

И.Н. Шило [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – № 1. – С. 31-36.

13. Закономерности накопления повторных осадков почвы при воздействии ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники / И.Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2014. – № 6. – С. 2-7.

14. Обоснование закономерностей деформирования почв различных агрофонов под воздействием колес / И.Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2018. – № 2. – С. 2-6.

15. Влияние почвенных условий эксплуатации на проходимость колесных машин / И.Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2020. – № 1. – С. 2-5.

16. Влияние типа опорной поверхности на сопротивление качению колесных транспортно-тяговых средств / Н.Н. Романюк [и др.] // Агропанорама. – 2022. – № 6. – С. 2-7.

17. Моделирование взаимодействия с почвой ходовых систем колесных транспортно-тяговых машин / Н.Н. Романюк [и др.] // Агропанорама. – 2023. – № 3. – С. 2-8.

18. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 08.02.2024

УДК 637.115:637.116.2

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-161-1-7-11>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОЛОКОВЫВЕДЕНИЯ В СИСТЕМЕ СОСОК – ДОИЛЬНЫЙ СТАКАН

Д.А. Григорьев,

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

В.О. Китиков,

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

И.В. Авдошка,

доцент каф. информационных технологий БГУ, канд. физ.-мат. наук, доцент

К.В. Король,

соискатель каф. математики и технических дисциплин ГТАУ

В статье теоретически обоснованы и представлены в графическом виде расчетные значения решения аппроксимирующих уравнений, описывающих процесс выхода молока из сфинктера соска под действием вакуумметрического и внутривыменного давления в процессе доения. Полученные результаты соответствуют современным тенденциям, направленным на обеспечение щадящего физиологически обусловленного доения, путем изменения длительности такта сосания.

Ключевые слова: доильное оборудование, физиология доения коров, фазы пульсации, аппроксимирующие уравнения молокоотдачи, гидравлика истечения жидкостей, доильный стакан, сосковый сфинктер, вакуумметрическое давление.

The article provides a theoretical foundation and presents graphically calculated values from approximating equations describing the process of milk output from the teat sphincter under the action of vacuum-metric and intra-oval pressure in the process of milking. The obtained results are in line with the current trends to ensure gentle physiological milking by changing the duration of the suckling tact.

Key words: milking equipment, physiology of milking cows, pulsation phases, approximating milk flow equations, fluid flow hydraulics, teat cup, teat sphincter, vacuum pressure.

Введение

Республика Беларусь входит в число 20 стран, производящих 80 % мирового объема молока, и является лидером в СНГ по производству продовольствия на душу населения, которое в два раза превышает норму рационального потребления. В 2019 году уровень самообеспечения республики по молоку и молокопродуктам составил 241 %. Нарращивание валового производства молока осуществлялось за счет реализации потенциала

продуктивности коров молочного стада при сохранении их численности на уровне 1,4 млн голов [1]. Обзор мирового молочного рынка, сделанный продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО), показал, что Беларусь входит в число лидеров по производству молока в Европе. В 2022 году из 232 млн т молочной продукции Беларусь произвела 7,860 млн т, при этом 4,113 млн т были экспортированы [2].

Модернизация и техническое переоснащение молочного скотоводства республики рассматриваются как основной фактор развития, важнейшим звеном которого является строительство новых и реконструкция существующих ферм и комплексов. Современный этап развития доильного оборудования связан с информационными технологиями, использование которых обеспечивает инновационный синергетический эффект за счет максимальной адаптивности процессов к физиологии животных и условиям реализации технологии на каждой конкретной ферме [3].

В Республике Беларусь данное научное направление разрабатывалось в рамках государственных программ и исследовалось научными коллективами под руководством ведущих ученых в области физиологии и техники доения – М.В. Барановского, В.И. Передни и других.

Создание и системное применение нового оборудования опирается на теоретическое моделирование и экспериментальное обоснование физиологических режимов и адаптивных алгоритмов функционирования сложной детерминированной системы – человек – машина – животное, которое рассматривается в рамках конкретных технологических процессов и реализуется на основе удобных для практического применения математических моделей.

Целью работы является обоснование теоретических зависимостей и определение количественных параметров процесса выхода молока из сфинктера соска, обеспечивающих возможность дальнейшего развития общей теории молокоотдачи в процессе доения.

