

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РЕПРОДУКТИВНОГО ЦИКЛА КОРОВ

Кузнецов В.М.

*Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
им. Н.В. Рудницкого, Киров, Российская Федерация*

Цель работы – создание алгоритма моделирования репродуктивного цикла коров (РЦ-модель) и проведение серии численных экспериментов в среде Microsoft Excel. Изучены изменения среднегодового темпа прироста/сокращения поголовья молочного стада (ΔY) при варьировании исходных данных – длительности периода инволюции матки (INV от 20 до 70 дней), числа сознательно пропускаемых эструсов (n_{est} от 0 до 5 эструсов), вероятности выявления эструса (EDR от 30 до 80%), и зачатия (CR от 40 до 90%). Увеличение INV на 10 дней приводило к снижению выхода телят (WT) на 3,3 п.п. (процентных пункта) и ΔY на 0,6 п.п. Сознательный пропуск одного эстрального цикла снижало WT и ΔY на 7,0 и 1,2 п.п. соответственно. Увеличение EDR или CR на 10 п.п. приводило к повышению WT на 4,9 и 3,9, ΔY – на 0,9 и 0,7 п.п. соответственно. Исследованы 36 вариантов при одновременном варьировании входных переменных с градациями: n_{est} – 0, 1, 2, 3 эструса; EDR – 30, 50, 70%; CR – 40, 60, 80%. Размах сервис-периода при этом составлял от 68 до 268 дней, межотельного интервала – от 11,6 до 18,2 мес., выхода телят – от 32 до 99%, темпа прироста/сокращения поголовья коров – от -2,6 до +10,9%/год. При принятии нижнего порога сервис-периода на уровне 120 дней, из 36 вариантов хозяйственно приемлемыми оказались 11 с минимальными значениями WT=81%, ΔY =8% в год. Показано, что при EDR=30% программа управления воспроизводством стада может быть эффективной только тогда, когда CR \geq 80% и коровы осеменяются в первый после инволюции матки эструс. Если в стаде EDR=50%, то программа воспроизводства будет эффективной, когда CR не ниже 60% и сознательно пропускается не более одного эструса. При EDR=70% программа воспроизводства может быть эффективной, если: (а) CR \geq 40% и коров осеменяют сразу после инволюции матки; (б) CR=60% и пропускается не более одного эструса; (в) CR \geq 80%, и пропускается не более двух эструсов. Разработанный алгоритм моделирования репродуктивного цикла коров предполагается использовать при разработке программ воспроизводства стада в молочном скотоводстве.

Ключевые слова: молочный скот, репродуктивный цикл, закрытое стадо, темп прироста поголовья, вычислительное моделирование, прогнозирование

Проблемы биологии продуктивных животных, 2019, 1: 50-65

Введение

Прибыли хозяйств и фермеров, разводящих, как молочные, так и мясные породы скота, зависят от успешной репродукции животных. Этот производственный процесс включает в себя систематическое наблюдение за коровами (тёлками) и искусственное осеменение (ручная или вольная случка быками) тех из них, у которых проявились признаки эструса (половой охоты). Реальные трудности состоят в том, что оплодотворение коров и получение телят до сих пор остаётся сложной задачей. В частности, эффективность выявления эструса у самок нередко составляет 34-59% (Чомаев, 2007; Решетникова и др., 2012а). За рубежом во многих стадах точность выявления эструса у коров менее 50-70% (Rogie et al., 2002; Dalton, 2011), коэффициент зачатия чуть выше 40% (Huang et al., 2009). Стельных коров после трёх осеменений получают в пределах 53-76% (Решетникова и др., 2012а). Эффективность выявления эструса и оплодотворения (с учётом продолжительности периода

добровольно-вынужденного ожидания) оказывает существенное влияние на продолжительность сервис-периода и выход телят и тем самым –на потенциал расширенного воспроизводства стада и, соответственно, на производство молока и говядины. Поэтому актуальным является вопрос: что надо предпринять, чтобы корова после отёла как можно быстрее вновь стала стельной? Другими словами, как повысить эффективность репродукции животных? Получить ответ на этот вопрос помогают исследования *in silico* (компьютерное вычислительное моделирование).

Ранее нами (Кузнецов, 2018) была разработана вычислительная модель разведения и воспроизводства стада (PBC-модель), с помощью которой было исследовано влияние на эффективность воспроизводства ряда зоотехнических параметров (ЗП), в частности: (а) уровень ежегодной браковки коров (CCOW), (б) продолжительность сервис-периода (DO), (в) возраст тёлочек при зачатии (AFH), (г) уровень мёртвоорождаемости (DOA), (д) выбраковка тёлочек до- (CH1) и старше года (CH2), (е) доля рождаемых тёлочек (PВH). PBC-модель была использована для анализа воспроизводства трёх стад и субпопуляций молочного скота Кировской, Ленинградской, Московской областей, популяции молочного скота РФ при их закрытом разведении. Было показано, что в реально существующем диапазоне зоотехнических параметров в Кировской области возможен прирост поголовья коров на 0,7% в год; в Ленинградской области – на 2,2% в год. По московской популяции и в целом по РФ был получен прогноз снижения поголовья коров с интенсивностью 2% в год. Если посредством целенаправленных зооветеринарных мероприятий во всех (суб)популяциях обеспечить снижение уровня выбраковки коров до 30%, сервис-периода – до 110 дней, возраста тёлочек при зачатии – до 16 мес., то среднегодовой темп прироста поголовья коров по прогнозу может составить 6-8%.

Цель данной работы – создание алгоритма численного моделирования репродуктивного цикла коров и проведение серии экспериментов *in silico* для изучения влияния комплекса био-зоотехнических параметров на репродуктивную эффективность и интенсивность расширенного воспроизводства молочного стада при его закрытом разведении.

Алгоритм моделирования репродуктивного цикла

После отёла в начавшемся новом репродуктивном цикле можно выделить период инволюции репродуктивных органов, период возможного сознательного пропуска эструса(-ов), период осеменения и период стельности, заканчивающийся рождением телёнка (рис. 1).

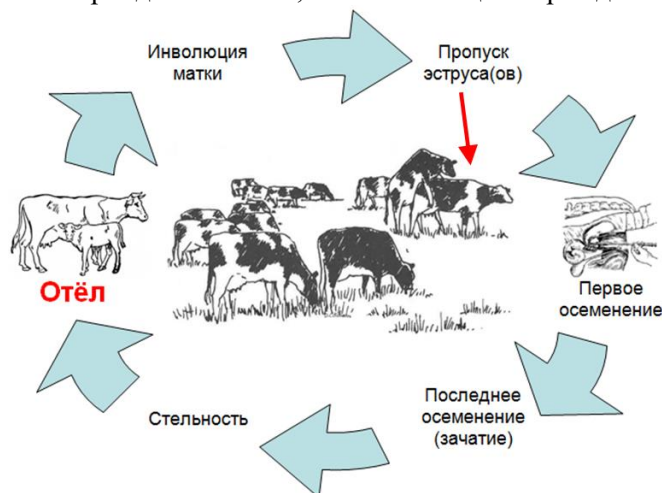


Рис. 1. Схема репродуктивного цикла

Период инволюции (INV) зависит от многих факторов. При нормальном физиологическом статусе инволюция репродуктивных органов завершается уже к концу первого месяца после отёла, после чего возобновляется циклическая активность яичников. Однако продолжительность инволюции матки у коров может варьировать от 18-25 до 40-50 дней. У высокопродуктивных молочных коров инволюция более продолжительная – 55-65 дней и увеличивается с ростом продуктивности (для приводимого ниже числового примера допусклось, что все показатели являются средними по стаду и $INV=30$ дней).

