ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

МЕХАНІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 637.116-52
https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-4-319-334

Поступила в редакцию 11.07.2024
Received 11.07.2024

Д. А. Григорьев[1], В. О. Китиков[2], К. В. Король[3]

[1]Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь
[2]Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[3]ООО «Агроферма», Пушкино, Российская Федерация

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОЙ МЕХАНИКО-ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДОЕНИЯ КОРОВ

Аннотация. Дается определение и сформулированы методологические принципы создания адаптивной механико-информационной системы доения коров, разрабатываемой в рамках сложно детерминированного взаимодействия элементов триединой системы человек – машина – животное. Приведена итерационная модель жизненного цикла алгоритма адаптивного управления процессом доения, реализуемая путем декомпозиции и агрегирования компонентов и элементов подсистемы объекта инжиниринга. На основе теории механики жидкости сформированы общие принципы математического моделирования процесса молоковыведения с использованием для описания динамики молокоотдачи коровы стандартных математических функций. Приведены уравнения потока и объема молока, выдаиваемого за один цикл пульсации. Обоснована приоритетность влияния на интенсивность молокоотдачи длительности и соотношения тактов по сравнению с величиной вакуумметрического давления. На основе разработанной модели сделан анализ конкретных производственных ситуаций, связанных с особенностями протекания физиологических процессов и этологических реакций животных. Описаны примеры методики производственного исследования, проведенного с использованием возможностей адаптивных систем управления процессом доения. Полученные результаты подтверждают возможность увеличения скорости молокоотдачи и повышения продуктивности коров за счет использования оригинальной методики выбора параметров дифференцированной стимуляции и динамической пульсации в зависимости от скорости молокоотдачи и продуктивности коров в стаде. Разработанные методические принципы направлены на создание адаптивного к индивидуальным физиологическим особенностям и этологическим реакциям животных оригинального алгоритма управления процессом доения, обеспечивающего повышение продуктивности коров.

Ключевые слова: адаптивное доение, модельно-ориентированный метод, механико-информационная система, дифференцированная стимуляция, динамическая пульсация, молокоотдача, продуктивность коров

Для цитирования: Григорьев, Д. А. Методологические принципы построения адаптивной механико-информационной системы доения коров / Д. А. Григорьев, В. О. Китиков, К. В. Король // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2024. – Т. 62, № 4. – С. 319–334. https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-4-319-334

Dzmitry A. Hryhoryeu[1], Vadzim A. Kitsikau[2], Kiril V. Karol[3]

[1]Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus
[2]Institute of Housing and Communal Services of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[3]LLC "Agroferma", Pushkino, Russian Federation

METHODOLOGICAL PRINCIPLES FOR CREATING AN ADAPTIVE MECHANICAL-INFORMATION SYSTEM FOR COW MILKING

Abstract. The definition and methodological principles for creating an adaptive mechanical-information system for cow milking are provided, developed within the framework of the complex determined interaction of elements in the triune system of human-machine-animal. An iterative life cycle model of the adaptive control algorithm for the milking process is presented, implemented through the decomposition and aggregation of components and elements of the engineering object

© Григорьев Д. А., Китиков В. О., Король К. В., 2024

subsystem. Based on fuid mechanics theory, general principles of mathematical modeling of the milk extraction process are formulated, using standard mathematical functions to describe the dynamics of cow milk fow rate. Equations for the fow and volume of milk extracted per pulsation cycle are provided. The priority infuence of the duration and ratio of cycles on milk fow rate intensity, compared to the magnitude of vacuum pressure, is substantiated. Based on the developed model, an analysis of specifc production situations related to the peculiarities of physiological processes and ethological reactions of animals is conducted. Examples of the production research methodology using the capabilities of adaptive control systems for the milking process are described. The obtained results confrm the possibility of increasing the milk fow rate and cow productivity through the use of an original methodology for selecting parameters for differentiated stimulation and dynamic pulsation depending on the milk fow rate and productivity of cows in the herd. The developed methodological principles are aimed to create an original control algorithm for the milking process, adaptive to the individual physiological characteristics and ethological reactions of animals, ensuring increased cow productivity.

Keywords: adaptive milking, model-oriented method, mechanical-information system, differentiated stimulation, dynamic pulsation, milk fow rate, cow productivity

For citation: Hryhoryeu D. A., Kitsikau V. A., Karol K. V. Methodological principles for creating an adaptive mechanical-information system for cow milking. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 4, pp. 319–334 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-4-319-334

Введение. В условиях постоянно растущего рынка молока [1] молочное животноводство из дотационной отрасли преобразуется в сегмент прибыльного производства и бизнеса, который становится важнейшей отраслью экономики целого ряда развивающихся стран и регионов, в числе которых находится и Республика Беларусь[1] [2]. На современном этапе развития в мировой практике молочного животноводства происходит процесс трансформации принципов организации технологии производства молока, и пересматриваются концептуальные подходы к эксплуатации дойного стада как специфического основного средства производства. С одной стороны, сохраняются тенденции в рамках ставшей основной для стран с развитым молочным скотоводством концепции «выровненного стада», отобранного по принципу пригодности к промышленной технологии. С другой – формируются новые тенденции, ориентированные на адаптивность техники и технологий к породным, фенотипическим, групповым и индивидуальным особенностям животных.