Основная часть

Существует несколько концепций моделирования процесса извлечения (выхода) молока из сфинктера. Интерес представляют как закономерности, полученные в результате практических исследований, так и попытки представить этот процесс в виде теоретических зависимостей [4]. Чаще всего такие зависимости представляют в виде аппроксимации экспериментальных данных полиномами различной степени. Действительно, такой подход позволяет достаточно точно описать искомую функцию и получить эмпирические уравнения с высокой достоверностью. В то же время такие уравнения зачастую получаются громоздкими и неудобными для использования. Наилучшими для практического применения являются уравнения, полученные с использованием стандартных и легко преобразуемых математических функций. Очевидно, что такой способ является самым удобным, но в то же время и самым ответственным, поскольку требует подтверждения соответствия полученных моделей показателям реальных производственных процессов.

Расчет искомых величин может быть проведен на основе знания скорости молокоотдачи коровы, которая является наиболее часто измеряемым параметром, используемым для оценки как генетического потенциала, так и факторов технологии производства

молока, включая физиологичность машинного доения. Скорость молокоотдачи может быть рассчитана исходя из разового удоя коровы и измеренного времени доения. Известно, что большинство производителей доильного оборудования считают данный показатель ключевым, поэтому стремятся измерять его техническими средствами (счетчиками и датчиками расхода потока) различной конструкции практически на каждой современной молочно-товарной ферме.

Получить в программе управления стадом данные о скорости молокоотдачи для каждой коровы и для стада в целом представляется доступной задачей. При этом скорость молокоотдачи является основным входным параметром, используемым для управления процессом доения.

Теоретическое обоснование динамического доения опирается на зависимость потока молока через сфинктер в такте сосания. Для определения параметров потока необходимо вычислить средний расход молока $Q_{\text{сфср}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) через сфинктер в такте сосания. Если предположить, что расход линейно связан со средней скоростью молокоотдачи, получим:

$$Q_{\text{сфср}} = \frac{M_{\text{ср}}}{60n\rho\sigma_c}, \quad (1)$$

где $M_{\text{ср}}$ – средняя скорость молокоотдачи, кг/мин;

n – количество доящихся долей вымени, шт.;

ρ – плотность молока, $\text{кг}/\text{м}^3$;

σ_c – относительная длительность такта сосания, которая показывает, какую долю он занимает в общем времени цикла.

Расчет проведем на основании ранее полученных уравнений, моделирующих процесс молокоотдачи [5]. Запишем уравнение для определения расхода потока жидкости через отверстие сфинктера:

$$Q_{\text{сф}} = \mu_c S_c v_c = \mu_c S_c \sqrt{2g \left(H + \frac{P_a - P_c}{\rho g} \right)}, \quad (2)$$

где μ_c – коэффициент расхода для отверстия сфинктера;

S_c – площадь сфинктера, м^2 ;

v_c – скорость истечения струи молока из сфинктера соска, $\text{м}/\text{с}$;

H – высота соска, м ;

P_a – давление, действующее в сечении венного кольца, Па;

P_c – давление, действующее в сечении сфинктера, Па;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Коэффициент расхода μ_c [6] зависит от числа Рейнольдса. На его величину влияют также числа Фруда и Вебера, определяющие отношения сил инерции к силам тяжести и поверхностного натяжения. По данным А.Д. Альтшуля [7], влияние оказывает в основном число Рейнольдса в диапазоне: $Fr \geq 10$ и $We \geq 2500$. От числа Рейнольдса также зависит коэффициент сжа-

тия, поскольку им определяются условия течения при подходе к отверстию.

Анализ графиков и цифровых данных, полученных учеными Висконсинского университета [8], а также циклический характер процесса доения, позволили предположить, что кривая, ранее описанная в источнике [5], ограничивающая зону изменяющегося потока от максимального значения расхода Q_{\max} до минимального его значения Q_{\min} , может быть аппроксимирована тригонометрической функцией $y = \cos x$ в интервале от 0 до π (рис. 1). Тогда мгновенное значение расхода потока через сфинктер составит:

$$Q_{\text{сф}B}(t_c) = Q_{\text{ампл}} \left(\cos \left(\frac{\pi}{\tau_B} (t_c - \tau_A) \right) + 1 \right) + Q_{\min}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{сф}B}$ – расход потока молока через сфинктер в фазе B , $\text{м}^3/\text{с}$;

t_c – момент времени такта сосания, с;

$Q_{\text{ампл}}$ – амплитудное значение расхода потока, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_{\min} – минимальное значение расхода потока, $\text{м}^3/\text{с}$;

τ_B – длительность фазы B такта сосания, с;

τ_A – длительность фазы A такта сосания, с.

