA3}}{\rho}} \right) dt_c. \quad (7)$$

В соответствии с уравнением (5), на основании уравнений, используемых для расчета расхода потока молока [5, 6], учитывая, что

$$Q_{in} = Q_{сфпр} = 4,236 Q_{ампл}, \quad (8)$$

где $Q_{сфпр}$ – среднее значение расхода потока, рассчитанное из измеренной в производственных условиях средней молокоотдачи [5], м³/с,

а также принимая, что

$$Q_{min} = 3,236 Q_{ампл}, \quad (9)$$

запишем зависимость мгновенного значения площади канала от времени фазы B такта сосания:

$$S_{сф}(t_c) = \frac{Q_{сфпр} \left(\cos \left(\frac{\pi}{\tau_B} (t_c - \tau_A) \right) + 1 \right) + 0,764 Q_{сфпр}}{\mu_c \sqrt{\frac{2P_{BH \max} e^{-\frac{\left(\frac{\pi}{\tau_B} (t_c - \tau_A) \right)^2}{\pi}} - 2P_{PA3}}{\rho}}}. \quad (10)$$

Числитель данного уравнения определяет мгновенные значения расхода потока молока через канал соска, а знаменатель представляет собой соответствующие значения скорости этого потока. Если в упрощенной форме для расчетов принять, что $\mu_c=0,65$ – величина постоянная [7] и приняв также условия постоянства вакуумметрического давления $P_{РАЗ} = -41$ кПа в подсосковой камере, в соответствии с уравнением (10) можем рассчитать значение площади отверстия сфинктера для различных значений аргумента полуценной функции (рис. 3).

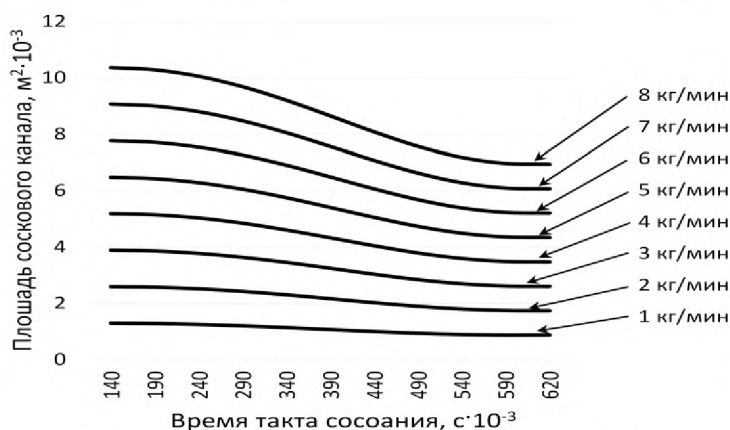


Рисунок 3. Расчетная площадь соскового канала

Очевидно, что площадь соскового канала изменяется в зависимости от мгновенного значения потока молока в фазе *B* такта сосания. Минимальное значение площади соответствует некоторому устойчивому гидравлическому режиму сосок – доильный стакан. Максимальное расчетное значение соответствует полностью открытому сосковому каналу, который в таком положении имеет сечение, близкое к круглому. Полученные результаты соответствуют экспериментальным данным по измерению диаметра соскового канала, который, как правило, колеблется в пределах от 2,5 до 4 мм, а у тугодойных коров не превышает 2 мм [8]. При этом измеренный поток молока соответствует приведенным расчетным данным. Максимальная (пиковая) молокоотдача коров обычно изменяется в пределах от 3 до 6 кг/мин., но у высокопродуктивных животных может достигать 8...10 кг/мин.

Для оценки влияния величины исследуемых факторов на поток молока построим теоретическую зависимость площади соскового канала от вакуумметрического давления в подсосковой камере при различных значениях скорости молокоотдачи (рис. 4). Поверхность отклика построена на основании рассчитанных по уравнению (10) средних значений величины (числитель) и скорости (знаменатель) потока молока.

Как видно из графика, взаимное влияние скорости молокоотдачи и площади сфинктера является более

значимым по сравнению с фактором вакуумметрического давления. Из этого можно сделать вывод о том, что пропускная способность соскового канала выступает как основной лимитирующий фактор исследуемого процесса молоковыведения. Вакуумметрическое давление оказывает наименьшее влияние в области малых значений площади соскового канала и только при молокоотдаче более 5 кг/мин. проявляется как значимый фактор. Расчетные результаты получены для стандартных условий вакуумметрического режима работы доильного стакана. Очевидно, что по ряду причин, связанных с динамикой процесса доения и эвакуации молока через элементы тракта, соединяющего подсосковую камеру доильного стакана с молокопроводом, имеют место флуктуации вакуумметрического давления под соском, как в такте сосания, так и в такте сжатия [9].

Полученные теоретические данные имеют прикладное значение, поскольку подтверждают мнение многих практиков молочного животноводства о том, что повышение вакуумметрического давления не позволяет существенно интенсифицировать процесс доения, особенно, если стадо содержит большое количество тугодойных коров. Увеличение уровня вакуумметрического давления имеет смысл только при высокой молокоотдаче животных [10]. Попытки увеличить скорость молокоотдачи в условиях реальных ферм, как правило, дают незначительный и кратковременный положительный эффект. Впоследствии повышение вакуумметрического давления выступает как негативный стрессобразующий фактор технологии и приводит к формированию негативных рефлексов отрицания процесса доения у животных [11]. Ожидаемым результатом в данном случае является снижение скорости молокоотдачи вследствие нарушения нейрогуморальных процессов в организме и проявления нежелательных этологических реакций у животных, что оказывает негативное влияние не только на интенсивность процесса доения, но и обуславливает снижение продуктивности, а также повышение риска развития заболеваний молочной железы.