Особое внимание уделяют механизированным и автоматизированным процессам, важнейшим из которых является машинное доение. В практике индустриального животноводства организация машинного доения является ключевым процессом, поскольку конфигурация и производительность доильной машины во многом определяют способ организации суточного трафика коров, а также принципы движения стада в рамках поточно-цеховой системы. Важность машинного доения определяется также тем, что именно в доильном аппарате реализуется непосредственное взаимодействие животного с машиной. Очевидно, что эффективность такого взаимодействия определяется уровнем адаптивности алгоритмов управления механическими устройствами к физиологии и этологическим реакциям животных. В результате развития автоматизации и цифровизации доильное оборудование, к которому физически «привязаны» информационные технологии на современной молочно-товарной ферме, становится одним из основных и наиболее дорогостоящих средств производства [3] и приобретает принципиально новую функцию информационного центра всей технологии производства молока. Адаптивность предполагает деликатное техническое и технологическое воздействие на организм животного, является эффективным инструментом продления срока хозяйственного использования коров и выступает как важнейший фактор, обеспечивающий развитие отрасли молочного животноводства. Такой подход направлен на формирование высокопродуктивного стада на новых и реконструированных фермах и комплексах [4].

В процессе технологического проектирования и создания нового оборудования для животноводства предлагается использовать методы системного инжиниринга, которые характеризуются как методология и инструменты целостного моделирования, проектирования, создания и эксплуатации сложных технологических и организационных объектов [5]. Инжиниринг в молоч-

[1] Аналитическая записка о выполнении Государственной программы развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016–2020 годы за 2019 год [Электронный ресурс]. URL: https://mshp.gov.by/programms/ca5bed93374821f3.html (дата обращения: 14.12.2023).

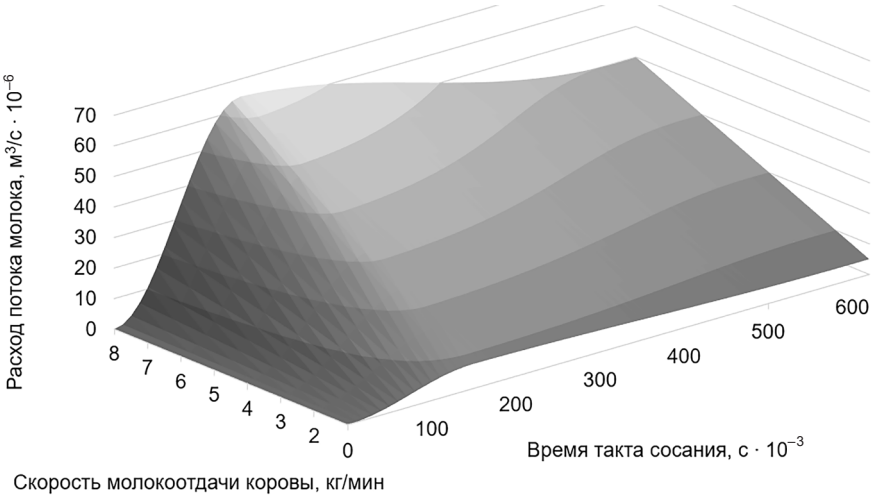

Рис. 3. Поверхность отклика расхода потока молока из соскового канала при различных значениях скорости молокоотдачи коровы

Fig. 3. Response surface of milk flow rate from the teat canal at various values of cow milk flow rate speed

Точка пересечения двух кривых сегментированной функции (1) имеет важный физический смысл, поскольку определяет максимальный поток молока, необходимый для проведения гидравлических расчетов. Расчет искомых величин произведен на основе знания скорости молокоотдачи, которая является наиболее часто измеряемым параметром, используемым для оценки как генетического потенциала, так и факторов технологии производства молока, включая физиологичность машинного доения [10]. Были разработаны формулы для вычисления среднего потока через сосковый канал в такте сосания, положительно коррелирующего с общей средней и максимальной скоростью молокоотдачи, которая выбиралась соответствующей значению в конкретном стаде и для конкретного животного. На основании полученных значений переменных рассчитывались значения расхода молока из сфинктера для аргумента функции в пределах заданной длительности такта сосания. Полученные уравнения позволяют построить и проанализировать теоретические зависимости расчетных величин. На рис. 3 приведена построенная по расчетным данным поверхность отклика, определяющая зависимость между потоком молока, скоростью молокоотдачи коровы и временем такта сосания при постоянном вакуумметрическом давлении.

Полученные зависимости позволяют произвести расчет параметров процесса молоковыведения с учетом интенсивности потока молока. Численное определение зависимости теоретического значения расхода потока молока от длительности фазы *B* такта сосания обеспечивает возможность управления процессом путем изменения длительности такта сосания.

Для моделирования процесса истечения жидкости из соскового канала используется уравнение Бернулли и другие зависимости теории механики жидкости. Полученные закономерности были обоснованы с точки зрения гидравлики и физиологии молокоотдачи, записаны в дифференциальном виде и преобразованы до выражений, позволяющих производить расчет параметров выхода молока из соскового канала. Расчет производится на основании параметров молокоотдачи, измеряемых существующими на большинстве современных ферм техническими средствами. Пропускная способность соскового канала выступает как основной лимитирующий фактор исследуемого процесса молоковыведения. Особое значение имеет площадь соскового канала, которая изменяется в процессе его раскрытия. Строение сфинктера соскового канала таково, что он раскрывается, переходя от сжатого состояния закрытого канала к полностью открытому. Для проведения гидравлических расчетов изменяющееся в течение фазы *B* отверстие канала можно представить в виде насадков круглого, квадратного и крестообразного сечения, гидравлика которых подробно описана в научных трудах [11] (рис. 4).