Период сознательного пропуска эструса (T_{est}) – это время от готовности матки к новой репродукции до первого осеменения. Здоровые коровы могут быть осеменены и в первый эстральный цикл, но он проявляется слабо, вероятность выявления низкая или вовсе нулевая. Было показано, что при визуальном наблюдении коров значения вероятности обнаружения эструса в первый, второй и третий эстральные циклы составляют 19, 37 и 79% (Firk et al., 2003). Поэтому практикуют пропуск первого эструса, а в племенных хозяйствах – 2-3 эструсов. Если стельность не наступила, то эструс регулярно повторяется в среднем через 21 день. Если пропускается n_{est} эстральных циклов, то период сознательного пропуска эструсов можно выразить соотношением (допускается, что $n_{est} = 2$):

$$T_{est} = 21 \times n_{est} = 21 \times 2 = 42 \text{ дня.}$$

Период сознательного пропуска эструсов вместе с периодом инволюции репродуктивных органов называют периодом добровольного ожидания (*VWP*), который рассчитывается по формуле:

$$VWP = INV + T_{est} = 30 + 42 = 72 \text{ дня.}$$

Поскольку продолжительность периода инволюции (*INV*) в большей степени зависит от состояния коровы, то, как представляется, *VWP* правильнее трактовать как период *добровольно-вынужденного ожидания*.

Период от отёла до первого осеменения (*DFS*) можно выразить формулой:

$$DFS = VWP + 21/2 = 72 + 10,5 = 82,5 \text{ дней,}$$

допуская, что осеменение будет приходиться на середину эстрального цикла коровы.

Период осеменения (Mating Period, MP) – это интервал от первого до плодотворного осеменения (оплодотворения, зачатия). Его можно определить, если известно число осеменений, необходимых для получения стельности (*SPP*). Последнее есть функция индекса (вероятности) выявления эструса (*EDR*) и индекса (вероятности) зачатия коровы (*CR*):

$$SPP = 1/(EDR \times CR).$$

При $EDR=0,7$ и $CR=0,5$

$$SPP = 1/(0,7 \times 0,5) = 2,86.$$

SPP – это период осеменения, выраженный в эстральных циклах, например, в днях:

$$MP = 21 \times SPP - 21/2 = 21 \times 2,86 - 21/2 = 49,6 \text{ дней,}$$

где $21/2$ – это $1/2$ эстрального цикла.

Сервис-период (DO) – период от отёла до плодотворного осеменения:

$$DO = DFS + MP = 82,5 + 49,6 = 132,1 \text{ дня.}$$

Период стельности (LP) величина относительно постоянная со средней продолжительностью 285 дней и коэффициентом вариации 2-4% (Завертяев, 1987).

Период между отёлами (CI) есть сумма продолжительности сервис-периода и продолжительности стельности, выраженная в месяцах ($30,4$ – среднее число дней в месяце):

$$CI = (DO + LP)/30,4 = (132,1 + 285)/30,4 = 13,7 \text{ мес.}$$

Выход телят (WT) – основной показатель эффективности репродуктивного цикла;

рассчитывается по формуле:

$$WT = ((365-DO)/LP) \times (1-DOA) = ((365-132,1)/285) \times (1-0,05) = 0,776 \text{ или } 77,6\%,$$

где DOA – уровень мёртворождаемости ($\approx 5\%$).

Представленный алгоритм модели репродуктивного цикла был использован для проведения эксперимента *in silico* в среде Microsoft Excel.

Входные *постоянные* параметры – продолжительность эстрального цикла – 21 день; продолжительность стельности – 285 дня; уровень мёртворождаемости – 5%. Входные переменные параметры – период инволюции матки (INV); число пропущенных эструсов (n_{est}); индекс выявления эструса (EDR); индекс зачатия (CR). Эти параметры изменялись и исследовалось их воздействие на выходные характеристики РЦ-модели. Так, для числового примера с $INV = 30$ дней, $n_{est} = 2$, $EDR = 70\%$ и $CR = 50\%$ репродуктивный цикл характеризовался следующими показателями:

- период добровольного ожидания – 72 дня;
- число дней до первого осеменения – 82 дня;
- индекс стельности (плодовитости) – 35%;
- число осеменений на стельность – 2,9;
- период осеменения – 49 дней;
- сервис-период – 132 дня;
- интервал между отёлами – 13,7 мес.;
- выход телят – 77,7%.

Эти расчётные показатели характеризуют эффективность репродукции стада коров. В частности, при принятых в числовом примере значения входных параметров расчётный сервис-период составил 132 дня, выход телят – 78 голов на 100 коров.

Входными варьируемыми параметрами РЦ-модели были:

- период инволюции матки (INV) – 30 с вариацией от 20 до 70 дней;
- число пропущенных эструсов (n_{est}) – 1 с вариацией от 0 до 5;
- индекс выявления эструса (EDR) – 50 с вариацией от 30 до 80%;
- индекс зачатия (CR) – 60 с вариацией от 40 до 90%.

При исследовании влияния одного фактора остальные три переменных параметра были постоянными (первые значения).

Для исследования влияния переменных параметров репродуктивного цикла на показатели воспроизводства молочного стада при его закрытом разведении, использовали модель разведения и воспроизводства стада – РВС-модель (Кузнецов, 2018). После прогона РЦ-модели один из основных расчётных показателей эффективности репродукции – сервис-период (DO), включался в РВС-модель в качестве входного параметра (рис. 2).

Такое совместное использование двух моделей позволяет исследовать не только влияние различных факторов на репродуктивно-воспроизводительную эффективность, но и применить многовариантный подход при разработке программы воспроизводства стада.

Входными параметрами РВС-модели были:

- размер стада – 1000 коров;
- выбраковка коров – 30% в год;
- возраст тёлочек при зачатии – 15 мес.;
- уровень мёртворождаемости – 5%;
- вероятность рождения тёлки – 50%;
- браковка тёлочек до года – 4%;
- браковка тёлочек старше года – 2%;
- горизонт «разведения» – 10 лет.

Влияние этих параметров (исключая первый и последний) на показатели воспроизводства стада было изучено ранее (Кузнецов, 2018). В настоящей работе они были фиксированными, переменным в РВС-модели был только сервис-период (DO), который рассчитывался в РЦ-модели. В числовом примере он составил 132 дня. Результат 10-летнего «разведения» по РВС-модели с $DO = 132$ дня визуализирован на рис. 3.



Рис. 2. Схема алгоритма моделирования воспроизводства стада (DO – сервис-период)

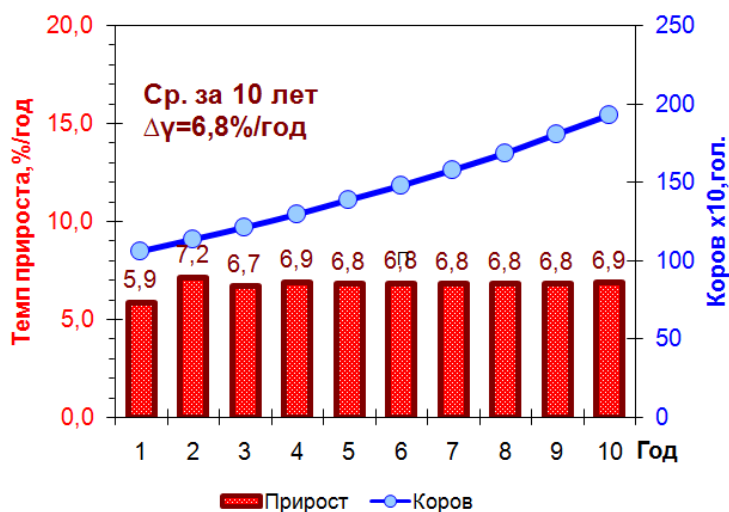


Рис. 3. Динамика поголовья коров и ежегодный темпа прироста стада (результат 10-летнего «разведения» по РВС-модели при $DO = 132$ дня)

Для рассматриваемого иллюстративного примера с $INV = 30$ дней, $n_{est} = 2$ эструса, $EDR = 70\%$ и $CR = 50\%$ репродуктивная эффективность, оцениваемая выходом телят, составляла 77,7%, а эффективность воспроизводства, оцениваемая среднегодовым темпом прироста молочного стада – 6,8%.

