

УДК 636.2.034: 637.116

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД РАННЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДОЙНЫХ КОРОВ

**В.О. Китиков,**

ведущий. науч. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,  
докт. техн. наук, доцент

*В статье приведены основные положения разработанного экспресс-метода раннего прогнозирования показателей продуктивности коров, который может быть использован для организации физиологически-щадящего процесса машинного доения.*

**Ключевые слова:** удой, лактационная модель, машинное доение.

*The article describes the main provisions of the method of forecasting cows' productivity, which can be used to establish the physiologically-sparing process of machine milking.*

**Keywords:** milk yield, lactation model, machine milking.

### Введение

Суточный удой на протяжении всего периода лактации, отчет которого начинается с момента отела, определяется физиологическим состоянием коровы [1, гл.1,2]. Прогнозирование суточных удоев и годовой производительности коров необходимо для оптимизации процесса машинного доения, так как нецелесообразно предъявлять одинаковые требования к доению коровы на пике лактации и, например, в период спада синтеза молока непосредственно перед ее запуском. Кроме того, прогнозирование удоев позволяет выявлять заболевания животных, нарушение режимов кормления и содержания путем сравнения молочной продуктивности конкретной коровы с усредненными характеристиками группы коров; осуществлять селекционную выбраковку коров из-за непригодности их к процессу машинного доения, что также достигается путем сравнения характеристик молочной продуктивности конкретной коровы с усредненными характеристиками группы коров. Исходя из этого, раннее прогнозирование протекания лактационного периода дойных коров является необходимым мероприятием для повышения эффективности процессов производства молока.

Анализ лактационной кривой (рис. 1) проведен для коров черно-пестрой породы, так как в Республике Беларусь они составляют более 80 % всего молочного поголовья. Максимальный период лактации животных

$y, \text{кг/сут/гол}$

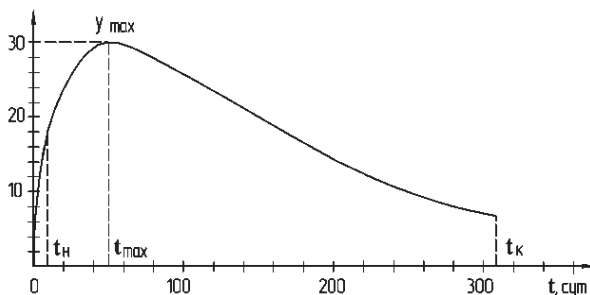


Рисунок 1. Характерный вид кривой лактации

составляет  $\approx 307$  дней и состоит из двух периодов: молозивного (7 дней после отела) и основного (300 дней). Молоко первого периода используется для выпойки телят. Основной период лактации состоит из периода роста удоев ( $\approx 50$  дней) и периода спада удоев, продолжительностью  $\approx 250$  дней. Заключительный этап годичного цикла – сухостойный период, продолжительность которого составляет  $\approx 60$  дней, вплоть до очередного отела [2].

Лучшей на сегодняшний день лактационной моделью, описывающей влияние физиологического состояния коров на их молочную продуктивность, является модель Вуда [3]:

$$y(t) = a \cdot t^b \cdot e^{-ct}, \quad (1)$$

где  $y(t)$  – суточный удой, кг/сут/гол;

$t$  – время, отчет которого происходит с момента отела, сут;

$a, b, c$  – феноменологические константы лактационной модели, размерность которых  $\text{кг/сут}^{(1+b)}/\text{гол}, 1, \text{сут}^{-1}$  соответственно.

Феноменологические константы  $a, b$  и  $c$  уравнения (1) в работе [3] рассчитывались с использованием данных характерных точек кривой лактации:  $y_{\text{max}}$  – максимальный удой;  $t_{\text{max}}$  – время достижения пика удоев; годовая продуктивность  $Y$ ; продолжительность лактационного периода  $t_k$  [4]. Модель Вуда с константами  $a, b$  и  $c$ , рассчитанными таким способом, проверялась на адекватность путем сравнения расчетных значений удоев с экспериментальными, но только после завершения всего периода лактации [5]. Экспериментальная проверка модели Вуда на 859 коровах фризской породы позволила Вуду сделать вывод о том, что его модель адекватно описывает лактационное поведение коров на протяжении всего лактационного периода.