Рис. 4. Модель раскрытия соскового канала: крестообразное сечение – канал начинает раскрываться; квадратное сечение – канал раскрыт частично; круглое сечение – канал полностью раскрыт

Fig. 4. Model of teat canal dilation: cross-sectional shape – canal starts to dilate; square shape – canal partially dilated; circular shape – canal fully dilated

Приведенная модель может быть использована для описания процесса раскрытия соскового канала из уравнения [12], определяющего зависимость мгновенного значения его площади от времени фазы *B* такта сосания:

$$S_{\text{ск}}(t_{\text{с}}) = \frac{\frac{Q_{\text{ск ср}}}{4,236}\left(\cos\left(\frac{\pi}{\tau_B}(t_{\text{с}} - \tau_A)\right) + 1\right) + 0,764Q_{\text{ск ср}}}{\mu_{\text{ск}}(t_{\text{с}})\sqrt{\frac{2\left(P_{\text{вн max}}e^{-\frac{\left(\frac{\pi}{\tau_B}(t_{\text{с}} - \tau_A)\right)^2}{\pi}} - P_{\text{раз}}\right)}{\rho}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ск}}(t_{\text{с}})$ – значение площади сечения соскового канала, м^2; $Q_{\text{ск ср}}$ – среднее значение расхода потока, рассчитанное из измеренной в производственных условиях средней молокоотдачи [13], м^3/с; $\mu_{\text{ск}}(t_{\text{с}})$ – значение коэффициента расхода для отверстия соскового канала; $P_{\text{вн max}}$ – максимальное значение внутривыменного давления, Па; $P_{\text{раз}}$ – давление разряжения (вакуумметрическое давление) в подсосковой камере доильного стакана, Па; ρ – плотность молока, кг/м^3.

Числитель данного уравнения определяет мгновенные значения расхода потока молока через канал соска, а знаменатель представляет собой соответствующие значения скорости этого потока. Значения коэффициента расхода могут быть приняты равными значениям для соответствующих насадков [14]. Расход молока линейно связан со средней скоростью молокоотдачи и рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{ск ср}} = \frac{M_{\text{ср}}}{60n\rho\sigma_{\text{с}}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{ср}}$ – средняя скорость молокоотдачи, кг/мин; n – количество доящихся долей вымени, шт.; $\sigma_{\text{с}}$ – относительная длительность такта сосания, которая показывает, какую долю он занимает в общем времени цикла.

и остается на уровне, близком к порогу отключения аппарата, вплоть до интенсивного припуска, когда молоко, благодаря действию окситоцина, выделяется из альвеол и по каналам и протокам поступает в цистерны вымени и соска. В период низкого потока молока вымя подвергается негативному воздействию вакуума. Особенно страдают доли с меньшей продуктивностью, соски которых подвергаются так называемому сухому доению, которое является одной из главных причин мастита. Сухое доение приводит к тому, что вакуумметрическое давление распространяется внутрь соска, в результате остатки молока из подсосковой камеры через сфинктер в такте сжатия возвращаются в цистерну соска, что обусловливает раздражение вымени, приводит к замедлению физиологически обусловленной скорости доения, а также увеличивает риск обсеменения болезнетворной микрофлорой внутренних поверхностей соска и вымени [17].

При этом аппарат может отключиться в середине процесса доения в случае, если поток молока упадет ниже установленного порога, который обычно выбирается в пределах 200…450 мл/мин. Такое явление вынуждает неопытного оператора переключать аппарат в режим ручного снятия, что неизбежно приводит к «сухому» доению еще и в конце процесса. Ожидаемой реакцией менеджмента фермы является необоснованное уменьшение установленного значения порога отключения доильного аппарата, что также приводит к «сухому» доению, отечности, травмированию тканей и слизистой оболочки сфинктера соска. В результате возникновения микротравм повышается вероятность бактериального обсеменения и заражения возбудителями мастита. При травмировании тканей увеличивается риск формирования соскового кератоза. Нормальной реакцией на травму слизистой оболочки является выделение аминокислоты цистеин, которая выступает «строительным материалом» для кератина. Образование ороговелостей на внешней поверхности сфинктера снижает его эластичность, что приводит к постоянному болезненному нарушению целостности тканей, возникновению микротрещин, с последующим проникновением в них бактерий и веществ, вызывающих болезненные ощущения.

У коров с высокой скоростью молокоотдачи, напротив, скорость потока молока сразу после выдаивания цистернальной фракции продолжает увеличиваться. При интенсивном потоке молока пропускная способность тракта доильный стакан – молокопровод снижается вследствие потерь напора при прохождении молочных пробок, а также в результате взаимного влияния попарно работающих доильных чулков, которые при переходе от такта сосания к такту сжатия снижают, а при переходе от такта сжатия к такту сосания локально увеличивают вакуумметрическое давление. В совокупности данных факторов возникает торможение потока молока, а в некоторых случаях возможен его возврат из коллектора в подсосковую камеру. В результате возникает эффект «мокрого» доения, когда сосок омывается молоком и теряет необходимый контакт с внутренней поверхностью соскового чулка. Такое явление, в зависимости от конкретных условий протекания процесса, может привести к сползанию соскового чулка на кончик соска либо, наоборот, к избыточному его наползанию на сосок. В первом случае сосок не получает эффективного сжатия, а во втором – чулок пережимает сосок у основания в области венного кольца и препятствует нормальной молокоотдаче. В некоторых случаях «мокрое» доение может чередоваться с «сухим» в течение одной дойки. Все перечисленные факторы оказывают негативное влияние на восприятие животным процесса доения и способствуют формированию отрицательных рефлексов и этологических реакций.

Для решения указанных проблем современное оборудование имеет возможности настройки дифференцированных и динамически изменяемых параметров доения. Дифференцированная машинная стимуляция не включается в случае достижения установленного порога скорости молокоотдачи в заданный период времени, если же порог не достигнут, то стимуляция реализуется путем увеличения частоты пульсаций [18]. Динамическое изменение длительности рабочего такта (динамическая пульсация) в зависимости от потока молока обеспечивает увеличение длительности такта сосания при повышении скорости молокоотдачи и обратное его уменьшение при снижении потока молока. При этом длительность такта отдыха (сжатия) остается неизменной [19]. Схематическое отображение пульсации при описываемых режимах работы показано на рис. 5.

