

УДК 637. 116

А. Н. ЛЕОНОВ¹, В. О. КИТИКОВ²

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МАШИННОГО ДОЕНИЯ

¹Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Республика Беларусь, e-mail: kitikau@tut.by

²Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства,
Минск, Республика Беларусь

(Поступила в редакцию 14.11.2013)

Процесс машинного доения является ключевым процессом в технологии промышленного производства молока. Только в этом процессе происходит непосредственный механический контакт технологического оборудования с нежной плотью животного. Только на этой стадии становятся известными параметры конечной продукции – молочного сырья, которые наряду с общими затратами определяют коэффициент удельных затрат. Именно на стадии машинного доения без изменения общих затрат на производство молочного сырья и только за счет повышения его количества и качества, можно существенно снизить коэффициент удельных затрат.

В табл. 1 представлены основные параметры молочного сырья, полученные по базовой и модернизированной технологиям соответственно.

Таблица 1. Параметры молочного сырья

| Параметр | Технология | |
|------------------------------|------------|-------------------|
| | базовая | модернизированная |
| Удой, т/год | 4,70 | 5,65 |
| Жирность, % | 3,6 | 4,1 |
| Доля молока «экстра», % | 30 | 70 |
| Доля молока высшего сорта, % | 50 | 30 |
| Доля молока 1-го сорта, % | 20 | – |
| Доля маститных коров, % | 23 | 8 |

В работе [1] нами предложена формула для расчета коэффициента удельных затрат, равного отношению общих затрат на 1 т нормализованного продукта, учитывающего качественные и количественные параметры молока: удой (т/год), жирность молока (%), долю маститных коров в стаде (%), долю молока «экстра» и высшего сорта (%). Расчет, выполненный по предложенной методике, показывает, что даже без изменения общих технологических затрат на преддоильное содержание и само машинное доение, только за счет улучшения количественных и качественных показателей молочного сырья, удастся уменьшить коэффициент удельных затрат в 1,85 раза.

Таким образом, создание теории, направленной на существенное повышение эффективности машинного доения (бесстрессовое, комфортное и полное), является актуальной научно-технической задачей. Концептуальная модернизация процесса машинного доения в настоящее время стала возможна только благодаря новейшим достижениям в области молекулярной биологии, генетики, материаловедения и информационных управляющих систем. Эта проблема подробно рассмотрена нами в работе [1].

Цель работы – разработка теории машинного доения путем моделирования и оптимизации процесса, направленного на бесстрессовое, комфортное и полное выдаивание животных.

Разработка теории машинного доения осложняется тем, что и параметры, и факторы, характеризующие процесс, имеют принципиально различную природу (биохимические, физико-механические и технологические факторы). Для оценки эффективности машинного доения в данной работе предложены 3 параметра, характеризующие количество и качество молочного сырья, здоровье животных и их комфортное состояние, а также коэффициент удельных затрат. Для управления процессом выбраны 3 фактора: давление разрежения в стабилизированном рабочем вакуумном контуре, время преддоильной стимуляции и температура преддоильного содержания животных. Необходимо отметить, что в настоящее время не существует детерминированной теории, позволяющей установить взаимосвязь принятых параметров и факторов, концептуально различающихся по своей природе.

В этом контексте разработка теории машинного доения находится в области стохастического моделирования, поскольку параметры оптимизации носят статистически случайный характер, а варьируемые факторы имеют принципиально различную природу [2].

Параметры оптимизации подробно рассмотрены нами в работе [1], поэтому кратко прокомментируем их выбор.

Параметр Y_1 – электропроводимость молока (См/м), характеризует не только качество конечного продукта (чем выше жирность молока, тем ниже электропроводимость), но и состояние здоровья основного «технологического объекта» – коровы (чем лучше здоровье коровы, тем ниже содержание соматических клеток и, следовательно, ниже электропроводимость молока). Молоко приемлемого качества должно иметь $Y_2 \leq 0,85$ См/м. Параметр Y_1 , имеющий электрическую природу, легко передается в компьютер.