Однако модель Вуда, получаемая только по завершению лактационного периода, достаточно проблематично использовать для прогнозирования лактационного поведения других коров. Большой спектр индивидуальных особенностей коров в стаде, таких,

как возраст, число предшествующих лактаций, сезон активного доения, годовая продуктивность, пригодность к машинному доению, стойкость иммунной системы, в первую очередь к заболеванию маститом, приводит к непредсказуемой погрешности прогнозирования суточных удоев по результатам прошлогодней модели. На практике достаточно сложно выбрать даже двух коров, обладающих одинаковыми параметрами по продуктивности, возрасту, физиологическому состоянию и индивидуальным особенностям. Если к этому добавить различие в условиях преддоильного содержания и кормления (в первую очередь, температура и качество кормов), которые существенно влияют на продуктивность животных, становится очевидным, что все перечисленные аргументы позволяют сделать вывод о том, что прошлогодняя лактационная модель лишена самого главного свойства – способности прогнозировать величину суточных удоев коров, которые до этого не тестировались.

Целью данной работы является разработка экспресс-метода построения лактационной модели для коров, не прошедших тестирование, за относительно небольшой начальный отрезок времени лактации (не более 20 дней), для прогнозирования лактационного поведения животных с погрешностью, не превышающей 5 %.

#### Основная часть

Для наделения модели Вуда прогнозирующей функцией, в работе [6, с. 20-21] был разработан экспресс-метод расчета феноменологических констант. *Первая особенность метода:* уравнение Вуда используется в несколько измененном виде:

$$y(t) = m_0 \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{b_0} \cdot e^{-\frac{t}{t_0}}, \quad (2)$$

где  $y(t)$  – средний суточный удой, кг/сут/гол;  
 $t$  – время, отсчет которого происходит с момента отела, сут;

$m_0, b_0, t_0$  – феноменологические константы лактационной модели (уравнение (2)), размерность которых кг/сут/гол, 1, сут, соответственно.

Отметим, что размерность  $y(t)$  и  $m_0$  одна и та же, кг/сут/гол. Кроме того, оба множителя в правой части уравнения (2) безразмерные величины. Физический смысл времени релаксации  $t_0$  следующий: при  $t=t_0$  средний суточный удой составляет  $y(t_0) = m_0/e$ , максимальный удой равен  $y(t_{\max}) = m_0 \cdot \exp^{b_0 \ln(b_0/e)}$ .

*Вторая особенность метода:* моделирование процесса лактации производилось не для одной коровы, а для группы коров, состоящей из 24 особей. В качестве суточного удоя принята средняя величина. Это продиктовано желанием повысить точность прогнозирования, так как стандартное отклонение выборочного среднего в  $\sqrt{n}$  раз меньше стандартного отклонения случайной величины

$$S(\bar{Y}) = S(Y) / \sqrt{n}.$$

*Третья особенность метода:* для расчета феноменологических констант  $m_0, b_0, t_0$  были использованы данные по удоям только первых 20-ти дней основной лактации, а не всех 300 дней, как у Вуда. Выше было отмечено, что феноменологические константы  $m_0, b_0, t_0$  в значительной степени зависят от породы животных, количества предшествующих лактаций, сезонности, физиологического состояния, индивидуальных особенностей, состояния здоровья, особенностей содержания и кормления. Для того чтобы наделить модель Вуда прогнозирующей функцией для коров, только что пришедших в доильный зал после отела и о которых отсутствует предварительная информация, параметры  $m_0, b_0, t_0$  лактационной модели определялись по информации, полученной в первые 20 дней основного лактационного периода, и, что самое главное, именно для этой группы коров. В группу, состоящую из 24 коров, были отобраны животные одного возраста с датой отела  $\pm 2$  дня (отел 2-5 февраля), 2-го лактационного периода, с примерно одинаковой массой и продуктивностью. Эксперимент проводился на Научно-технологическом полигоне РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» (экспериментальная база в «Зазерье»).

Учитывая стохастическую природу молокообразования, количественные значения феноменологических констант модели Вуда определялись методами математической статистики. Для нахождения параметров  $m_0, b_0, t_0$  был использован метод линеаризации нелинейного уравнения. Логарифмическая форма уравнения (2) имеет следующий вид:

$$\ln y(t) = \ln m_0 + b_0 \ln \left(\frac{t}{t_0}\right) - \frac{t}{t_0}, \quad (3)$$

а после ввода новых обозначений:

$$Z(t) = c_0 + c_1 X_1 - c_2 X_2, \quad (4)$$

где  $Z(t) = \ln y(t)$ ;  $X_1 = \ln t$ ;  $X_2 = t$ ; параметры

$m_0, b_0, t_0$  равны:

$$m_0 = \exp(c_0 - c_1 \ln c_2); b_0 = c_1; t_0 = 1/c_2. \quad (5)$$

Средняя годовая продуктивность определялась по уравнению:

$$Y = m_0 \int_{t_n}^{t_k} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{b_0} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) dt, \quad (6)$$

где  $t_n, t_k$  – время начала и конца основного периода лактации, измеряемое со дня отела, сут; для данного эксперимента  $t_n = 8$  сут,  $t_k = 307$  сут. Средняя годовая продуктивность рассчитывалась в компьютерной программе MathCAD.