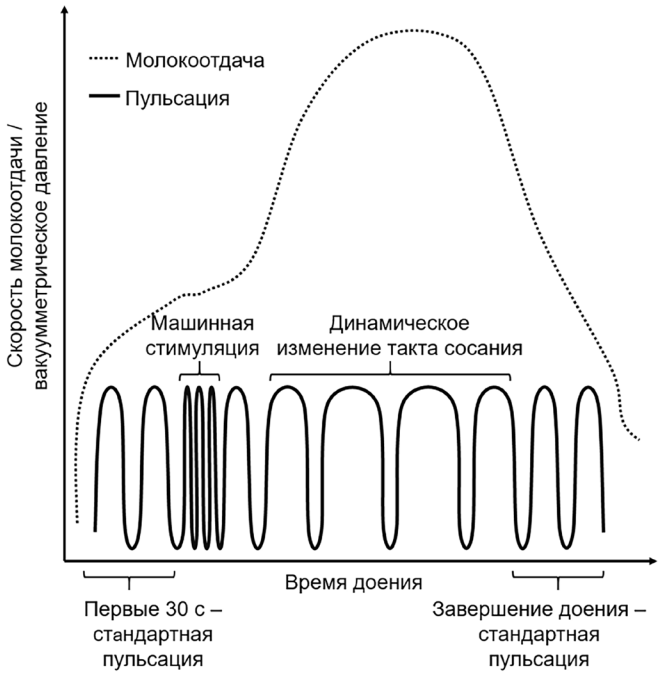

Рис. 5. График пульсации при дифференцированной машинной стимуляции и динамическом регулировании длительности тактов

Fig. 5. Graph of pulsation during differentiated machine stimulation and dynamic adjustment of pulsation duration

Временные интервалы, пороги выключения стимуляции, начала и остановки динамического изменения длительности такта сосания, а также длительность тактов в указанных режимах могут быть изменены через программу управления оборудованием [20].

Обоснование принципов выведения молока в процессе доения подтверждает гипотезу о том, что изменение соотношения и длительности тактов работы доильного стакана, в зависимости от скорости потока молока, позволит своевременно и эффективно стимулировать рефлекс молокоотдачи, интенсифицировать процесс молоковыведения и обеспечит максимальную физиологичность процесса доения. Результаты моделирования позволили обосновать методику исследования влияния параметров стимуляции и пульсации на скорость молокоотдачи и продуктивность коров с использованием систем адаптивного управления доением.

Методика и результаты производственного исследования. Методика проведения научно-хозяйственного опыта предполагает изучение влияния дифференцированной стимуляции и дифференцированной динамической пульсации на молочную продуктивность. Исследование проводилось на фермах, оборудованных доильными залами отечественного производителя ОАО «Гомельагрокомплект» и итальянской компании Milkline, работающих на основе электронных систем управления SCR[1], которые позволяют применять дифференцированную стимуляцию и динамическую пульсацию, а также устанавливать необходимые пороги молокоотдачи и временные интервалы.

Исследования с доением в доильном зале проводились на фермах УО СПК «Путришки», СПК «Озеры Гродненского района» и других сельскохозяйственных предприятий Гродненской области. Эксперимент в УО СПК «Путришки» проводился методом периодов, который позволяет оценить влияние изучаемых параметров на одних и тех же животных, с использованием оценки достоверности полученных результатов на основе парных разниц [21]. Для проведения опыта формировалась опытная группа из 18 коров 90–110-го дня лактации, средние показатели продуктивности, скорости молокоотдачи и качества молока которых не отличались более чем на 5 % от средних значений животных той же фазы лактации в стаде. Кормление животных на про-

[1] MC 200. Модуль управления дойкой: руководство по эксплуатации: версия 4.5. SCR Engineers Ltd, 2007. 74 с.

тяжении всего эксперимента осуществлялось одинаковым рационом. При этом использовались корма из одних и тех же хранилищ. Животные опытной группы не подвергались нестандартным технологическим операциям, перегруппировкам и воздействию прочих стрессобразующих факторов. В процессе проведения опытов изменялись значения порогов отключения машинной стимуляции и остановки динамической пульсации. В первый опытный и контрольный периоды использовались значения порогов, выбранные производителем по умолчанию. Во втором периоде был снижен порог остановки динамического изменения такта сосания. В третьем периоде к сниженному порогу добавили увеличенный порог отключения дифференцированной машинной стимуляции. Схема опыта представлена в табл. 1.

Таблица 1. **Схема опыта по исследованию параметров стимуляции и динамической пульсации**

Table 1. **Experimental design for studying parameters of stimulation and dynamic pulsation**

Период	Значения порога отключения машинной стимуляции, г/мин	Пороги начала/остановки динамической пульсации, г/мин	Длительность периода, сут
Предварительный	1000	1200/7500	7
1. Опытный	1000	1200/7500	14
2. Опытный	1000	1200/**5500**	14
3. Опытный	**1200**	1200/**5500**	14
Контрольный	1000	1200/7500	7

Длительность периодов эксперимента не превышала двух недель, поскольку привыкание животных к новым параметрам машинного доения, измененных (без резких колебаний), происходит в течение двух – четырех доек, а эффект проявляется практически сразу после привыкания. Такой подход снижает влияние временного фактора и повышает точность эксперимента. Первые четыре дня каждого из опытных и контрольного периодов исключены из расчетов. Полученные в результате опытов данные проверялись на достоверность дифференциальным методом. Были приняты следующие условные обозначения уровня значимости: $*P \le 0{,}05$; $**P \le 0{,}01$; $***P \le 0{,}001$.