Результаты

Период инволюции матки. В табл. 1 представлены показатели плодовитости, которые реагировали на изменение продолжительности периода инволюции матки. Как и следовало ожидать, при каждом удлинении периода инволюции матки на 10 дней увеличивалась продолжительность всех временных показателей плодовитости. Период добровольного ожидания, число дней до первого осеменения и сервис-период увеличивались один к одному. Межотельный период увеличивался на 0,33 мес., или также на 10 дней (=30,4×0,33).

Таблица 1. Влияние продолжительности инволюции матки на показатели плодовитости коров

| Показатели | Длительность инволюции матки, дни | | | | | |
|------------------------|-----------------------------------|-------------|------|-------------|------|------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| VWP, дн. | 41 | 51 | 61 | 71 | 81 | 91 |
| DFS, дн. | 52 | 62 | 72 | 82 | 92 | 102 |
| DO, дн. | 111 | 121 | 131 | 141 | 151 | 161 |
| CI, мес. | 13,0 | 13,4 | 13,7 | 14,0 | 14,3 | 14,7 |
| WT, % | 84,7 | 81,3 | 78,0 | 74,7 | 71,3 | 68,0 |
| $\Delta\gamma$, %/год | 8,5 | 7,9 | 7,3 | 6,7 | 6,1 | 5,4 |

Примечания. VWP – период добровольного ожидания; DFS – дней до 1-го осеменения; DO – сервис-период; CI – межотельный интервал; WT – выход телят; $\Delta\gamma$ – темп прироста/сокращения стада. Пропуск эструсов $n_{est}=1$; индекс выявления эструса EDR=50%; индекс зачатия CR=60%.

Не таким явным было воздействие периода инволюции матки на выход телят и возможности расширенного воспроизводства стада. Каждое увеличение продолжительности периода инволюции матки на 10 дней приводило к снижению выхода телят на 3,3 п.п. (процентных пункта) и понижению среднегодового темпа прироста поголовья на 0,6 п.п.

Число пропущенных эструсов. На данном этапе моделирования допускалось, что продолжительность инволюции матки неизменна – 30 дней. При эстральном цикле 21 день, пропуск эструса означает увеличение на такое же число дней периода добровольно-вынужденного ожидания (VWP), числа дней до первого осеменения (DFS) и сервис-периода (DO). Эти и другие изменения признаков плодовитости при увеличении числа пропущенных эструсов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние числа пропущенных эструсов на показатели плодовитости коров

| Показатели | Число пропущенных эструсов | | | | | |
|------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| VWP, дн. | 30 | 51 | 72 | 93 | 114 | 135 |
| DFS, дн. | 41 | 62 | 83 | 104 | 125 | 146 |
| DO, дн. | 100 | 121 | 142 | 163 | 184 | 205 |
| CI, мес. | 12,7 | 13,4 | 14,0 | 14,7 | 15,4 | 16,1 |
| WT, % | 88,3 | 81,3 | 74,3 | 67,3 | 60,3 | 53,3 |
| $\Delta\gamma$, %/год | 9,1 | 7,9 | 6,6 | 5,3 | 3,9 | 2,4 |

Примечание. VWP – период добровольного ожидания; DFS – дней до 1-го осеменения; DO – сервис-период; CI – межотельный интервал; WT – выход телят; $\Delta\gamma$ – темп прироста/сокращения стада. Инволюция матки INV=30 дней; индекс выявления эструса EDR=50%; индекс зачатия CR=60%.

Относительно осеменения в первый после инволюции матки эструс при пропуске 1, 2, 3, 4 и 5 эструсов выход телят снижался соответственно на 7,9, 15,8, 23,8, 31,7 и 39,6%, а среднегодовой темп прироста стада – на 13,2, 27,5, 41,8, 57,1 и 73,6%. При сознательном

пропуске 3, 4 и 5 эструсов уровень яловости достигал соответственно 33, 40 и 47%.

Индекс выявления эструса. В табл. 3. представлена оценка влияния индекса (вероятности, уровня) выявления эструса (*EDR*) на показатели плодовитости стада.

Таблица 3. Влияние вероятности (индекса) выявления эструса на показатели плодовитости коров

| Показатели | Индекс выявления эструса (<i>EDR</i>), % | | | | | |
|------------------------|--|------|------|------|------|------|
| | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| <i>PR</i> , % | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 |
| <i>SPP</i> , осем. | 5,6 | 4,2 | 3,3 | 2,8 | 2,4 | 2,1 |
| <i>MP</i> , дн. | 106 | 77 | 60 | 48 | 40 | 33 |
| <i>DO</i> , дн. | 168 | 139 | 121 | 109 | 101 | 95 |
| <i>CI</i> , мес. | 14,9 | 13,9 | 13,4 | 13,0 | 12,7 | 12,5 |
| <i>WT</i> , % | 65,8 | 75,5 | 81,3 | 85,2 | 88,0 | 90,1 |
| $\Delta\gamma$, %/год | 5,0 | 6,8 | 7,9 | 8,6 | 9,0 | 9,4 |

Примечания. *PR* – индекс стельности; *SPP* – число осеменений на стельность; *MP* – период размножения; *DO* – сервис-период; *CI* – межотельный интервал; *WT* – выход телят; $\Delta\gamma$ – темп прироста/сокращения стада. Продолжительность инволюции матки *INV*=30 дней; пропуск эструсов n_{est} =1; индекс зачатия *CR*=60%.

С повышением вероятности выявления эструса (точности и эффективности *EDR*) у коров с 30 до 80% имело место:

- повышение индекса стельности (*PR*) с 18 до 48% или в 2,7 раза;
- снижение числа осеменений/стельность с 5,6 до 2,1 или на 3,5 осеменения;
- сокращение сервис-периода со 168 до 95 дней или на 73 дня;
- повышение выхода телят с 66 до 90% или на 24 п.п.;
- повышение темпа прироста стада с 5,0 до 9,4% в год или почти в 2 раза.

Цепные (последовательные) абсолютные приросты/сокращения (снижения) показателей плодовитости представлены в табл. 4.

Таблица 4. Цепные приросты/сокращения показателей плодовитости при увеличении вероятности (индекса) выявления эструса (*EDR*) на 10 п.п

| Показатели | +10 п.п. <i>EDR</i> | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 |
| <i>PR</i> , п.п. | +6,0 | +6,0 | +6,0 | +6,0 | +6,0 |
| <i>SPP</i> , осем. | -1,4 | -0,9 | -0,5 | -0,4 | -0,3 |
| <i>MP</i> , дн. | -29,0 | -17,0 | -12,0 | -8,0 | -7,0 |
| <i>DO</i> , дн. | -29,0 | -18,0 | -12,0 | -8,0 | -6,0 |
| <i>CI</i> , мес. | -1,0 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,2 |
| <i>WT</i> , п.п. | +9,7 | +5,8 | +3,9 | +2,8 | +2,1 |
| $\Delta\gamma$, п.п. | +1,8 | +1,1 | +0,7 | +0,4 | +0,4 |

Примечания. *PR* – индекс стельности; *SPP* – число осеменений на стельность; *MP* – период размножения; *DO* – сервис-период; *CI* – межотельный интервал; *WT* – выход телят; $\Delta\gamma$ – темп прироста/сокращения стада.

Кроме индекса стельности (*PR*), изменения других показателей плодовитости носили нелинейный характер. Так, следствием увеличения индекса выявления эструса (*EDR*) с 30 до 40% было снижение *SPP* на 1,4 осеменений, сервис-периода на 29 дней. Тогда как повышение *EDR* с 70 до 80% снизило эти показатели, соответственно, на 0,3 осеменения и 6 дней. Аналогично, в первом случае (*EDR* с 30 до 40%) имело место повышение выхода телят (*WT*) и среднегодового темпа прироста поголовья коров ($\Delta\gamma$), соответственно, на 9,7 и 1,8 п.п. Во втором случае (*EDR* с 70 до 80%) эти показатели повысились лишь на 2,1 и 0,4 п.п.