Анализ графиков и цифрового материала также показывает, что значения $Q_{\text{ампл}}$, Q_{\min} , Q_{\max} связаны между собой определенным соотношением при различных значениях скорости молокоотдачи. Полученные результаты [8] позволяют предположить, что данная зависимость соответствует золотому сечению, поэтому можем записать:

$$Q_{\max} = 1,618 Q_{\min}, \quad (4)$$

где 1,618 – золотое число, равное пределу отношения последовательных чисел Фибоначчи.

Учитывая, что

$$Q_{\max} = 2Q_{\text{ампл}} + Q_{\min}, \quad (5)$$

выразим Q_{\min} через $Q_{\text{ампл}}$ и получим:

$$Q_{\min} = 3,236 Q_{\text{ампл}}. \quad (6)$$

Тогда уравнение (3) можем переписать в следующем виде:

$$Q_{\text{сф}B}(t_c) = Q_{\text{ампл}} \left(\cos \left(\frac{\pi}{\tau_B} (t_c - \tau_A) \right) + 1 \right) + 3,236 Q_{\text{ампл}}. \quad (7)$$

Изучением влияния вакуумметрического давления на соски занимались ряд исследователей [8, 9]. Опыт показывает, что раскрытие сфинктера происходит очень быстро, поэтому длительность раскрытия можно приравнять к интервалу времени, равному длительности переходной фазы A . В государственных стандартах [10] и стандартах ISO длительность пере-

ходной фазы A не регламентируется. Значение фазы всасывания B должно составлять не менее 30 % от всего цикла пульсации. В соответствии с рекомендациями производителей оборудования фазы могут изменяться в пределах: $A=110 \dots 160$ мс и $B = 425 \dots 525$ мс. Тогда, рассчитав значения молокоотдачи в начале такта сосания и приняв условие, что к моменту начала фазы B сфинктер полностью раскрыт и молокоотдача имеет максимальное значение, запишем уравнение восходящей части графика расхода потока:

$$Q_{\text{сф}A}(t_c) = \frac{Q_{\max}}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{t_c \pi}{\tau_A} \right) \right), \quad (8)$$

где $Q_{\text{сф}A}$ – расход потока молока через сфинктер в фазе A , $\text{м}^3/\text{с}$.

Обозначим расход, соответствующий среднему значению тригонометрической функции на участке от Q_{\max} до Q_{\min} , как смещенный средний, тогда

$$Q_{\text{смер}} = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{2} + Q_{\min} = 4,236 Q_{\text{ампл}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{смер}}$ – смещенный средний расход потока через сфинктер, $\text{м}^3/\text{с}$.

Если для простоты вычисления принять условие, что $Q_{\text{смер}} = Q_{\text{сф}B}$, рассчитанное по формуле (1), то можем определить значения расхода молока из сфинктера для аргумента функции в пределах заданной длительности такта сосания. Подставив значения времени, соответствующие длительности переходной фазы $A=140$ мс и длительности фазы всасывания $B=480$ мс в полученные уравнения, построим группу графиков, описывающих теоретическую зависимость потока молока из сфинктера от времени такта сосания при различных скоростях молокоотдачи (рис. 1).

Из графиков видно, что длительность фазы A можно считать величиной условно постоянной, поскольку она зависит, в основном, от скорости раскрытия соскового чулка, которая в свою очередь определяется параметрами вакуумметрического давления в камерах доильного стакана и упругими свойствами материала, из которого чулок изготовлен, а также его натяжением и толщиной. Скорость молокоотдачи положительно коррелирует с внутривыменным давлением, которое также может повлиять на длительность фазы A . И хотя это влияние незначительно, но его необходимо учитывать при проведении точных гидравлических расчетов.