Исследуемые параметры получены с помощью оригинального алгоритма, согласно которому значения изменяемых порогов молокоотдачи определяются как произведение натурального логарифма среднесуточного удоя и эмпирического коэффициента[1]. Порог включения динамического изменения длительности такта сосания рассчитывается следующим образом:

$$Y_1 = \alpha_1 \ln(x); \qquad Y_3 = \alpha_3 \ln(x), \tag{5}$$

где Y_1 – значение скорости молокоотдачи, при котором начинают изменяться длительность и соотношение тактов, кг/мин; Y_3 – значение скорости молокоотдачи, при котором машинная стимуляция не включается, кг/мин; α_1, α_3 – эмпирически устанавливаемые коэффициенты; x – значение среднесуточного удоя на 1 корову по ферме, кг.

Порог остановки динамического изменения пульсации определяется из выражения

$$Y_2 = \alpha_2 \ln(x) + \beta, \tag{6}$$

где Y_2 – значение порога скорости молокоотдачи, при котором заканчивается изменение длительности и соотношения тактов и начинается обратное их изменение, кг/мин; α_2, β – эмпирически устанавливаемые коэффициенты.

Эмпирические коэффициенты разработанной математической модели определяются исходя из значений скорости молокоотдачи и продуктивности животных на конкретной ферме. Значения порогов определяются с помощью графиков логарифмических функций, которые позволяют не только выбрать значения параметров на текущий момент времени, но и корректировать их при изменении среднесуточного удоя и скорости молокоотдачи коров стада.

[1] Способ доения коровы: пат. BY 22301 / К. В. Король, Д. А. Григорьев, П. Ф. Богданович. Опубл. 30.12.2018.

Результаты измерения скорости молокоотдачи при различных значениях порогов дифференцированной динамической пульсации представлены в табл. 2.

Таблица 2. **Скорость молокоотдачи при различных значениях параметров**

Table 2. **Milk flow rate at different parameter values**

Период	Значения порога отключения машинной стимуляции, г/мин	Пороги начала / остановки динамической пульсации, г/мин	Средняя скорость молокоотдачи ($M \pm m$), кг/мин	Максимальная скорость молокоотдачи ($M \pm m$), кг/мин	Разница (максимальная средняя), кг/мин
1. Опытный	1000	1200/7500	2,27 ± 0,1220	4,09 ± 0,2877	1,82
2. Опытный	1000	1200/**5500**	2,59 ± 0,1217*	5,68 ± 0,2974***	3,09
3. Опытный	**1200**	1200/**5500**	2,75 ± 0,1215*	5,77 ± 0,2657**	3,02
Контрольный	1000	1200/7500	2,24 ± 0,1214	4,01 ± 0,2933	1,77

Анализ представленных данных позволяет говорить о значительном увеличении средней скорости молокоотдачи на 0,32 и 0,16 кг/мин соответственно при изменении порогов остановки динамического изменения такта сосания и отключения дифференцированной стимуляции.

Распределение показателей у опытных животных подтверждает благоприятное воздействие выбранных параметров на физиологию доения. Результаты использования разработанной методики выбора значений порогов дифференцированной динамической пульсации позволяют говорить о статистически достоверном увеличении среднесуточного удоя у исследуемых животных на 2,54 кг при применении измененного порога остановки динамического изменения такта сосания и на 0,62 кг при использовании измененного порога отключения дифференцированной стимуляции.

Исследование на роботизированной ферме проводилось в Учебно-исследовательском институте животноводства (LVAT), п. Гросс-Кройц, Германия, с использованием возможностей систем автоматического машинного доения Lely Astronaut A4. Научно-хозяйственный опыт проводился методом латинского квадрата 4 × 4 с дополнительным периодом по Лукасу, который не только позволяет исследовать влияние изучаемых параметров на одних и тех же животных, используя оценку достоверности полученных результатов на основе парных разниц (дифференциальный метод), но и исключить влияние прочих факторов на результаты исследования [22]. Схема опыта представлена в табл. 3.

Таблица 3. **Схема производственного опыта на роботизированной ферме**

Table 3. **Experimental design for a production trial on a robotic farm**

Период	Группа			
	I	II	III	IV
I	К	С	Д	С + Д
II	С	С + Д	К	Д
III	Д	К	С + Д	С
IV	С + Д	Д	С	К
Экстра	С + Д	Д	С	К

Примечание. К – контроль (стандартная пульсация по умолчанию); С – включена дифференцированная машинная стимуляция; Д – включена динамическая пульсация; С + Д – включены оба параметра.

Note. K – control (default standard pulsation); C – differentiated machine stimulation enabled; Д – dynamic pulsation enabled; C + Д – both parameters enabled.

Для опыта были сформированы 4 группы, каждая из которых состояла из 12 коров 90–130-го дня лактации. Условия проведения опыта были аналогичны условиям опытов на фермах с доильным залом. Длительность периодов эксперимента составляла 10 сут. Данные первых трех дней каждого из периодов исключены из расчетов. Результаты эксперимента по оценке влияния дифференцированной стимуляции и динамической пульсации на молочную продуктивность и скорость молокоотдачи коров представлены в табл. 4.