Индекс зачатия. В табл. 5 представлены результаты количественной оценки влияния уровня вероятности (индекса) зачатия (CR) на показатели плодовитости стада.

Таблица 5. Влияние вероятности (индекса) зачатия (CR) на показатели плодовитости коров

| Показатели | Индекс зачатия (CR), % | | | | | |
|-------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
| | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| PR, п.п. | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| SPP, осем. | 5,0 | 4,0 | 3,3 | 2,9 | 2,5 | 2,2 |
| MP, дн. | 95 | 74 | 60 | 50 | 42 | 36 |
| DO, дн. | 156 | 135 | 121 | 111 | 104 | 98 |
| CI, мес. | 14,5 | 13,8 | 13,4 | 13,0 | 12,8 | 12,6 |
| WT, п.п. | 69,7 | 76,7 | 81,3 | 84,7 | 87,2 | 89,1 |
| Δy , п.п. | 5,7 | 7,0 | 7,9 | 8,5 | 8,9 | 9,2 |

Примечания: PR – индекс стельности; SPP – число осеменений на стельность; MP – период размножения; DO – сервис-период; CI – межотельный интервал; WT – выход телят; Δy – темп прироста/сокращения стада. Инволюция матки INV=30 дней; пропуск эструсов $n_{est}=1$; индекс выявления эструса EDR=50%;

Цепные абсолютные приросты/сокращения (снижения) показателей плодовитости при последовательном повышении индекса зачатия на 10 п.п. представлены в табл. 6.

Таблица 6. Цепные приросты/сокращения показателей плодовитости при увеличении индекса (вероятности) зачатия (CR) на 10 п.п.

| Показатели | +10 п.п. CR | | | | |
|-------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 |
| PR, п.п. | +5 | +5 | +5 | +5 | +5 |
| SPP, осем. | -1 | -0,7 | -0,4 | -0,4 | -0,3 |
| MP, дн. | -21 | -14 | -10 | -8 | -6 |
| DO, дн. | -21 | -14 | -10 | -7 | -6 |
| CI, мес. | -0,7 | -0,4 | -0,4 | -0,2 | -0,2 |
| WT, п.п. | +7 | +4,6 | +3,4 | +2,5 | +1,9 |
| Δy , п.п. | +1,3 | +0,9 | +0,6 | +0,4 | +0,3 |

Примечания. PR – индекс стельности; SPP – число осеменений на стельность; MP – период размножения; DO – сервис-период; CI – межотельный интервал; WT – выход телят; Δy – темп прироста/сокращения стада.

Сравнивая табл. 3 с 5 и табл. 4 с 6 можно видеть, что эффект повышения индекса зачатия на показатели плодовитости очень схож с таковым по индексу выявления эструса.

Также линейно увеличивался индекс стельности (+5 п.п. на каждое 10%-ое увеличение CR) и нелинейно изменялись другие показатели, а именно – прибавка в выходе телят с 7 до 2,5 п.п. при повышении CR с 40 до 50 и с 70 до 80%, соответственно для среднегодового темпа прироста – с 1,3 до 0,4 п.п.

Комбинации факторов. Выше было показано влияние четырёх факторов, варьируемых по отдельности, на репродуктивную эффективность и возможности расширенного воспроизводства закрытого молочного стада в «чистом виде». Было исследовано также их комбинированное влияние, при этом были приняты четыре варианта пропуска эструса (0, 1, 2, 3 эструса), три уровня вероятности выявления эструса (30, 50, 70%) и три уровня вероятности зачатия (40, 60, 80%), что дало 36 (=4×3×3) комбинированных сценариев репродукции и воспроизводства стада. Результаты моделирования сведены в табл. 7.

Таблица 7. Комплексное влияние числа пропущенных эстральных циклов, вероятности выявления эструса и зачатия на показатели воспроизводства стада

| Число пропущенных эструсов | Вероятность выявления эструса (<i>EDR</i>), % | | | | | | | | |
|----------------------------|--|------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 30 | | | 50 | | | 70 | | |
| | Вероятность зачатия (<i>CR</i>), % | | | | | | | | |
| | 40 | 60 | 80 | 40 | 60 | 80 | 40 | 60 | 80 |
| | Индекс стельности (<i>PR</i>), % | | | | | | | | |
| 0-3 | 12 | 18 | 24 | 20 | 30 | 40 | 28 | 42 | 56 |
| | Период осеменения (<i>MP</i>), дн. | | | | | | | | |
| 0-3 | 165 | 106 | 77 | 95 | 60 | 42 | 65 | 40 | 27 |
| | Сервис-период, дн. | | | | | | | | |
| 0 | 205 | 147 | 118 | 135 | 100 | 83 | 105 | 80 | 68 |
| 1 | 226 | 168 | 139 | 156 | 121 | 104 | 126 | 101 | 89 |
| 2 | 247 | 189 | 160 | 177 | 142 | 125 | 147 | 122 | 110 |
| 3 | 268 | 210 | 181 | 198 | 163 | 146 | 168 | 143 | 131 |
| | Межотельный период, мес. | | | | | | | | |
| 0 | 16,1 | 14,2 | 13,2 | 13,8 | 12,7 | 12,1 | 12,8 | 12,0 | 11,6 |
| 1 | 16,8 | 14,9 | 13,9 | 14,5 | 13,4 | 12,8 | 13,5 | 12,7 | 12,3 |
| 2 | 17,5 | 15,6 | 14,6 | 15,2 | 14,0 | 13,5 | 14,2 | 13,4 | 13,0 |
| 3 | 18,2 | 16,3 | 15,3 | 15,9 | 14,7 | 14,2 | 14,9 | 14,1 | 13,7 |
| | Выход телят, % | | | | | | | | |
| 0 | 53,3 | 72,8 | 82,5 | 76,7 | 88,3 | 94,2 | 86,7 | 95,0 | 99,2 |
| 1 | 46,3 | 65,8 | 75,5 | 69,7 | 81,3 | 87,2 | 79,7 | 88,0 | 92,2 |
| 2 | 39,3 | 58,8 | 68,5 | 62,7 | 74,3 | 80,2 | 72,7 | 81,0 | 85,2 |
| 3 | 32,3 | 51,8 | 61,5 | 55,7 | 67,3 | 73,2 | 65,7 | 74,0 | 78,2 |
| | Темп прироста/сокращения стада (Δr), %/год | | | | | | | | |
| 0 | 2,4 | 6,3 | 8,1 | 7,0 | 9,1 | 10,0 | 8,8 | 10,2 | 10,9 |
| 1 | 0,9 | 5,0 | 6,8 | 5,7 | 8,0 | 8,9 | 7,6 | 9,0 | 9,7 |
| 2 | -0,8 | 3,6 | 5,5 | 4,4 | 6,6 | 7,6 | 6,3 | 7,8 | 8,5 |
| 3 | -2,6 | 2,1 | 4,1 | 2,9 | 5,3 | 6,4 | 5,0 | 6,6 | 7,3 |

Примечания: период инволюция матки коровы 30 дней; жирным курсивом выделены хозяйственно приемлемые 11 вариантов.

На каждые 20% повышения индекса выявления эструса (*EDR*), при фиксированном индексе зачатия (*CR*), индекс стельности (*PR*) возрастал в 1,4-1,7 раза. С другой стороны, на каждые 20% повышения индекса зачатия, при фиксированном индексе выявления эструса, индекс стельности возрастал в 1,3-1,5 раза. Если же на 20% одновременно повышались, как индекс выявления эструса, так и индекс зачатия, то индекс стельности возрастал в 1,9-2,5 раза (с 12 до 30%, с 30 до 56%). Период добровольно-вынужденного ожидания (*VWP*), при фиксированном периоде инволюции матки, зависел только от числа сознательно пропущенных эструсов. При осеменении коровы сразу после инволюции матки, через 1, 2 и 3 эструса значение *VWP* для всех комбинаций *EDR*×*CR* составляло 30, 51, 72 и 93 дней.