Аналогичные зависимости могут быть построены для любой длительности такта сосания в пределах от 0 до 1200 мс. Графики зависимости для такта сосания длительностью от 520 до 820 мс приведены на рис. 2.

Как видно из графиков, при уменьшении длительности фазы B такта сосания теоретическое значение расхода потока молока растет, что на первый взгляд выглядит вполне логично, поскольку за меньший промежуток времени необходимо извлечь большее количество молока. Однако на практике данные графики могут выглядеть несколько

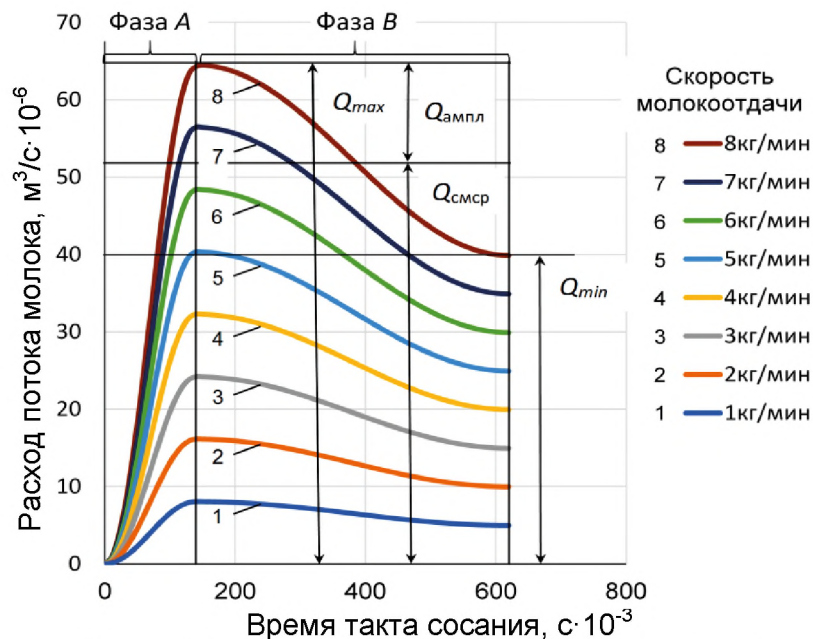


Рисунок 1. Расчетные графики расхода потока молока из сфинктера при различных скоростях молокоотдачи коровы: значения Q_{max} , Q_{min} , $Q_{смер}$ указаны на графике, построенном для скорости молокоотдачи – 8 кг/мин.

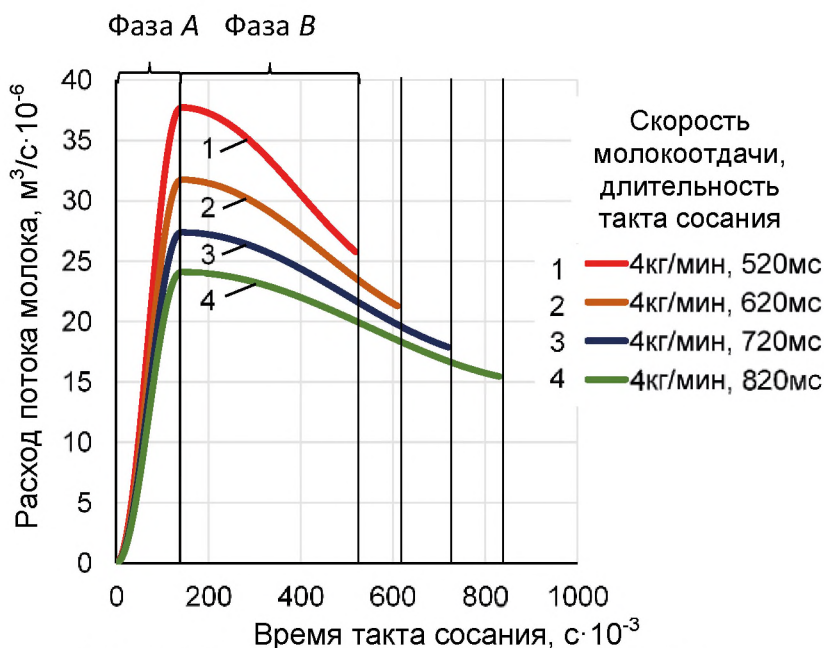


Рисунок 2. Расчетные графики расхода потока молока из сфинктера при различной длительности такта сосания для скорости молокоотдачи – 4 кг/мин.