Параметр Y_2 – скорость молокоотдачи, определяется как отношение массы молока, полученного при доении, ко времени доения (кг/мин). Время доения отсчитывается от момента подключения коровы к стабилизированному рабочему вакуумному контуру до момента, когда скорость молокоотдачи будет равна 0,2 кг/мин. Этот параметр характеризует степень синхронизации времени машинного доения со временем биохимического действия гормона окситоцина. Скорость доения для коров черно-пестрой породы зависит от их физиологического состояния, индивидуальных особенностей и лактационного периода. Оптимальная величина скорости находится в диапазоне 1,5–2,5 л/мин [3]. Таким образом, при разовом удое молока 8 кг со средней скоростью молокоотдачи 2 кг/мин время активного доения должно составлять ≈ 4 мин. Следует отметить, что Y_2 так же, как и Y_1 , легко преобразуется в электрический сигнал для передачи в компьютер.

Параметр Y_3 – удой молока (кг/сут), количественно характеризует полноту выдаивания, которая зависит от лактационного периода, физиологического состояния и индивидуальных особенностей животных, от времени суток, эффективности кормления и других условий преддоильного содержания. Полное выдаивание – залог повышенной жирности молока и стимул к дальнейшей активации процесса лактации.

Суточный удой Y_3 в значительной степени зависит от лактационного периода, и математически описывается формулой Вуда [4], которая приведена ниже в форме, несколько видоизмененной авторами:

$$y(t) = a \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^b \cdot e^{-\frac{t}{t_0}}, \quad (1)$$

где $y(t)$ – удой в процессе лактации, кг/сут; t – время, отсчет которого происходит с момента отела, сут; a – параметр, равный для выбранной группы коров 63,57 кг/сут; b – параметр кривой лактации, равный для выбранной группы коров 0,3833; t_0 – время релаксации процесса лактации, равное для выбранной группы коров 140,9 сут.

Эксперимент проводили в период между 46-м и 50-м днями после отела, что соответствует максимуму на лактационной кривой, равной 30,0 кг/сут.

Все три параметра (Y_1 , Y_2 , Y_3) зависят от целого ряда факторов, характеризующих стереотип машинного доения и имеющих, как было показано выше, принципиально различную природу. Поэтому при создании теории машинного доения важной задачей является обоснованный выбор факторов, существенно влияющих на процесс молокоотдачи и здоровье животных.

Варьируемые факторы. X_1 – давление разрежения в стабилизированном рабочем вакуумном контуре (кПа):

$$X_1 = p_0 - p, \quad (2)$$

где p_0 – атмосферное давление, $p_0 = 101,3$ кПа; p – давление в стабилизированном рабочем вакуумном контуре, кПа.

Известно, что для обеспечения бесстрессового комфортного машинного доения для черно-пестрой породы животных, молочная продуктивность которых в среднем составляет 4,7 т/год, давление разрежения, поддерживаемое с точностью $\pm 0,3$ кПа, целесообразно изменять в интервале 42–47 кПа [5]. Это стало возможным благодаря разработке и созданию стабилизированного рабочего вакуумного контура [6], в котором существенное повышение стабильности давления в контуре достигается за счет новых принципов проектирования, таких как симметричность, закольцованность, автономность каждого доильного места, полноконтурный децентрализованный параметрический контроль давления и наличие информационной управляющей системы.

X_2 – время преддоильной стимуляции коровы (с), состоит из двух отрезков времени – времени тактильной стимуляции (20 с) и времени ожидания припуска молока (20–40 с), выдерживаемое с точностью ± 2 с. Известно, что выделение окситоцина в кровь осуществляется через ≈ 60 с после начала тактильной стимуляции. Время тактильной стимуляции включает массаж и дезинфекцию вымени и сосков, ручное сдаивание первых струек молока. После окончания времени припуска необходимо сразу же начинать процесс машинного доения (надевание доильных стаканов и подключение их к рабочему вакуумному контуру).