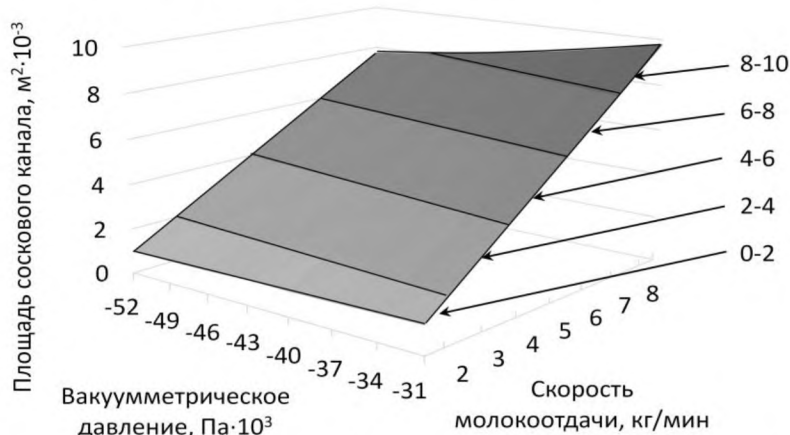


Рисунок 4. Расчетная зависимость площади соскового канала от скорости молокоотдачи и вакуумметрического давления

Заключение

1. Понимание механизма раскрытия соскового канала в процессе доения имеет большое значение с точки зрения развития теории молокоотдачи коровы, формирующейся на основе конвергентных знаний в области технологии, физиологии животного, тонкостей настройки и работы современного оборудования для доения коров.

2. Полученные математические зависимости позволяют рассчитать объем молока за один такт на основе уравнений расхода и скорости потока молока, а также описывают динамику изменения площади соскового канала в такте сосания в зависимости от внутривыменного и вакуумметрического давлений.

3. Результаты расчета имеют важное практическое значение, поскольку подтверждают, что повышение вакуумметрического давления не обеспечивает пропорциональный рост скорости молокоотдачи у коров и не позволяет существенно интенсифицировать процесс доения.

4. Увеличение вакуумметрического давления выше уровня - 4кПа может стать причиной формирования у животных рефлексов отрицания машинного доения и, как следствие, снижения скорости молокоотдачи, уменьшения продуктивности и повышения риска заболевания молочной железы.

5. Полученные результаты исследования, обеспечивающие развитие общей теории молоковыведения, направлены на повышение уровня физиологичности процесса машинного доения, сохранение здоровья и продуктивного долголетия коров при постепенном увеличении их продуктивности.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ**

1. Китиков, В.О. Научные основы создания технологического оборудования и физиологически щадящего процесса машинного доения коров: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / В.О. Китиков. – Минск, 2015. – 251 с.

2. Establishing the influence of technical and technological parameters of milking equipment on the efficiency of machine milking / E. Aliiev [et al.] //

Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – February 24. – P. 44-55.

3. Шуринг, Н. Концепция «разумного доения» компании GEA: иллюстрированное руководство по оптимальной технике доения коров / Н. Шуринг. – GEA Farm Technologies, Inc: GEA Copyright, 2016. – 145 с.

4. Mein, Graeme A. Machine Milking / Graeme A. Mein, Douglas J. Reinemann // CreateSpace Independent Publishing, 2015. – Vol. 1. – 174 p.

5. Григорьев, Д.А. Моделирование процесса молоковыведения в системе сосок – доильный стакан / Д.А. Григорьев, В.О. Китиков, И.В. Авдошка, К.В. Король // Агропанорама. – 2024. – № 1. – С. 7-11.

6. Григорьев, Д.А. Уравнение равновесного потока жидкости в системе сосок – доильный стакан / Д.А. Григорьев, А.М. Кравцов // Агропанорама. – 2023. – № 5. – С. 2-6.

7. Пильгунов, В.Н. Особенности истечения жидкости через отверстия некруглой формы / В.Н. Пильгунов, К.Д. Ефремова // Наука и образование (электр. журн. МГТУ им. Н.Э. Баумана). – 2015. – № 2. – С. 1-23.

8. Сужение соскового канала (тугодойкость) / Официальный сайт компании MSD Animal Health, Россия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ruminants.msd-animal-health.ru/disease/bolezni-korov/bolezni-vymeni/suzhenie-soskovogo-kanala-tugodoykost>. – Дата доступа: 14.05.2024.

9. Besier, J. Vacuum levels and milk-flow-dependent vacuum drops affect machine milking performance and teat condition in dairy cows / J. Besier and R.M. Bruckmaier // Journal of Dairy Science. – 2016. – Vol. 99. – № 4. – P. 3096-3102.

10. Reinemann, D.J. Effects of flow-controlled vacuum on milking performance and teat condition in a rotary milking parlor / D.J. Reinemann, B.H. P. van den Borne, H. Hogeveen, M. Wiedemann, C.O. Paulrud // Journal of Dairy Science. – 2021. – Vol. 104. – № 6. – P. 3096-3102.

11. Григорьев, Д.А. Технология машинного доения коров на основе конвергентных принципов управления автоматизированными процессами: монография / Д.А. Григорьев, К.В. Король. – Гродно: ГТАУ, 2017. – 216 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 07.06.2024