В противоположность этому, период осеменения (*MP*) не зависел от числа пропущенных эструсов, но в значительной степени определялся уровнями индекса выявления эструса и индекса зачатия (от которых зависит индекс стельности и число осеменений для оплодотворения коровы). Максимальное значения *MP* было 165 дней, минимальное – 27 дней.

Период добровольного ожидания в комбинации с периодом осеменения определяют продолжительность сервис-периода (и, соответственно, межотельный интервал). Размах сервис-периода составлял от 68 до 268 дней, интервала между отёлами – от 11,6 до 18,2 месяцев, выхода телят – от 32 до 99%, темпа прироста/сокращения стада – от -2,6 до 10,9%/год. Воспроизводство стада при сервис-периоде более 120 дней считается малоэффективным. Если максимально возможный сервис-период ограничить 120 днями, то тогда из 36 вариантов хозяйственно приемлемыми будут только 11 (табл. 7, полужирный

курсив). Для этих вариантов максимальный межотельный период составил 13,4 мес., минимальный выход телят – 81%, минимальный темп возможного прироста числа коров в стада – 8% в год.

Анализ данных показал, что если в стаде эструс выявляется на уровне 30%, то программа воспроизводства стада может быть эффективной, только в том случае, если уровень оплодотворяемости не ниже 80% и животные осеменяются в первый после инволюции матки эструс. Если в стаде эструс выявляется на уровне 50%, то программа воспроизводства может быть эффективной при CR не ниже 60% и сознательном пропуске не более одного эструса. При 70%-м выявлении эструса программа воспроизводства будет эффективной даже когда $CR=40\%$, но осеменение животных сразу после инволюции матки. Если уровень оплодотворяемости в стаде 60%, то можно пропускать один эструс, при $CR=80\%$ – до двух эструсов.

Обсуждение

Молочный скот эксплуатируется человеком на протяжении многих веков с возрастающей интенсивностью. Результат, с одной стороны, – фантастический рост продуктивности животных, с другой – проблемы с воспроизводством, которые в последние десятилетия всё более обостряются. Показатели плодовитости даже в племенных стадах далеки от оптимальных (табл. 8). Из-за снижения плодовитости животных убытки составляют до 13 млрд руб. в год (Фисинин, 2007). Генетическая изменчивость репродуктивных признаков менее 10% (VanRaden et al., 2004; Løvendahl, Chagunda, 2009; Сермягин и др., 2015). Поэтому, как представляется, инвестиции в менеджмент будут более эффективными, чем в селекцию. Гармония биологии коровы и качественного менеджмента – основа для достижения продуктивной и репродуктивной эффективности, обеспечивающих прибыльность молочного скотоводства.

В репродуктивном цикле коровы яйцеклетка после овуляции жизнеспособна в течение 6-12 часов. «Окно возможностей» для наиболее вероятного оплодотворения яйцеклетки сперматозоидом – около 6 часов. Поэтому программа управления стадом, в части репродукции, должна включать эффективную и точную систему выявления эструса у коров и тёлочек и своевременное, по отношению к овуляции, их осеменение (случку). Невыявление эструса – самая распространённая и затратная проблема при искусственном осеменении и главный лимитирующий фактор повышения воспроизводства во многих стадах молочных пород. Даже в экономически развитых странах эструс своевременно выявляется у менее 50% коров (Van Eerdenburg et al., 2002; Roelofs et al., 2006).

Индекс выявления эструса (EDR) служит ключевым маркером репродуктивной эффективности. Последняя зависит не только от EDR , но и от индекса зачатия CR . Комбинирование значений EDR и CR определяет индекс стельности (PR). Были установлены статистически значимые положительные корреляции PR с индексом первичных осеменений ($r = 0,55$), индексом зачатий от первичных осеменений ($r = 0,72$) и общим индексом зачатий ($r = 0,65$), а также положительная ассоциация с периодом добровольного ожидания (Ferguson, Skidmore, 2013). Важно то, что PR является основным фактором, детерминирующим продолжительность сервис-периода, а через него – выход телят и экономический эффект репродукции.

В данной работе исследовано влияние периода инволюции матки, числа пропущенных эструсов, индекса выявления эструса и индекса зачатия на показатели репродуктивной эффективности молочного стада (табл. 9). Удлинение периода инволюции матки на 10 дней приводит к снижению выхода телят на 3,3 п.п, среднегодового темпа прироста стада – на 0,6 п.п. Это означает, что если в стаде из 100 коров средняя продолжительность инволюции матки составляет 50 дней, то при сокращении этого периода до 30 дней (профилактика и своевременное лечение отелившихся коров) выход телят может повыситься на 6,6 голов (=81,3-74,7), и ежегодный прирост поголовья коров может возрасти с 6,7 до почти 8%.

Таблица 8. Результаты оценки уровня воспроизводства в 26 российских племенных стадах молочного скота*

| Показатели | Воспроизводство стада | | |
|--|-----------------------|-------------|-----------|
| | «оптимум» | «проблемно» | «факт» |
| Выход телят, % | 86-95 | <80 | 57-87 |
| Межотельный период (CI), дни | 360-380 | >390 | 414-470 |
| Число коров с CI > 365 дней, % | 30 | >30 | 59-67 |
| Сервис-период (DO), дни | 80-90 | >120 | 108-174 |
| Число коров с DO > 120 дней, % | 10 | >15 | 34,7 |
| Сухостойный период, дни | 50-60 | <45 и >70 | 64-77 |
| Дней до первичных осеменений | 55-65 | >70 | 74-107 |
| Эффективность выявления эструса, % | 80 | <70 | 34-59 |
| Коров с нормальным эстральным циклом, % | 70-75 | <60 | 25 |
| Возраст первого осеменения тёлочек, мес. | 15 | >18 | 16,8-24,6 |
| Возраст нетелей при первом отёле, мес. | 24 | <24 и >30 | 26,4-35,8 |
| Стельность от первичных осеменений, % | | | |
| - коров | 50-55 | <50 | 26-56 |
| - тёлочек | 70-85 | <70 | 25-82 |
| Коров, осеменённых в течение 90 дней, % | 90 | <90 | 85-84 |
| Стельных коров после 3-х осеменений, % | 90 | <85 | 53-76 |
| Число осеменений на стельность | | | |
| - коров | 1,8 | >2,5 | 1,9-5,6 |
| - тёлочек | 1,3 | >1,7 | 1,3-3,5 |
| Стельных коров в стаде, %/мес. | 60 | <50 | 35-63 |
| Отёлы нетелей от коров на 01.01, % | 35 | <30 | 25-41 |
| Ввод первотёлок в стадо, % | 25 | <20 | 25-36 |
| Эмбриональная смертность + ранние аборт, % | 20 | >20 | 27-38 |
| Аборты после 3-х мес. стельности, % | <5 | >5 | 13,5 |
| Вынужденная браковка коров, % | 5 | >5 | 22-34 |
| Браковка по продуктивности, % | 15 | >15 | 8-12 |
| Браковка по воспроизводству, % | <10 | >16 | 19-27 |
| Выбытие новорождённых телят, % | ≤3 | >3 | 7-13 |
| Выбытие тёлочек от рождения до отёла, % | ≤7 | >7 | 10-18 |
| Продуктивное долголетие коров, лактаций | 4 | <3 | 2,2-2,4 |

* Адаптировано по: (Решетникова и др., 2012а).