X_3 – среднесуточная температура преддоильного содержания коров. Это температура, при которой происходит синтез молока в организме животных. Следует отметить, что это единственный фактор, который характеризует условия преддоильного содержания и который при стандартном регламенте кормления существенно влияет на молочную продуктивность. Существенное изменение температуры как при охлаждении, так и при нагревании внешней среды, приводит к стрессу и снижению продуктивности. Среднюю температуру в коровнике определяли по показаниям трех ртутных термометров, установленных на высоте 1 м (два – по торцам экспериментального бокса, один – в центре). Интервал варьирования фактора X_3 – от 0 до 20 °С, погрешность $\pm 0,5$ °С.

Методика и план эксперимента. Эксперимент для разработки теории машинного доения проводили на группе коров черно-пестрой породы. Для этого из стада с общим поголовьем 400 коров была отобрана группа из 10 гол. Животные имели одинаковые индивидуальные и физиологические параметры: четвертый лактационный период, отел 15 февраля, молочная продуктивность по результатам 3-го лактационного периода (307 дней) составляла 4,6 т/год (разброс менее 1 %), а жирность молока 3,6 %.

Эксперимент проводили на научно-исследовательской площадке Научно-технологического полигона «Зазерье». Все животные содержались в экспериментальном боксе беспривязно при свободном доступе к кормовому столу. Кормление и поение животных – вволю. Кормосмесь – полнорационная, состав ее определяли на основании стандартного регламента кормления [7]. Машинное доение осуществляли в отдельном доильном зале с количеством доильных мест 1×8 .

Экспериментальная группа состояла из 8 коров (2 коровы в резерве) с графиком доения $6^{00} - 14^{00} - 22^{00}$. Параметр, характеризующий здоровье вымени и качество молока (Y_1 – электропроводимость), определяли как среднее 24 дублей (8 коров при трехразовом доении); параметр, характеризующий скорость выдаивания (Y_2 – скорость молокоотдачи), определяли как среднее 24 дублей; параметр, характеризующий разовые и суточные удои (Y_3) – по 8 дублям. Кроме того, параметры, характеризующие количество и качество молока в автоматическом режиме, определяли в течение всего лактационного периода.

В таблице 2 приведены уровни варьирования факторов в натуральных (x) и нормированных (X) значениях [8]. В качестве плана эксперимента взят ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП) с числом факторов $k = 3$. Число опытов ОЦКП $N_k = 2^k + 1 + 2k$, величина

Таблица 2. Значения факторов и уровни их варьирования

| Значения факторов, $r = 1, 2, 3$ | Давление разряжения в рабочем вакуумном контуре (x_1), кПа | Время преддоильной стимуляции (x_2), с | Температура преддоильного содержания (x_3), °С |
|---|--|---|---|
| Нижняя звездная точка $X_r = -1,2154$ | 42,00 | 40,00 | 0,00 |
| Нижний уровень $X_r = -1$ | 42,44 | 41,77 | 1,77 |
| Основной уровень $X_r = 0$ | 44,50 | 50,0 | 10,00 |
| Верхний уровень $X_r = +1$ | 46,56 | 58,23 | 18,23 |
| Верхняя звездная точка $X_r = +1,2154$ | 47,00 | 60,00 | 20,00 |
| Интервал варьирования, Δx_r | 2,06 | 8,23 | 8,23 |
| Формулы перевода натуральных значений факторов в нормированные, и обратно | $\frac{44,50}{2,06}$ $x_1 = 44,50 + 2,06X_1$ | $X_2 = \frac{x_2 - 50,00}{8,23}$ $x_2 = 50,00 + 8,23X_2$ | $X_3 = \frac{x_3 - 10,00}{8,23}$ $x_3 = 10,00 + 8,23X_3$ |

звездного плеча $\alpha_k = \sqrt{\frac{2^k \cdot N_k - 2^k}{2}}$, ортогонализирующий фактор $\lambda_k = \sqrt{\frac{2^k}{N_k}}$. Для $k = 3$ получаем $N_k = 15$, $\alpha_3 = 1,2154$, $\lambda_3 = 0,7303$. В табл. 2 также приведены наименование факторов, их размерность и уровни варьирования. Число дублей в каждом опыте $n = 3$.