Таблица 4. **Среднесуточный удой и молокоотдача коров**

Table 4. **Average daily milk yield and milk flow rate of cows**

Период	Группа			
	I	II	III	IV
Среднесуточный удой (M ± m), кг				
I	31,39 ± 1,55	30,45 ± 1,50*	34,06 ± 1,63*	32,44 ± 1,56**
II	31,73 ± 1,56*	31,45 ± 1,51**	32,96 ± 1,63	32,10 ± 1,54*
III	32,45 ± 1,56**	29,82 ± 1,47	34,76 ± 1,67**	31,09 ± 1,53
IV	33,11 ± 1,59**	30,80 ± 1,46*	33,32 ± 1,64*	30,76 ± 1,52
Экстра	33,09 ± 1,59**	30,79 ± 1,46*	33,33 ± 1,64*	30,77 ± 1,52
Средняя скорость молокоотдачи (M ± m), кг/мин				
I	2,66 ± 0,12	2,75 ± 0,12*	3,14 ± 0,12*	3,10 ± 0,12**
II	2,79 ± 0,12*	3,07 ± 0,12**	2,79 ± 0,12	2,90 ± 0,11*
III	2,99 ± 0,12*	2,58 ± 0,11	3,32 ± 0,13**	2,81 ± 0,12*
IV	3,16 ± 0,12**	2,90 ± 0,11*	2,98 ± 0,13*	2,60 ± 0,12
Экстра	3,14 ± 0,11*	2,91 ± 0,12**	2,98 ± 0,12**	2,59 ± 0,11
Максимальная скорость молокоотдачи (M ± m), кг/мин				
I	3,99 ± 0,19	4,11 ± 0,18*	4,77 ± 0,19**	4,65 ± 0,17**
II	4,19 ± 0,19*	4,65 ± 0,17***	4,19 ± 0,20	4,50 ± 0,18**
III	4,63 ± 0,18***	3,91 ± 0,19	4,98 ± 0,19***	4,11 ± 0,18*
IV	4,75 ± 0,18***	4,54 ± 0,18**	4,38 ± 0,20*	3,91 ± 0,19
Экстра	4,74 ± 0,18**	4,54 ± 0,18***	4,47 ± 0,20*	3,90 ± 0,19

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод о достоверном увеличении среднесуточного удоя исследуемых животных при использовании дифференцированной машинной стимуляции на 0,84 кг, динамического изменения такта сосания на 0,90 кг, при использовании параметров одновременно на 1,83 кг, что относительно контрольных значений составляет 2,7; 2,9 и 5,9 % соответственно и выше суммы увеличения от двух параметров, включенных по отдельности на 0,3 п. п. Использование дифференцированной стимуляции повышает молокоотдачу на 0,22 и 0,27 кг/мин соответственно для средней и максимальной скорости, или на 8,3 и 6,8 % относительно контрольных значений. Средняя скорость молокоотдачи увеличилась на 1,5 п. п. по сравнению с максимальной. Использование динамического изменения такта позволило увеличить среднюю скорость молокоотдачи на 0,32 кг/мин, а максимальную – на 0,62 кг/мин, относительно контрольных значений – на 12,3 и 15,5 % соответственно.

Динамика изменения удоя в зависимости от параметров доения говорит о возможности получения своеобразного синергетического эффекта, когда одновременное использования двух из изучаемых параметров дает больший результат, чем сумма результатов их раздельного применения. Изменение скорости молокоотдачи такого эффекта не показало, поскольку имеет место влияние факторов морфологии вымени, а также рост гидравлического сопротивления молокоотводящих путей при увеличении скорости потока. Несмотря на это, относительное изменение скорости молокоотдачи выше, чем изменение удоя при всех комбинациях параметров, что свидетельствует о приоритетности данного фактора, который обеспечен улучшением физиологичности процесса молоковыведения [23].

Заключение. 1. Механико-информационная система доения коров рассматривается как объект модельно-ориентированной разработки, направленной на эффективное взаимодействие оператора с машиной и животным посредством цифровых инструментов управления процессом выведения молока, обеспечивающих адаптивность к физиологическим особенностям и этологическим реакциям животных. Этапы жизненного цикла механико-информационной системы реализуются по декомпозированной схеме в рамках итерационных циклов с последующим агрегированием в целостный и завершенный объект инжиниринга.

2. Принцип математического моделирования процесса молоковыведения сформулирован на основе теории механики жидкости с использованием стандартных математических функций для описания динамики молокоотдачи коровы. Приведенные уравнения позволяют определить поток

и объем молока, выдаиваемого за один цикл пульсации, а также устанавливают соотношение эффективной площади соскового канала со скоростью и расходом потока молока. Полученные результаты подтверждают приоритетность влияния на интенсивность молокоотдачи длительности и соотношения тактов по сравнению с величиной вакуумметрического давления.

3. Принцип моделирования и результаты анализа конкретных производственных ситуаций, возникающих в процессе доения коров с различными физиологическими особенностями молокоотдачи, этологическими реакциями и морфофункциональными свойствами молочной железы, а также в результате негативного влияния человеческого фактора на эффективность технологии, как в части исполнительной дисциплины, так и в части принятия операционных решений, показали, что наиболее эффективным инструментом адаптивного управления является изменение длительности соотношения тактов в процессе доения в зависимости от скорости молокоотдачи коровы.

4. Методика и результаты производственного исследования, проведенного с использованием возможностей систем адаптивного управления процессом доения, подтверждают справедливость гипотезы о возможности увеличения скорости молокоотдачи и повышения продуктивности коров за счет применения оригинальной методики выбора параметров дифференцированной стимуляции и динамической пульсации в зависимости от скорости молокоотдачи и продуктивности коров в стаде.

5. Разработанные методические принципы и модели направлены на создание адаптивного к индивидуальным физиологическим особенностям и этологическим реакциям животных оригинального алгоритма управления процессом доения, обеспечивающего повышение продуктивности коров и увеличение общей эффективности производства молока.

Список использованных источников

1. Dairy market review: emerging trends and outlook 2022 / Food a. Agriculture Organization of the UN. – Rome: FAO, 2023. – 10 p.

2. Обзор рынка молока и молочной продукции государств-членов Евразийского экономического союза за 2013–2017 гг. / Департамент агропром. политики Евраз. экон. комис. – М., 2018. – 150 с.