Таблица 9. Оценки линейного влияния продолжительности инволюции матки, числа пропущенных эструсов, индекса выявления эструса и индекса зачатия на показатели репродуктивной эффективности молочного стада.

| Характеристики плодовитости и воспроизводства | На каждое увеличение ПРЦ | | | |
|--|--------------------------|-----------|----------|----------|
| | INV | n_{est} | EDR | CR |
| | +10 дн | +1 цикл | +10 п.п. | +10 п.п. |
| Индекс стельности, п.п. | - | - | +6 | +5 |
| Число осеменений на зачатие | - | - | -0,7 | -0,6 |
| Сервис-период, дн. | +10 | +21 | -14,6 | -11,6 |
| Межотельный период, мес. | +0,3 | +0,7 | -0,5 | -0,4 |
| Выход телят, п.п. | -3,3 | -7,0 | +4,9 | +3,9 |
| Темп прироста/сокращения числа коров в стаде, п.п. | -0,6 | -1,2 | +0,9 | +0,7 |

Примечания. INV – период инволюции матки; n_{est} – число пропущенных эструсов; EDR – индекс выявления эструса; CR – индекс зачатия или оплодотворения; п.п. – процентные пункты (например, 50% - 40% = +10 п.п.).

При сознательном пропуске более двух эструсов сервис-период превышал 142 дня, межотельный период – 14 мес., что является нежелательным. Так, в случае пропуска 3, 4 и 5 эструсов уровень яловости превышал 25% и достигал 47%. Пропуск эструса влияет и на темпы расширенного воспроизводства стада. Зависимость нелинейная: при пропуске первого эструса возможности расширенного воспроизводства стада снижались на 13%, при пропуске трёх эструсов вместо двух – на 19%, а при пропуске пяти вместо четырёх эструсов – на 38%. В целом, подтвердилась нецелесообразность сознательного пропуска более двух эструсов.

Каждое повышение *EDR* на 10% увеличивало индекс стельности (*PR*) на 6%. Другие репродуктивные показатели изменялись нелинейно. С повышением *EDR* стада снижается отдача от усилий по его повышению. Так, увеличение *EDR* с 30 до 40% повысило выход телят на 9,7 п.п., а при увеличении с 70 до 80% – лишь на 2,1 п.п.; соответствующее повышение среднегодового темпа прироста стада было 1,8 и 0,4 п.п. При $EDR \leq 50\%$ для получения стельной коровы требовалось более 3,3 осеменений на стельность, сервис-период превышал 120 дней, выход телят был менее 80%. Поэтому, как представляется, при разведении скота необходимо стремиться к тому, чтобы *EDR* был не ниже 50%.

Влияние индекса зачатия (*CR*) на репродуктивные показатели очень схоже с таковым по *EDR*. В частности, также линейно увеличивался индекс стельности (*PR*) и нелинейно снижались число осеменений на зачатие, сервис-период и межотельный интервал; повышались показатели выхода телят и среднегодового темпа расширенного воспроизводства стада. Увеличение *CR* с 50 до 70% приводило к повышению *PR* с 25 до 35%. Это означает, что 35% животных (от всех пригодных для осеменения) станут стельными в первый 21-дневный цикл размножения после окончания периода добровольно-вынужденного ожидания. После второго и третьего циклов стельных коров будет не 58%, как при $CR=50\%$, а уже 73%. При $CR \leq 50\%$ для получения стельной коровы требовалось более 3,3 осеменений, сервис-период был больше 120 дней, выход телят – менее 80%, среднегодовой темп прироста поголовья коров ниже 8%. Поэтому, как представляется, при разведении скота необходимо стремиться к тому, чтобы индекс зачатия (оплодотворения) был не ниже 60%.

Путём комбинации нескольких градаций трёх переменных: *EDR* – 3 уровня, *CR* – 3 уровня и число пропусков эструса – от 0 до 4-х, было проанализировано 36 вариантов репродуктивного цикла и воспроизводства стада. Вариация продолжительности сервис-периода составила при этом 68...268 дней. При сервис-периоде более 120 дней воспроизводство стада считается малоэффективным. Поэтому верхний предел сервис-периода был ограничен 120 днями. В результате из 36 вариантов хозяйственно приемлемыми остались 11 (минимальный выход телят – 81%, темп прироста поголовья коров в стаде – 8% в год). Проведенный анализ показал, что программа воспроизводства стада может быть эффективной при следующих комбинациях значений параметров:

- (а) при *EDR* на уровне 30%, если *CR* не ниже 80% ($PR = 24\%$) и осеменять коров в первый после инволюции матки эструс;
- (б) при *EDR* на уровне 50%, если *CR* не ниже 60% ($PR = 30\%$) и сознательно пропускать не более одного эструса;
- (в) при *EDR* на уровне 70%, если:
 - *CR* на уровне 40% ($PR = 28\%$) и коров осеменять в первый эструс; или
 - *CR* на уровне 60% ($PR = 42\%$) и пропускать не более одного эструса; или
 - *CR* на уровне 80% ($PR = 56\%$) и пропускать до двух эструсов.

Проблема выявления эструса и, следовательно, повышения оплодотворяемости, стельности и выхода телят может быть решена за счёт внедрения био-информационных систем (Firk et al., 2002; Løvendahl, Chagunda), UWB-технологии (Ultra-WideBand technology) (Homer et al., 2013), оценки функционального состояния яичников, стимуляции эстральной цикличности коров и синхронизации эструса (Ryan et al., 1999; Cavalieri, MacMillan, 2002; Пташинская, 2012; Бригида и др., 2017; Редкозубова, 2018; Василенко, Русаков, 2018). В последнее время широко рекламируется и внедряется фронтальное применение гормональных

средств (например, простагландин Ф-2α), что даёт возможность проводить осеменение животных в желательные сроки, независимо от природного цикла воспроизводства. Но на практике насильственная гормональная перестройка полового цикла чаще всего усиливает гипофункциональное (патологическое) состояние яичников, связанное с нарушениями обмена веществ (Решетникова и др., 2012б). Возможно, в будущем «заметная практическая» эффективность в фертильности скота может быть достигнута и при внедрении ДНК-технологий (Племяшов, Яковлев, 2017; Зиновьева и др., 2017).

Эффективность управления воспроизводством молочного стада во многом зависит от использования в хозяйстве системы зооветеринарного учета. Для стад с компьютеризированной системой накопления, хранения и обработки зооветеринарных данных выбор репродуктивных показателей практически не ограничен. Кроме сервис-периода и межотельного интервала, можно определять период добровольного ожидания, индекс выявления эструса, индекс осеменения, индекс стельности от первичных осеменений, индекс стельности на 100-й день, стельность на 6-ю неделю и яловость на 200-ый день. Для их расчёта необходимы полные и точные записи отёла, всех фаз течки, осеменений и результатов ветеринарного обследования на беременность. Информация должна быть актуальной и активно использоваться в управлении воспроизводством стада, как это начали делать на молочном комплексе СПК «Племзавод «Детскосельский» (Брагинец и др., 2015). Аккуратное ведение записей важно для планирования сроков отёлов, группового и индивидуального подбора, соответствующих изменений в содержании и кормлении, предоставления данных ассоциациям по породам для создания и актуализации региональных и центральных банков данных, мониторинга и оказания услуг по репродукции и воспроизводству, разведению и селекции животных.