В табл. 3 приведены план эксперимента и экспериментальные данные, полученные при исследовании процесса машинного доения.

В результате обработки экспериментальных данных построены уравнения регрессии:

$$Y_1 = 0,421 - 0,026X_1 - 0,019X_2 + 0,027X_1X_2 + 0,056X_1^2 - 0,018X_2^2 + 0,097X_3^2, \text{ См/м}, \quad (3)$$

$$Y_2 = 2,200 - 0,058X_1 - 0,041X_2 + 0,047X_1X_2 + 0,176X_1^2 - 0,135X_2^2 + 0,318X_3^2, \text{ кг/мин}, \quad (4)$$

$$Y_3 = 30,08 - 0,548X_1 - 0,397X_2 + 0,563X_1X_2 + 1,179X_1^2 - 0,03X_2^2 + 2,045X_3^2, \text{ кг/сут}, \quad (5)$$

отражающие зависимость параметров от выбранных факторов. Ниже приведены формулы, по которым рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии, их доверительные интервалы, дисперсии воспроизводимости и адекватности и их степени свободы, критерии Стьюдента (t), Фишера (F) и Кохрена (G).

Таблица 3. План эксперимента и экспериментальные данные

| N | X_1 | X_2 | X_3 | x_1 | x_2 | x_3 | \bar{y}_j | s_{1j}^2 | \bar{y}_2 | s_{2j}^2 | \bar{y}_3 | s_{3j}^2 |
|-----|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 42,4 | 41,8 | 1,8 | 0,742 | 0,0020 | 1,37 | 0,0045 | 24,1 | 0,212 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 46,6 | 41,8 | 1,8 | 0,586 | 0,0008 | 1,65 | 0,0038 | 27,4 | 0,273 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 42,4 | 58,2 | 1,8 | 0,614 | 0,0016 | 1,59 | 0,0021 | 26,8 | 1,407 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 46,6 | 58,2 | 1,8 | 0,574 | 0,0028 | 1,68 | 0,0015 | 27,6 | 2,854 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 42,4 | 41,8 | 18,2 | 0,6745 | 0,0058 | 1,48 | 0,0045 | 25,5 | 0,736 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 46,6 | 41,8 | 18,2 | 0,598 | 0,0043 | 1,62 | 0,0215 | 27,1 | 0,534 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 42,4 | 58,2 | 18,2 | 0,601 | 0,0015 | 1,625 | 0,0127 | 27,0 | 0,340 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 46,6 | 58,2 | 18,2 | 0,625 | 0,0003 | 1,578 | 0,0063 | 26,6 | 0,210 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 44,5 | 50,0 | 10,0 | 0,460 | 0,0055 | 2,20 | 0,0068 | 30,0 | 0,150 |
| 10 | -1,215 | 0 | 0 | 42,0 | 50,0 | 10,0 | 0,506 | 0,0014 | 1,87 | 0,0093 | 29,1 | 1,368 |
| 11 | 1,215 | 0 | 0 | 47,0 | 50,0 | 10,0 | 0,476 | 0,0002 | 2,01 | 0,0016 | 29,7 | 0,398 |
| 12 | 0 | -1,215 | 0 | 44,5 | 40,0 | 10,0 | 0,487 | 0,0018 | 1,95 | 0,0020 | 29,5 | 0,129 |
| 13 | 0 | 1,215 | 0 | 44,5 | 60,0 | 10,0 | 0,470 | 0,0009 | 2,05 | 0,0159 | 29,8 | 1,634 |
| 14 | 0 | 0 | -1,215 | 44,5 | 50,0 | 0,0 | 0,552 | 0,0013 | 1,73 | 0,0206 | 28,1 | 2,371 |
| 15 | 0 | 0 | 1,215 | 44,5 | 50,0 | 20,0 | 0,552 | 0,0009 | 1,73 | 0,0032 | 28,1 | 0,479 |