3. Global milking Machines Market Report (2021 to 2030) – featuring Fullwood, BouMatic Robotics and AMS-Galaxy USA among others [Electronic resource] // GlobeNewswire. – Mode of access: https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/12/07/2347222/28124/en/Global-Milking-Machines-Market-Report-2021-to-2030-Featuring-Fullwood-BouMatic-Robotics-and-AMS-Galaxy-USA-Among-Others.html. – Date of access: 14.12.2023.

4. Республиканский семинар-совещание о развитии животноводства [Электронный ресурс] // Официальный Интернет-портал Президента Республики Беларусь. – Режим доступа: https://president.gov.by/ru/events/respublikanskiy-seminar-soveshchanie-o-razvitii-zhivotnovodstva. – Дата доступа: 14.12.2023.

5. Хасанов, М. М. Научный инжиниринг – почему это так важно? / М. М. Хасанов. – СПб.: Газпромнефть, 2020. – 25 с.

6. Модельно-ориентированный инжиниринг физико-технических, информационных и интеллектуальных систем / С. Н. Гаричев [и др.] // Тр. МФТИ. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 149–161.

7. Баденко, В. Л. Модельно-ориентированный системный инжиниринг для строителей: основные понятия и принципы / В. Л. Баденко. – СПб.: С.-Петерб. политехн. ун-т, 2023. – 44 с.

8. Mein, G. A. Machine milking. Vol. 1 / G. A. Mein, D. J. Reinemann. – CreateSpace Independent Publ. Platform, 2015. – 174 p.

9. Григорьев, Д. А. Уравнение равновесного потока жидкости в системе сосок – доильный стакан / Д. А. Григорьев, А. М. Кравцов // Агропанорама. – 2023. – № 5 (159). – С. 2–6. https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-159-5-2-6

10. Моделирование процесса молоковыведения в системе сосок – доильный стакан / Д. А. Григорьев [и др.] // Агропанорама. – 2024. – № 1 (161). – С. 7–11. https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-161-1-7-11

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

12. Динамика изменения площади соскового канала в процессе доения / Д. А. Григорьев [и др.] // Агропанорама. – 2024. – № 3 (163). – С. 2–6. https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-163-3-2-6

13. Адаптивное доение в промышленной технологии производства молока / В. О. Китиков [и др.] // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 нояб. 2023 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск, 2023. – С. 39–44.

14. Пильгунов, В. Н. Особенности истечения жидкости через отверстия некруглой формы / В. Н. Пильгунов, К. Д. Ефремова // Гидравлика. –2023. – № 18. – С. 26–46.

15. Svennersten-Sjaunja, K. Efficient milking / K. Svennersten-Sjaunja. – DeLaval, 2001. – 57 p.

16. Григорьев, Д. А. Технология машинного доения коров на основе конвергентных принципов управления автоматизированными процессами / Д. А. Григорьев, К. В. Король. – Гродно: ГГАУ, 2017. – 215 с.

17. Король, К. В. Молочная продуктивность и молокоотдача коров при использовании дифференцированных динамических параметров доения / К. В. Король, Д. А. Григорьев // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. / Гродн. гос. аграр. ун-т. – Гродно, 2018. – Т. 41: Зоотехния. – С. 107–113.

18. Король, К. В. Морфофункциональные свойства вымени при дифференцированной динамической пульсации в процессе доения / К. В. Король, Д. А. Григорьев // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. / Гродн. гос. аграр. ун-т. – Гродно, 2017. – Т. 37: Зоотехния. – С. 113–119.

19. Король, К. В. Молочная продуктивность коров при дифференцированной динамической пульсации в процессе доения / К. В. Король, Д. А. Григорьев // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. / Гродн. гос. аграр. ун-т. – Гродно, 2017. – Т. 37: Зоотехния. – С. 106–112.

20. Король, К. В. Молочная продуктивность коров при различных параметрах динамического изменения длительности такта сосания / К. В. Король // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. / Гродн. гос. аграр. ун-т. – Гродно, 2016. – Т. 35: Зоотехния. – С. 72–78.

21. Овсянников, А. И. Основы опытного дела в животноводстве / А. И. Овсянников. – М.: Колос, 1976. – 303 с.

22. Гарькавый, Ф. Л. Селекция коров и машинное доение / Ф. Л. Гарькавый. – М.: Колос, 1974. – 160 с.

23. Григорьев, Д. А. Дифференцированное динамическое доение как фактор ветеринарного благополучия и продуктивности коров / Д. А. Григорьев, К. В. Король, В. С. Журко // Эколого-биологическое благополучие растительного и животного мира: материалы междунар. науч.-практ. конф., Благовещенск, 23 сент. 2020 г. / Дальневост. гос. аграр. ун-т; редкол.: А. В. Сепнчик [и др.]. – Благовещенск, 2020. – С. 84–85.

References

1. *Dairy market review: emerging trends and outlook 2022*. Rome, FAO, 2023. 10 p.

2. Eurasian Economic Commission. *Milk and dairy products market review of the member states of the Eurasian Economic Union for 2013–2017.* Moscow, 2018. 150 p. (in Russian).

3. Global milking Machines Market Report (2021 to 2030) – featuring Fullwood, BouMatic Robotics and AMS-Galaxy USA among others. *GlobeNewswire*. Available at: https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/12/07/2347222/28124/en/Global-Milking-Machines-Market-Report-2021-to-2030-Featuring-Fullwood-BouMatic-Robotics-and-AMS-Galaxy-USA-Among-Others.html (accessed 14.12.2023).

4. Republican seminar-meeting on the development of livestock breeding. *Official Internet Portal of the President of the Republic of Belarus*. Available at: https://president.gov.by/ru/events/respublikanskiy-seminar-soveshchanie-o-razvitii-zhivotnovodstva (accessed 14.12.2023) (in Russian).

5. Khasanov M. M. *Scientific engineering – why is it so important?* St. Petersburg, Gazpromneft' Publ., 2020. 25 p. (in Russian).