иначе вследствие того, что для реализации более высокой молокоотдачи потребуются более высокий уровень вакуумметрического давления и пропускная способность линии транспортировки молока от аппарата до молокопровода. На самом же деле увеличение потока приведет к пропорциональному падению вакуумметрического

давления и снижению пропускной способности молочной линии, что не позволит получить искомую скорость. Несмотря на это, полученные кривые позволяют количественно оценить параметры процесса выхода молока из соска. При этом очевидно, что длительность такта сосания может быть как недостаточной, так и избыточной, при данном конкретном расходе потока.

Как показывает опыт ведущих компаний – производителей доильного оборудования, изменение характера пульсации доильного чулка, когда система подстраивается под поток молока, увеличивая или уменьшая длительность, то есть, изменяя соотношение и частоту тактов в зависимости от измеренной скорости молокоотдачи, является наиболее эффективным приемом обеспечения адаптивности машинного доения [11].

Полученные результаты теоретического исследования позволяют определить параметры механики жидкости доильного стакана и могут быть использованы для гидравлического расчета системы «доильный аппарат – вымя».

Заключение

1. Моделирование сложно детерминированных технологических процессов взаимодействия человека, машины и животного, таких как выход молока из сфинктера соска, направлено на создание удобных для практического применения алгоритмов управления оборудованием.

2. В уравнениях расхода потока молока используются стандартные математические функции для описания циклического процесса пульсации доильного стакана. В качестве входного параметра для расчета используется общая скорость молокоотдачи, которая является наиболее часто контролируемым и важным технологи-

ческим показателем организации технологии доения.

3. Графики зависимости расхода потока молока позволяют говорить о существенной значимости длительности такта сосания, которая является фактором, обеспечивающим не только интенсификацию процесса молоковыведения, но и теоретически

позволяет снизить нагрузку на сфинктер соска, что приведет к сохранению здоровья животных и продлению срока их хозяйственного использования. Данное утверждение подтверждается опытом ведущих производителей оборудования для доения, которые используют динамическую пульсацию, управляемую по скорости молокоотдачи коровы.

4. Представленная модель молоковыведения не учитывает падение вакуумметрического давления в линии транспортирования молока от доильного стакана до молокопровода, поэтому значения расхода потока необходимо скорректировать, поскольку при увеличении скорости растут и потери напора в системе.

5. Результаты научного исследования направлены на развитие теории молоковыведения и обеспечивают более высокий уровень физиологичности взаимодействия элементов системы «человек – машина – животное» путем создания адаптивных алгоритмов реализации процесса доения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аналитическая записка о выполнении Государственной программы развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016-2020 годы за 2019 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mshp.gov.by/programms/ca5bed93374821f3.html>. – Дата доступа: 14.11.2023.

2. Dairy Market Review: Emerging trends and outlook 2022 / Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). – Rome, 2023. – 10 p.

3. Григорьев, Д.А. Технология машинного доения коров на основе конвергентных принципов управления автоматизированными процессами:

монография / Д.А. Григорьев, К.В. Король. – Гродно: ГГАУ, 2017. – 216 с.

4. 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: February, 24. – 2022. – P. 44-55.

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

6. Пильгунов, В.Н. Особенности истечения жидкости через отверстия некруглой формы / В.Н. Пильгунов, К.Д. Ефремова // Наука и образование: электрон. журнал МГТУ им. Баумана. – М, 2015. – № 2. – С. 1-23.

7. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль; 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

8. Mein, Graeme A. Machine Milking / Graeme A. Mein, Douglas J. Reinemann. – Create Space Independent Publishing, 2015. – Vol. 1. – 174 p.

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. Установки доильные. Конструкция и рабочие характеристики: СТБ 5707-2014. – Минск: Беларусь / Гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2014. – 23 с.

11. MC 200. Модуль управления дойкой: руководство по эксплуатации, версия 4.5 // S.C.R Engineers Ltd, 2007. – 74 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.11.2023

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 1-е полугодие 2024 года: для индивидуальных подписчиков - 42,78 руб., ведомственная подписка - 44,94 руб.