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} X_{0j} \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^{N_k} X_{0j}^2} - \lambda_3 \sum_{r=1}^k b_{rr}; \quad b_r = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} X_{rj} \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^{N_k} X_{rj}^2}; \quad b_{rs} = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} X_{rj} X_{sj} \bar{Y}_j}{\sum_{\substack{j=1 \\ r < s}}^{N_k} (X_{rj} X_{sj})^2}; \quad b_{rr} = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} (X_{rj}^2 - \lambda_3) \bar{Y}_j}{\sum_{\substack{j=1 \\ r < s}}^{N_k} (X_{rj}^2 - \lambda_3)^2};$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} S_j^2}{N_k}; \quad f_{\text{воспр}} = N_k(n-1); \quad S_{\text{ад}}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^{N_k} (Y_j^p - \bar{Y}_j)}{N_k - B}; \quad f_{\text{ад}} = N_k - B;$$

$$S^2(b_0) = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{n \cdot \sum_{j=1}^{N_k} X_{0j}^2} + \lambda_3^2 \sum_{r=1}^k S^2(b_{rr}); \quad S^2(b_r) = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{n \cdot \sum_{j=1}^{N_k} X_{rj}^2}; \quad S^2(b_r) = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{n \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ r < s}}^{N_k} (X_{rj} X_{sj})^2};$$

$$S^2(b_r) = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{n \cdot \sum_{j=1}^{N_k} (X_{rj}^2 - \lambda_3)^2}; \quad \Delta b_r = t_{N_k(n-1); 0,95} \cdot S(b_r);$$

$$F_3 = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2}, \quad F_{\text{табл}} = F_{N_k - B; N_k(n-1)}^{0,45}, \quad \text{так как } S_{\text{ад}}^2 > S_{\text{воспр}}^2;$$

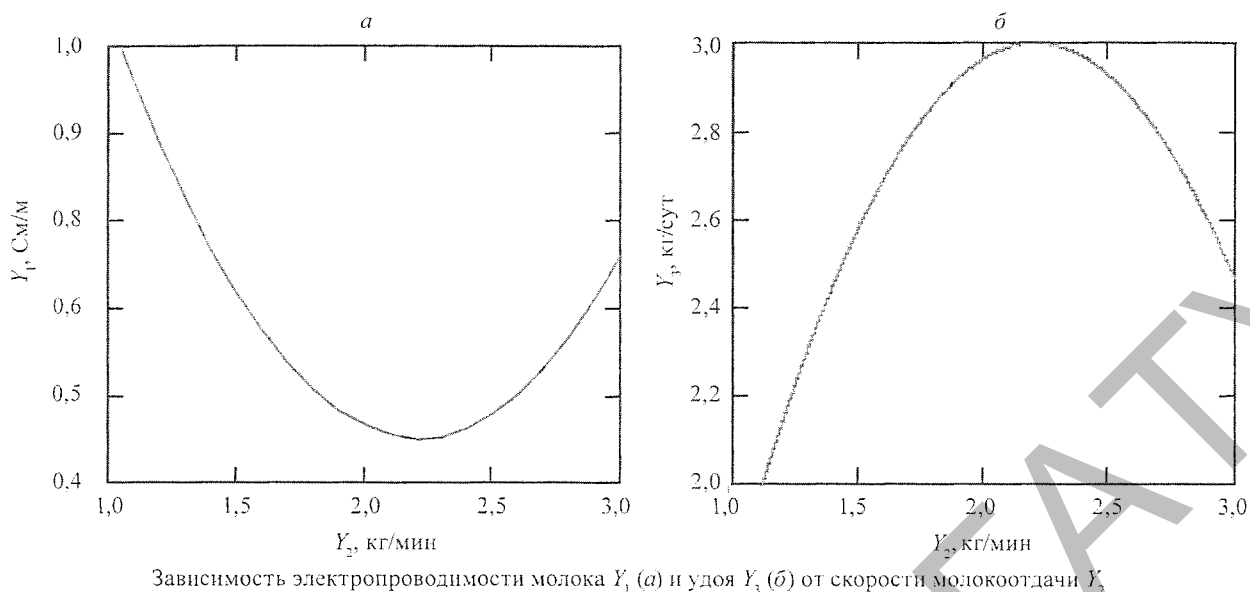
$$G_3 = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^{N_k} S_j^2}; \quad G_{\text{табл}} = G_{n-1; N_k; 0,95}.$$