Заключение

Разработанный алгоритм моделирования репродуктивного цикла коров позволяет исследовать влияние важнейших зоотехнических факторов на эффективность репродукции и потенциал расширенного воспроизводства молочных стад при их закрытом разведении. Использование модели репродуктивного цикла совместно с РВС-моделью (Кузнецов, 2018) расширяет возможности многовариантного анализа при разработке программ воспроизводства стада. При разведении молочного скота необходимо стремиться к тому, чтобы период инволюции матки не превышал 40 дней, сознательно пропускать не более 2-х эструсов, индекс выявления эструса должен быть не ниже 50%, индекс зачатия – не ниже 60%. При таких показателях прогнозируется продолжительность сервис-периода в пределах 68-120 дней; выход телят – на уровне 81-99%; темп прироста стада – 6-8% в год, т.е. те величины, при достижении которых становится возможным существенно ограничить импорт скота, решать проблему самообеспечения населения молоком и говядиной, заниматься сохранением и восстановлением генофонда вытесняемых пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брагинец Ю.Н., Астахов С.С., Алексеева А.Ю. Мониторинг показателей воспроизводства крупного рогатого скота на современных молочных комплексах // Молочное и мясное скотоводство. – 2015. – № 4. – С. 22-24.
2. Бригида А.В., Сорокин В.И., Алексеев В.В., Рожин К.А., Ковальчук С.Н., Лукьянов К.И. Сравнительная оценка эффективности искусственного осеменения высокопродуктивных коров, в зависимости от протоколов стимуляции половой охоты в животноводческом комплексе ОАО «Ваганово» // Разведение и генетика животных. – 2017. – № 4. – С. 50-54.
3. Василенко Т.Ф., Русаков Р.В. Современные подходы к оптимизации репродуктивных процессов у коров // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2018. – № 1. – С. 5-18.
4. Завертяев Б.П. Повышение многоплодия в скотоводстве. – М.: Россельхозиздат, 1987. – 190 с.
5. Зиновьева Н., Стрекозов Н., Ескин Г., Янчуков И., Ермилов А. Гаплотипы фертильности голштинского скота // Животноводство России. – 2017. – № 2. – С. 17-18.
6. Кузнецов В.М. Исследование *in silico* расширенного воспроизводства при закрытом разведении

- молочного скота // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2018. – № 3. – С. 54-86. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2018.3.54-86.
7. Племяшов К.В., Яковлев А.Ф. Молекулярные маркеры в повышении воспроизводства молочного скота (обзор) // Генетика и разведение животных. – 2017. – № 4. – С. 3-11.
 8. Пташинская М. Краткое руководство по репродукции животных: крупный рогатый скот. MSD Animal Health, 10 изд. Intervet International bv. 2009 (Перевод Давыдова Н.Ю., 2012). Ч. 1 и 2, 2012, 176 с.
 9. Редкозубова Л. Синхронизируем половой цикл // Животноводство России. – 2018. – № 3. – С. 53-54.
 10. Решетникова Н., Ескин Г., Комбарова Н., Порошина Е., Шавырин И. Современное состояние и стратегия воспроизводства стада при повышении молочной продуктивности крупного рогатого скота // Молочное и мясное скотоводство. – 2012а. – № 3. – С. 2-4.
 11. Решетникова Н., Ескин Г., Комбарова Н., Порошина Е., Шавырин И. Современное состояние и стратегия воспроизводства стада при повышении молочной продуктивности крупного рогатого скота // Молочное и мясное скотоводство. – 2012б. – № 4. – С. 2-6.
 12. Сермягин А.А., Гладырь Е.А., Харитонов С.Н., Ермилов А.Н., Стрекозов Н.И., Брем Г., Зиновьева Н.А. Полногеномный анализ ассоциаций с продуктивными и репродуктивными признаками у молочного скота в российской популяции голштинской породы // Сельскохозяйственная биология. – 2015. – Т. 51. – № 2. – С. 182-193.
 13. Фисинин В.И. Научное обеспечение ускоренного развития животноводства // Вестник ОрёлГАУ. – 2007. – № 1. – С. 2-3.
 14. Чомаев А. От каждой коровы – по телёнку в год // Животноводство России. – 2007. – № 5. – С. 41-42.
 15. Cavalieri J., MacMillan K. L. Synchronization of oestrus and reproductive performance of dairy cows following administration of oestradiol benzoate or GnRH during a synchronised pro-oestrus // Aust. Vet. J. – 2002. – Vol. 80. – No 8. – P. 486-493.
 16. Dalton J.C., Amin A. Heat detection accuracy and AI technician evaluation // Western Dairy Management Conference. Reno, NV. – March 11-13, 2009. – P. 117-129.
 17. Ferguson J.D., Skidmore A. Reproductive performance in a select sample of dairy herds // J. Dairy Sci. – 2013. – Vol. 96. – No 2. – P. 1269-1289.
 18. Firk R., Stamer E., Junge W., Krieter J. Automation of oestrus detection in dairy cows: A review // Livest. Prod. Sci. – 2002. – Vol. 75. – No 3. – P. 219-232.
 19. Firk R., Stamer E., Junge W., Krieter J. Oestrus detection in dairy cows based on serial measurements using univariate and multivariate analysis // Arch. Tierz. – 2003. – Br. 46. – No 2. – S. 127-142.
 20. Homer E.M., Gao Y., Meng X., Dodson A., Webb R., Garnsworthy P.C. A novel approach to the detection of estrus in dairy cows using ultra-wideband technology // J. Dairy Sci. – 2013. – Vol. 96. – No 10. – P. 6529-6534.
 21. Huang C., Tsuruta S., Bertrand J.K., Misztal I., Lawlor T.J., Clay J.S. Trends for conception rate of Holsteins over time in the southeastern United States // J. Dairy Sci. – 2009. – Vol. 92. – No 9. – P. 4641-4647.
 22. De Kruijff A. Factors influencing the fertility of a cattle population // J. Reprod. Fert. – 1978. – Vol. 54. – P. 502-518.
 23. Løvendahl P., Chagunda M.G.G. Genetic variation in estrus activity traits // J. Dairy Sci. – 2009. – Vol. 92. – No 9. – P. 4683-4688.
 24. Løvendahl P., Chagunda M.G.G. On the use of physical activity monitoring for estrus detection in dairy cows // J. Dairy Sci. – 2010. – Vol. 93. – No 1. – P. 249-259.
 25. Roelofs J.B., Graat E.A.M., Mullaart E., Soede N. M., Voskamp-Harkema W., Kemp B. Effects of insemination-ovulation interval on fertilization rates and embryo characteristics in dairy cattle // Theriogenology. – 2006. – Vol. 66. – No 9. – P. 2173-2181.
 26. Rorie R.W., Bilby T.R., Lester T.D. Application of electronic estrus detection technologies to reproductive management of cattle // Theriogenology. – 2002. – Vol. 57. – No 1 – P. 137-148.
 27. Ryan D.P., Galvin J.A., O'Farrell K.J. Comparison of oestrous synchronization regimens for lactating dairy cows // Anim. Rep. Sci. – 1999. – Vol. 56. – No 3/4. – P. 153-168.
 28. Van Eerdenburg F.J.C.M., Karthaus D., Taverne M.A.M., Merics I., Szenci O. The relationship between estrous behavioral score and time of ovulation in dairy cattle // J. Dairy Sci. – 2002. – Vol. 85. – No 5. – P. 1150-1156.
 29. VanRaden P.M., Sanders A.H., Tooker M.E., Miller R.H., Norman H.D., Kuhn M.T., Wiggans G.R. Development of a national genetic evaluation for cow fertility // J. Dairy Sci. – 2004. – Vol. 87. – No. 7. – P. 2285-2292.