После определения фактических величин суточных удоев за период 8-20 дней после отела, методами математической статистики (компьютерная программа MS Excel) определялись параметры кривой лактации ( $c_0, c_1, c_2$ ), а затем по уравнению (5) рассчитывались

феноменологические константы  $m_0, b_0, t_0$ . В табл. 1 приведены значения рассчитанных констант с использованием различной базы данных.

Данные табл. 1 показывают, что феноменологические константы по мере увеличения объема базы данных уточняются по величине, приближаясь к своему равновесному значению, в течение 307 дней лактации.

**Таблица 1. Феноменологические константы  $m_0, b_0, t_0$  уравнения (2)**

| $t$ , сут  | $m_0$ , кг/сут/гол | $b_0$        | $t_0$ , 1/сут |
|------------|--------------------|--------------|---------------|
| 24         | 65,90              | 117,6        | 0,418         |
| 30         | 65,90              | 115,8        | 0,420         |
| 48         | 65,78              | 114,9        | 0,420         |
| 100        | 65,94              | 113,3        | 0,424         |
| 200        | 65,90              | 113,4        | 0,423         |
| <b>307</b> | <b>65,81</b>       | <b>113,7</b> | <b>0,422</b>  |

Затем по уравнению (2), в котором известны все феноменологические константы, рассчитывались суточные удои  $Y_{расч}$  на каждый день основного периода лактации, максимальный удой  $Y_{max}$  и время его достижения  $t_{max}$ , а по уравнению (6) рассчитывался прогноз по средней молочной продуктивности за весь основной период лактации  $Y_{расч}$ . Расчетные и экспериментальные данные в некоторых точках кривой лактации для выбранной группы коров черно-пестрой породы приведены в табл. 2. Экспериментально определенная средняя годовая продуктивность для выбранной группы коров равна 5660 кг/год/гол (это величина стала известной только в последний период лактации) с абсолютной погрешностью  $\pm 60$  кг/год/гол (1 %). В табл. 2 также приведена относительная ошибка расчетной средней годовой продуктивности от экспериментально определенной величины.

Обработка экспериментальных данных за 17 экспериментальных дней (24 дня после отела) позволяет

сделать прогноз, что пик суточного удоя будет 30,1 кг/день/гол и наступит он на 49-й день, в 307-й день удой составит 7,2 кг/сут, а годовая продуктивность – 5875 кг/год/гол. Обработка полного комплекта данных за все 300 дней основной лактации (307 дней после отела) дает следующие результаты: максимальный удой составил 30,0 кг/день на 48-й день, на 307-й день удой 6,7 кг/сут, а годовая продуктивность – 5649 кг/год/гол. Для сравнения приведены экспериментальные данные: пик суточного удоя 30,0 кг/день/гол наступил на 48-й день, в 307-й день удой составил 6,6 кг/сут, годовая продуктивность – 5661 кг/год/гол. Таким образом, прогнозирование годовой продуктивности по лактационной модели, феноменологические константы которой рассчитаны по результатам 17-ти дней основной лактации, выполнено с относительной погрешностью менее 5 %.

Следует отметить, что с каждым последующим днем полученная информация присоединяется к уже известной, и параметры модели количественно уточняются автоматически. Например, лактационная модель, построенная по результатам 23 дней основной лактации (30 дней со дня отела, табл. 2) позволяет прогнозировать годовой удой уже с погрешностью менее 1,2 %, а после пика удоев (48 дней после отела) погрешность прогнозирования годового удоя становится менее 1 %, что находится в пределах экспериментальной ошибки в определении годовой продуктивности коров.

Таким образом, отработав 24 дня в состоянии некоторой статистической неопределенности, в остальные 283 дня доение проходит при полном понимании потенциала конкретной группы коров, о параметрах которой ранее ничего не было известно. Причем прогнозирование дает параметры молочной продуктивности именно этой группы коров, с учетом их индивидуальных особенностей, сезонности, особенностей кормления и содержания. Аналогично собранная информация по другим группам коров позволяет сделать прогноз по молочной продуктивности дойного стада.