В уравнениях (3)–(5) оставлены только значимые коэффициенты регрессии, для которых выполнен критерий Стьюдента ($\Delta b_r < |b_r|$). Все три уравнения адекватны по критерию Фишера, так как $F_3 < F_{\text{табл}}$. Все выборочные дисперсии однородны по критерию Кохрена, так как $G_3 < G_{\text{табл}}$. Параметры, необходимые для проверки полученных уравнений регрессии на статистическое качество, приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты статистической обработки экспериментальных данных

| Параметр | $t_{30; 0,95}$ | Δb_0 | Δb_1 | Δb_{22} | Δb_{33} | $S_{\text{воспр}}^2$ | $f_{\text{воспр}}$ | $S_{\text{ад}}^2$ | $f_{\text{ад}}$ | F_3 | $F_{3; 30}$ | G_3 | $G_{2; 15}$ |
|----------|----------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------------|-------|-------------|-------|-------------|
| Y_1 | 2,042 | 0,035 | 0,016 | 0,019 | 0,026 | 0,00207 | 30 | 0,00283 | 8 | 1,365 | 2,334 | 0,188 | 0,335 |
| Y_2 | 2,042 | 0,068 | 0,031 | 0,037 | 0,050 | 0,00775 | 30 | 0,0119 | 8 | 1,534 | 2,334 | 0,185 | 0,335 |
| Y_3 | 2,042 | 0,73 | 0,33 | 0,39 | 0,53 | 0,873 | 30 | 1,731 | 8 | 1,983 | 2,334 | 0,218 | 0,335 |

Так как все три полученных уравнения регрессии (3)–(5) адекватны, то проведение процедуры оптимизации – корректно. В качестве целевой функции выбрано условие $Y_1 \rightarrow \min$, при $2,0 \leq Y_2 \leq 2,2$ кг/мин, $Y_3 \geq 30$ кг/сут, что позволяет на практике реализовать режим физиологически щадящего машинного доения (низкая концентрация соматических клеток и полное выдаивание, стимулирующее увеличение лактации), а также высокое количество и качество молочного сырья (максимально возможный удой и максимально возможная жирность, которая в значительной степени определяется последними порциями молока) [1]. Анализ полученных уравнений позволяет сделать вывод о том, что полное и эффективное выдаивание группы коров черно-пестрой породы в период 46–50 дней после отела позволяет получить молоко, которое характеризуется минимумом параметра электропроводности $Y_1 = 0,46$ См/м. Оптимальные значения факторов, обеспечивающие минимум Y_1 , равны $X_1 = 44,9$ кПа; $X_2 = 51,2$ с; $X_3 = 9,8$ °С, при этом скорость молокоотдачи и суточный удой составили $Y_2 = 2,2$ кг/мин, $Y_3 = 30,9$ кг/сут соответственно. Средняя продуктивность коров выбранной группы за весь лактационный период (307 сут) составила 5,65 т/год.



На рисунке приведены корреляционные зависимости, полученные на основе уравнений (3)–(5), отражающие зависимость качества молочного сырья и здоровья животных Y_1 , а также количество молочного сырья Y_3 от скорости молокоотдачи Y_2 . Хорошо видно, что минимум Y_1 и максимум Y_3 достигаются при скорости молокоотдачи $Y_2 = 2,2$ кг/мин, обеспечивающей время разового доения $10,0 \text{ кг} / 2,2 \text{ кг/мин} \approx 4,5$ мин, что совпадает со временем активного действия гормона окситоцина, «выжимающего» молоко из альвеол в протоки и цистерну вымени [3].