6. Garichev S. N., Gorbachev R. A., Davydenko E. V., Japarov B. A., Kondratiev V. V. Model-oriented engineering of physics and technology, information and intelligence systems. *Trudy MFTI = Proceedings of MIPT*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 149–161 (in Russian).

7. Badenko V. L. *Model-based systems engineering for builders: basic concepts and principles*. St. Petersburg, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 2023. 44 p. (in Russian).

8. Mein G. A., Reinemann D. J. *Machine milking. Volume 1*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 174 p. (in Russian).

9. Hryhoryeu D. A., Kravtsov A. M. Equation of equilibrium fluid flow in the teat-teat cup system. *Agropanorama*, 2023, no. 5 (159), pp. 2–6 (in Russian). https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-159-5-2-6

10. Hryhoryeu D. A., Kitsikau V. O., Avdoshka I. V., Karol K. V. Modeling of milk production process in teat – teat cup system. *Agropanorama*, 2024, no. 1 (161), pp. 7–11. https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-161-1-7-11

11. Al'tschul' A. D. *Hydraulic resistance.* 2nd ed. Moscow, Nedra Publ., 1982. 224 p. (in Russian).

12. Hryhoryeu D. A., Kitsikau V. O., Kravtsov A. M., Karol K. V. Dynamics of teat canal area change in the process of milking *Agropanorama*, 2024, no. 3 (163), pp. 2–6 (in Russian). https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-163-3-2-6

13. Kitsikau V. O., Hryhoryeu D. A., Karol K. V., Zhurko V. S. Adaptive milking in industrial milk production technology. *Tekhnicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologii v sel'skom khozyaistve: sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, 23–24 noyabrya* 2023 g. [Technical support of innovative technologies in agriculture: collection of scientific papers of the International scientific and practical conference, Minsk, November 23–24, 2023]. Minsk, 2023, pp. 39–44 (in Russian).

14. Pilgunov V. N., Efremova K. D. Features of fluid flow through non-circular holes. *Gidravlika* [Hydraulics], 2023, no. 18, pp. 26–46 (in Russian).

15. Svennersten-Sjaunja K. *Efficient milking*. DeLaval, 2001. 57 p.

16. Hryhoryeu D. A., Karol K. V. *Technology of machine milking of cows on the basis of convergent principles of control of automated processes.* Grodno, Grodno State Agrarian University, 2017. 215 p. (in Russian).

17. Karol K. V., Hryhoryeu D. A. Dairy productivity and milk yield of cows at the use of differentiated dynamic parameters of milking. *Sel'skoe khozyaistvo – problemy i perspektivy: sbornik nauchnykh trudov. T. 41. Zootekhniya* [Agriculture – problems and prospects: collection of scientific papers. Vol. 41. Zootechnics]. Grodno, 2018, pp. 107–113 (in Russian).

18. Karol K. V., Hryhoryeu D. A. Morphofunctional properties of the udder at the differentiated dynamic pulsation during the milking process. *Sel'skoe khozyaistvo – problemy i perspektivy: sbornik nauchnykh trudov. T. 37. Zootekhniya* [Agriculture – problems and prospects: collection of scientific papers. Vol. 37. Zootechnics]. Grodno, 2017, pp. 113–119 (in Russian).

19. Karol K. V., Hryhoryeu D. A. Milk productivity of cows with differentiated dynamic pulsation during milking. *Sel'skoe khozyaistvo – problemy i perspektivy: sbornik nauchnykh trudov. T. 37. Zootekhniya* [Agriculture – problems and prospects: collection of scientific papers. Vol. 37. Zootechnics]. Grodno, 2017, pp. 106–112 (in Russian).

20. Karol K. V. Milk productivity of cows with various parameters of dynamic change in sucking phase duration. *Sel'skoe khozyaistvo – problemy i perspektivy: sbornik nauchnykh trudov. T. 35. Zootekhniya* [Agriculture – problems and prospects: collection of scientific papers. Vol. 35. Zootechnics]. Grodno, 2016, pp. 72–78 (in Russian).

21. Ovsyannikov A. I. *Fundamentals of experimental work in animal husbandry.* Moscow, Kolos Publ., 1976. 303 p. (in Russian).

22. Gar'kavyi F. L. *Selection of cows and machine milking.* Moscow, Kolos Publ., 1974. 160 p. (in Russian).

23. Hryhoryeu D. A., Karol K. V., Zhurko V. S. Differentiated dynamic milking as a factor of veterinary well-being and productivity of cows. *Ekologo-biologicheskoe blagopoluchie rastitel'nogo i zhivotnogo mira: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Blagoveshchensk, 23 sentyabrya 2020 g.* [Ecological and biological well-being of flora and fauna: abstracts of the International scientific and practical conference, Blagoveshchensk, September 23, 2020]. Blagoveshchensk, 2020, pp. 84–85 (in Russian).

Информация об авторах

Григорьев Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий и механизации животноводства, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: agintec48@gmail.com

Китиков Вадим Олегович – доктор технических наук, профессор, директор Института жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kitsikau@mail.ru

Король Кирилл Викторович – инженер-технолог, ООО «Агроферма» (ул. Учинская, 6б, 141207, Пушкино, Московская область, Российская Федерация). E-mail: dairytec@yandex.by

Information about the authors

Dzmitry A. Hryhoryeu – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Technologies and Mechanization of Animal Husbandry, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: agintec48@gmail.com

Vadzim A. Kitsikau – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Housing and Communal Services of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Akademician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kitsikau@mail.ru

Kiril V. Karol – Process Engineer, LLC "Agroferma" (6б, Uchinskaya Str., 141207, Pushkino, Moscow Region, Russian Federation). E-mail: dairytec@yandex.by