**Таблица 2. Прогнозируемые параметры математической модели Вуда**

| $t$ , сут  | Объем выборки | $Y_{эксп}$ , кг/сут/гол | $Y_{расч}$ , кг/сут/гол | $t_{max}$ , сут | $Y_{max}$ , кг/сут/гол | $Y_{расч}$ , кг/год/гол | $\frac{Y_{расч} - Y_{эксп}}{Y_{эксп}}$ , % |
|------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|--|
| 19         | 12            | 26,2                    | 26,1                    | 47              | 29,8                   | 5508                    | 2,7  |
| 21         | 14            | 26,9                    | 26,9                    | 55              | 30,9                   | 6442                    | 14,0                                       |
| 23         | 16            | 27,4                    | 27,5                    | 55              | 39,5                   | 6419                    | 13,4                                       |
| <b>24</b>  | <b>17</b>     | <b>27,5</b>             | <b>27,7</b>             | <b>49</b>       | <b>30,1</b>            | <b>5875</b>             | <b>3,8</b>                                 |
| 25         | 18            | 27,8                    | 27,9                    | 48              | 30,0                   | 5752                    | 1,6  |
| 26         | 19            | 28,2                    | 28,1                    | 50              | 30,3                   | 5938                    | 4,9  |
| 27         | 20            | 28,3                    | 28,3                    | 50              | 30,2                   | 5842                    | 3,2  |
| 28         | 21            | 28,6                    | 28,5                    | 51              | 30,3                   | 5951                    | 5,0  |
| 29         | 22            | 28,6                    | 28,7                    | 49              | 30,5                   | 5796                    | 2,4  |
| <b>30</b>  | <b>23</b>     | <b>28,8</b>             | <b>28,7</b>             | <b>49</b>       | <b>30,1</b>            | <b>5727</b>             | <b>1,2</b>                                 |
| <b>48</b>  | <b>41</b>     | <b>29,9</b>             | <b>30,0</b>             | <b>48</b>       | <b>30,0</b>            | <b>5717</b>             | <b>1,0</b>                                 |
| 100        | 93            | 25,7                    | 25,8                    | 48              | 30,0                   | 5645                    | 0,3  |
| 200        | 193           | 14,3                    | 14,4                    | 48              | 30,0                   | 5646                    | 0,3  |
| <b>307</b> | <b>300</b>    | <b>6,6</b>              | <b>6,7</b>              | <b>48</b>       | <b>30,0</b>            | <b>5649</b>             | <b>0,2</b>                                 |

### Заключение

1. Разработан метод раннего прогнозирования продуктивности коров на основе построения лактационной модели Вуда, коэффициенты которой рассчитываются за относительно небольшой начальный период лактации (20 дней), что позволяет рассчитывать показатель суточного удоя коров за весь период лактации, с относительной погрешностью не более 5 %.

Построенная модель в период 8 – 24 дней с каждым последующим днем статистически повышает свою достоверность за счет включения новых данных.

2. Прогнозирование молочной продуктивности конкретной группы коров, а также всего молочного стада позволяет планировать товарную массу молочного сырья, рассчитывать потребность в кормах, оптимизировать процесс машинного доения, выявлять заболевание отдельных особей, проводить селекционную выбраковку коров из-за непригодности их к процессу машинного доения путем сравнения характеристик молочной продуктивности конкретной коровы с усредненными характеристиками группы коров. Такой вид коррекции является математической реализацией обратной связи, при которой количественная информация, полученная на стадии машинного доения, позволяет корректировать параметры всего молочного производства, и с помощью информационных управляющих систем позволяет планиро-

вать и улучшить экономические показатели работы молочной фермы на год вперед.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорина, Э.П. Условные рефлексы и продуктивность животных / Э.П. Кокорина. – М.: Агропромиздат. – 1986. – 335 с.
2. Китиков, В.О. Применение математических моделей лактационных кривых для эффективного планирования валового производства молока / В.О. Китиков, Е.В. Тернов // Вест. Нац. акад. наук Беларуси: сер. аграрн. наук. – 2011. – № 1. – С. 68–73.
3. Wood P.D.P. Algebraic model of the lactation curve. – Nature, London, 1967. – № 216. – P. 164 – 165.
4. Wood P.D.P. Factors affecting the shape of lactation curve in cattle. – Animal Production, 1969. – № 11. – P. 307 – 316.
5. Wood P.D.P. A simple model of lactation curve for milk yield, food requirement and body weight – Animal Production, 1979. – № 28. – P. 55 – 63.
6. Китиков, В.О. Научные основы создания технологического оборудования и физиологически-щадящего процесса машинного доения коров: автореф... дис. докт. техн. наук: 05.20.01 / В.О. Китиков; БГАУ. – Минск, 2015. – 60 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 21.01.2017

## Радиоволновой влагомер зерна

**Предназначен** для непрерывного измерения влажности зерна в процессе сушки на зерносушильных комплексах.

Влагомер обеспечивает непрерывный контроль влажности зерна в потоке и обеспечивает автоматическую коррекцию результатов измерения при изменении температуры материала, имеет аналоговый выход 4-20 мА, а также интерфейс RS-485.



### Основные технические данные

Диапазон измерения влажности зерна  
Основная абсолютная погрешность  
Температура контролируемого материала  
Цена деления младшего разряда блока индикации  
Напряжение питания  
Потребляемая мощность

от 9 до 25%  
не более 0,5%  
от +5 до +65°C  
0,1%  
220 В 50Гц,  
30ВА