В табл. 5 приведены данные оптимизации процесса машинного доения при различных температурах преддоильного содержания животных во время их кормления и отдыха, при которой происходит синтез молока в молочной железе. Следует обратить внимание, что при низких и высоких температурах суточный удой несколько падает, но и при этих условиях оптимизация процесса машинного доения, математически описываемая уравнениями (3)–(5), позволяет определить оптимальные значения факторов x_1 и x_2 , обеспечивающих максимально возможный суточный удой Y_3 и максимально возможное качество молочного сырья Y_1 за счет синхронизации времени доения и времени активного действия гормона окситоцина в организме животных. Напомним, что по существующим нормам, принятым в Республике Беларусь, молочное сырье считается хорошего качества («экстра», высший и первый сорт), если $Y_1 \leq 0,85$ См/м [9].

По модернизированной технологии были получены следующие результаты: удой 5,65 т/год, жирность – 4,1 %, доля маститных коров – 8 %, сортность молока 70–30–0 % («экстра», высший, первый сорт соответственно). Для сравнения: аналогичные параметры, полученные по базовой технологии, составили (см. табл. 1): удой – 4,7 т/год, жирность – 3,6 %, доля маститных коров – 23 %, сортность молока 30–50–20 % («экстра», высший, первый сорт соответственно). Расчет коэффициента удельных затрат, выполненный по предложенной методике, показал, что коэффициент удельных затрат модернизированной технологии по сравнению с базовой снижен в 1,85 раза, т. е. практически в 2 раза.

Таблица 5. Результаты оптимизации процесса машинного доения

| Температура преддоильного содержания, °С | Оптимальное значение фактора | | Значение параметра при $Y_1 = \min$ | | |
|--|------------------------------|-----------|-------------------------------------|----------------|----------------|
| | x_1 , кПа | x_2 , с | Y_1 , См/м | Y_3 , кг/мин | Y_3 , кг/сут |
| 0 | 43,1 | 45,9 | 0,66 | 1,50 | 25,7 |
| 5 | 44,9 | 51,3 | 0,47 | 2,10 | 29,9 |
| 10 | 44,8 | 51,0 | 0,46 | 2,21 | 30,0 |
| 15 | 44,7 | 50,7 | 0,47 | 2,09 | 29,9 |
| 20 | 44,6 | 50,4 | 0,54 | 1,74 | 28,2 |

Полученные экспериментальные данные, характеризующие эффективность машинного доения, хорошо подтверждают теоретические положения авторов о концептуальной модернизации машинного доения, подробно изложенные в работе [1].

Выводы

1. Разработана теория машинного доения, которая основана на новейших результатах в области молекулярной биологии, генетики, информационных управляющих систем, научно-технологических разработках (в первую очередь за счет создания стабилизированного рабочего вакуумного контура, позволяющего управлять давлением разрежения в диапазоне 42–47 кПа с точностью $\pm 0,3$ кПа), и создает предпосылки для проектирования доильного оборудования нового поколения, позволяющего реализовать режим физиологически щадящего комфортного машинного доения.

2. В результате исследований подтвержден тезис о том, что процесс машинного доения является ключевым процессом в технологии промышленного производства молока, так как позволяет даже без изменения общих технологических затрат на преддоильное содержание и само машинное доение, только за счет улучшения количественных и качественных показателей молочного сырья, существенно уменьшить коэффициент удельных затрат. На экспериментальной группе коров показано, что коэффициент удельных затрат модернизированной технологии снижен по сравнению с базовой в 1,85 раза.