REFERENCES

1. Braginets Yu.N., Astakhov S.S., Alekseeva A.Yu. [Monitoring of cattle reproduction indicators on modern dairy complexes]. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo - Dairy and Meat Cattle Husbandry*. 2015, 4: 22-24.
2. Brigida A.V., Sorokin V.I., Alekseev V.V., Rozhin K.A., Koval'chuk S.N., Luk'yanov K.I. [Comparative evaluation of the effectiveness of artificial insemination of highly productive cows, depending on the protocols of stimulation of sexual hunting in the cattle-breeding complex of Vaganovo OJSC]. *Razvedenie i genetika zhivotnykh - Animal breeding and genetics*. 2017, 4: 50-54.
3. Cavalieri J., MacMillan K. L. Synchronization of oestrus and reproductive performance of dairy cows following administration of oestradiol benzoate or GnRH during a synchronised pro-oestrus. *Aust. Vet. J.* 2002, 80(8): 486-493.
4. Chomaev A. [From each cow - by calf per year]. *Zhivotnovodstvo Rossii - Animal Husbandry in Russia*. 2007, 5: 41-42.
5. Dalton J.C., Amin A. Heat detection accuracy and AI technician evaluation. *Western Dairy Management Conference. Reno, NV. March 11-13, 2009. P. 117-129.*
6. Ferguson J.D., Skidmore A. Reproductive performance in a select sample of dairy herds. *J. Dairy Sci.* 2013, 96(2): 1269-1289.
7. Firk R., Stamer E., Junge W., Krieter J. Automation of oestrus detection in dairy cows: A review. *Livest. Prod. Sci.* 2002, 75(3): 219-232.
8. Firk R., Stamer E., Junge W., Krieter J. Oestrus detection in dairy cows based on serial measurements using univariate and multivariate analysis. *Arch. Tierz.* 2003, 46(2): 127-142.
9. Fisinin V.I. [Scientific support for accelerated development of livestock]. *Vestnik Orlovskogo GAU - Herald of Orlov State Agricultural University*. 2007, 1: 2-3.
10. Homer E.M., Gao Y., Meng X., Dodson A., Webb R., Garnsworthy P.C. A novel approach to the detection of estrus in dairy cows using ultra-wideband technology. *J. Dairy Sci.* 2013, 96(10): 6529-6534.
11. Huang C., Tsuruta S., Bertrand J.K., Misztal I., Lawlor T.J., Clay J.S. Trends for conception rate of Holsteins over time in the southeastern United States. *J. Dairy Sci.* 2009, 92(9): 4641-4647.
12. De Kruif A. Factors influencing the fertility of a cattle population. *J. Reprod. Fert.* 1978, 54: 502-518.
13. Kuznetsov V.M. [In silico study of expanded reproduction in closed breeding of dairy cattle]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2018, 3, 54-86. doi: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol. 2018.3.54-86.
14. Løvendahl P., Chagunda M.G.G. Genetic variation in estrus activity traits. *J. Dairy Sci.* 2009, 92(9): 4683-4688.
15. Løvendahl P., Chagunda M.G.G. On the use of physical activity monitoring for estrus detection in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2010, 93(1): 249-259.
16. Plemyashov K.V., Yakovlev A.F. [Molecular markers in enhancing the reproduction of dairy cattle (review)]. *Genetika i razvedenie zhivotnykh - Genetics and animal breeding*. 2017, 4: 3-11.
17. Ptashinskaya M. *Kratkoe rukovodstvo po reproduksii zhivotnykh: krupnyi rogatyi skot* (Brief Guide to Animal Reproduction: Cattle MSD Animal Health, 10 изд. Intervet International bv. 2009 (Translated by Davydova N.Yu., 2012), 2012, Part 1 and 2, 176 p.
18. Redkozubova L. [Synchronize the sexual cycle]. *Zhivotnovodstvo Rossii - Animal Husbandry in Russia*. 2018, 3: 53-54.
19. Reshetnikova N., Eskin G., Kombarova N., Poroshina E., Shavyrin I. [The current state and strategy of reproduction of the herd with an increase in milk production of cattle]. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo - Dairy and Meat Cattle Husbandry*. 2012, 3: 2-4.
20. Reshetnikova N., Eskin G., Kombarova N., Poroshina E., Shavyrin I. [The current state and strategy of reproduction of the herd with an increase in milk production of cattle]. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo - Dairy and Meat Cattle Husbandry*. 2012, 4: 2-6.
21. Roelofs J.B., Graat E.A.M., Mullaart E., Soede N. M., Voskamp-Harkema W., Kemp B. Effects of insemination-ovulation interval on fertilization rates and embryo characteristics in dairy cattle. *Theriogenology*. 2006, 66(9): 2173-2181.
22. Rorie R.W., Bilby T.R., Lester T.D. Application of electronic estrus detection technologies to reproductive management of cattle. *Theriogenology*. 2002, 57(1): 137-148.
23. Ryan D.P., Galvin J.A., O'Farrell K.J. Comparison of oestrous synchronization regimens for lactating dairy cows. *Anim. Rep. Sci.* 1999, 56(3/4): 153-168.
24. Sermyagin A.A., Gladyr' E.A., Kharitonov S.N., Ermilov A.N., Strekozov N.I., Brem G., Zinov'eva N.A. [A full genomic analysis of associations with productive and reproductive traits in dairy cattle in the

- Russian Holstein breed]. *Sel'skokhosyaistvennaya biologiya - Agricultural Biology*. 2015, 51(2): 182-193.
25. Van Eerdenburg F.J.C.M., Karthaus D., Taverne M.A.M., Merics I., Szenci O. The relationship between estrous behavioral score and time of ovulation in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 2002, 85(5): 1150-1156.
26. VanRaden P.M., Sanders A.H., Tooker M.E., Miller R.H., Norman H.D., Kuhn M.T., Wiggans G.R. Development of a national genetic evaluation for cow fertility. *J. Dairy Sci.* 2004, 87(7): 2285-2292.
27. Vasilenko T.F., Rusakov R.V. [Modern approaches to the optimization of reproductive processes in cows]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology*. 2018. 1: 5-18.
28. Zavertyaev B.P. *Povyshenie mnogoplodiya v skotovodstve* (Increase of multiple births in cattle breeding). Moscow: Rossel'khozizdat, 1987, 190 p.
29. Zinov'eva N., Strekozov N., Eskin G., Yanchukov I., Ermilov A. [Fertility haplotypes of Holstein cattle]. *Zhivotnovodstvo Rossii - Animal Husbandry in Russia*. 2017, 2: 17-18.

Computational model of cows reproductive cycle

Kuznetsov V.M.

*Federal Agricultural Research Center of the Northeast
named by N.V. Rudnitsky, Kirov, Kirov Region, Russian Federation*

ABSTRACT. The aim is to create an algorithm for modeling the reproductive cycle of cows (RC-model) and to conduct a series of numerical experiments in Microsoft Excel. The changes in the average annual growth rate / reduction in the number of dairy herd cows (Δy) were studied with varying input data - the duration of the uterus involution period (INV from 20 to 70 days), the number of consciously passed estrus (n_{est} from 0 to 5 estrus), probability of estrus detection (EDR from 30 to 80%) and conception (CR from 40 to 90%). An increase in INV by 10 days led to a decrease in calf yield (WT) by 3.3 p.p. (percentage points) and Δy by 0.6 p.p. The conscious omission of one estrous cycle reduced WT and Δy by 7.0 and 1.2 p.p. respectively. The increase by 10 ppt in EDR or CR led to an increase in WT by 4.9 and 3.9, Δy by 0.9 and 0.7 p.p. respectively. Situations of 36 variants were investigated with simultaneous variation of input variables with gradations: n_{est} - 0, 1, 2, 3 estrus; EDR - 30, 50, 70%; CR - 40, 60, 80%. At the same time, the length of the service period ranged from 68 to 268 days, the calving interval from 11.6 to 18.2 months, the output of calves from 32 to 99%, the rate of increase/decrease in the number of cows - from -2.6 to +10.9% / yr. When adopting the lower threshold of the service period at 120 days, out of 36 variants, 11 were economically acceptable with minimum values of WT = 81%, Δy = 8% per year. It is shown that with EDR = 30%, the herd reproduction management program can be effective only when $CR \geq 80\%$ and the cows are inseminated in the first estrus after the involution of the uterus. If EDR = 50% in the herd, then the reproduction program will be effective when the CR is at least 60% and no more than one estrus is consciously leaved out. With EDR = 70%, the reproduction program can be effective if: (a) $CR \geq 40\%$ and the cows are inseminated immediately after the involution of the uterus; (b) CR = 60% and not more than one estrus is leaved out; (c) $CR \geq 80\%$, and no more than two estrus is leaved out. The developed algorithm for modeling the reproductive cycle of cows is supposed to be used when developing programs for the reproduction of the herd in dairy cattle breeding.

Keywords: dairy cattle, reproductive cycle, closed herd, livestock growth rate, computational modeling, forecasting

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh - Problems of Productive Animal Biology, 2019, 1: 50-65

Поступило в редакцию: 11.02.2019

Получено после доработки: 21.02.2019

Кузнецов Василий Михайлович, д.с.-х.н., проф.; тел. +8(919)510-99-68;
e-mail: vm-kuznetsov@mail.ru