3. Разработана математическая модель, в которой в качестве параметров оптимизации выбраны универсальные показатели, эффективно характеризующие сложную природу процесса машинного доения (животное–машина): параметр Y_1 – электропроводимость молока, характеризующий как качество молока (жирность, количество соматических клеток), так и здоровье животных (наличие даже субклинического мастита); параметр Y_2 – скорость молокоотдачи, позволяющий синхронизировать время машинного доения с временем активного действия гормона окситоцина в организме животного; Y_3 – суточный удой, который характеризует продуктивность животных. В качестве факторов, позволяющих управлять процессом машинного доения, выбраны 3 фактора: давление разрежения в стабилизированном рабочем вакуумном контуре X_1 , время преддоильной стимуляции X_2 и температура преддоильного содержания животных X_3 , концептуально различающихся по своей природе. Оптимизация полученной математической модели машинного доения позволяет определить значения управляющих факторов, обеспечивающих максимально возможное количество и качество молочного сырья при комфортном бесстрессовом машинном доении, что стимулирует увеличение продуктивного долголетия и снижение уровня заболеваемости маститом, вызванного жестким травмирующим режимом доения.

4. В результате исследований было установлено, что полное и эффективное выдаивание группы коров черно-пестрой породы в период 46–50 дней после отела, позволяет реализовать процесс, в котором при минимальном значении параметра электропроводимости $Y_1 = 0,46$ См/м, скорость молокоотдачи и суточный удой составили $Y_2 = 2,2$ кг/мин и $Y_3 = 30,9$ кг/сут соответственно. При этом оптимальные значения факторов, обеспечившие такой процесс, были равны $X_1 = 45$ кПа; $X_2 = 51$ с; $X_3 = 10$ °С. Средняя продуктивность коров выбранной группы за весь лактационный период (307 сут) за счет оптимизации режима машинного доения была увеличена от 4,70 до 5,65 т/год.

Тот факт, что при скорости молокоотдачи 2,2 кг/мин одновременно достигаются максимально возможные количественные и качественные параметры молока, является косвенным доказательством того, что при выбранной скорости доения удалось синхронизировать время процесса машинного доения со временем активного действия гормона окситоцина в организме животного. Такое совпадение обусловлено тем, что только при полном выдаивании животных, когда забираются последние порции альвеолярного молока, за исключением остаточного цистернального, удается получить и максимальную величину удоя (максимум Y_3), и максимальную величину жирности (минимум Y_1). При скорости доения 2,2 кг/мин и разовом удое 10 кг время доения со-

ставляет $\approx 4,5$ мин. Таким образом, можно предположить, что время активного действия гормона окситоцина, «отжимающего» альвеолярное молоко в цистерну вымени, также равно $\approx 4,5$ мин.

Литература

1. Китиков, В. О. Стратегическое направление развития машинного доения коров / В. О. Китиков, А. Н. Леонов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2013. – № 4. – С. 91–104.
2. Китиков, В. О. Базовые условия развития технологий молочного скотоводства с применением информационных управляющих систем / В. О. Китиков, А. Н. Леонов // Вес. ВНИИМЖ. – 2013. – № 3(11). Серия: Механизация, автоматизация и машинные технологии в животноводстве. – С. 52–58.
3. Оптимизация вакуумного режима доения коров / М. В. Барановский [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси: сб. науч. тр. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по животноводству. – Жодино, 2007. – Т. 42. – С. 440–445.
4. Франс, Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли; пер. с англ. А. С. Каменского. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.
5. Вакуумный режим доильных установок с молокопроводом / В. Н. Шулятьев [и др.] // Экология и сельскохозяйственная техника: материалы междунар. конф., 15–16 мая 2007 г. – Т. 3. – СПб., 2007. – С. 69–74.
6. Китиков, В. О. Метод обоснования эффективных стереотипов механизированного доения коров / В. О. Китиков // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Минск, 2010. – Вып. 44. – Т. 2. – С. 53–60.
7. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / А. П. Калашников [и др.]. – М., 2003. – 456 с.
8. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.
9. Технологический регламент ТР 2010/018/ВУ «Молоко и молочная продукция. Безопасность»: Пост. Совета Министров Республики Беларусь № 431 от 25.03.2010 // Нац. реестр прав. актов. – 2010. – № 271.

A. N. LEONOV, A. O. KITIKOV

OPTIMIZATION OF MACHINE MILKING PROCESS

Summary

Developed is the theory of machine milking allowing to upgrade machine milking in order to get maximum possible quantity and quality of milk and increase the productive longevity of animals.