

Математическое моделирование процесса вычёсывания пуха коз с позиции биотехнической системы «человек – машина – животное»

Л.П. Карташов, д.т.н., профессор, Ю.А. Хлопко, д.т.н., В.А. Ротова, к.т.н., А.М. Осипова, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ; С.А. Соловьёв, чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, ФГБНУ ГОСНИТИ

Продовольственная безопасность России напрямую связана с уровнем развития отраслей агропромышленного комплекса, а это зависит от применяемых технологий и технологического

оборудования в животноводческой отрасли. К сожалению, в настоящее время животноводство страны далеко не в полной мере удовлетворяет потребность населения в качественных продуктах питания, а промышленность – в сырье. В сложившейся непростой экономической ситуации вопросы продовольственной безопасности стоят очень остро. Поэтому перед хозяйствующими субъектами ставится задача обеспечения стабильного развития

животноводства, в том числе овцеводства и козоводства. Определённые успехи в этом направлении достигнуты в Оренбургской области [1]. Но одно только увеличение поголовья животных на современном этапе развития интенсивных технологий не решит проблемы продовольственной безопасности государства.

Учитывая изложенное, развитие животноводства возможно при переводе отрасли на более высокие технологии, при которых будет наиболее эффективно раскрыт и использован весь генетический потенциал животных. При этом необходимо обеспечить возможность управления производственными процессами с учётом количества и качества конечной продукции. Исходя из этого, можно сформулировать фундаментальную проблему: использование звена «машина» для управления висцеральными физиологическими процессами звена «животное» под контролем звена «человек» в сложной биотехнической системе «человек – машина – животное».

Использование звена «машина», как инструмента для адаптации животного и человека-оператора к изменчивым внешним условиям окружающего пространства и способствующего поддержанию гомеостаза животного, позволит отчасти решить сформулированную фундаментальную задачу.

Получение высококачественного пухового волокна коз оренбургской пуховой породы в настоящее время осуществляется преимущественно ручным вычёсыванием традиционным гребнем. При этом процесс вычёсывания становится трудоёмким, затраты времени на вычёсывание пуха с одного животного составляют от 0,5 до 0,75 час. И это только затраты на непосредственный процесс вычёсывания. Подготовительные и вспомогательные операции (фиксация, расфиксация, подготовка гребней) занимают не менее четверти часа. В итоге на получение 1 кг пухового волокна затрачивается не менее 3,5–4 часов рабочего времени (зависит от продуктивности и половозрастных характеристик животных).

Увеличить производительность и обосновать перспективные направления по совершенствованию процесса позволяют ранее проведённые исследования [2–5].

Материал и методы исследования. Системный подход к поиску поставленных задач реализован при рассмотрении процесса получения пуха с позиций сложной биотехнической системы «человек – машина – животное».

В основном были использованы методы исследования операций [6, 7], наблюдения, математической обработки статистических данных и методы математического моделирования.

Материал для исследования получен в хозяйствах Оренбургской области, занимающихся пуховым козоводством (СПК «Донское» Беляевского

района, СПК «Рассвет» Ясененского района), при проведении производственного эксперимента с разработанным в Оренбургском ГАУ механическим вычёсывающим устройством ленточного типа. В ходе эксперимента проводили хронометраж выполнения технологических операций, регистрировали параметры надёжности подсистем «человек» и «машина» [7, 8], оценивали качество выполнения операций, а также качество получаемой продукции – пухового волокна по традиционным и авторским методикам [9, 10].

Результаты исследования. Анализируя процесс вычёсывания пуха из шерстно-пухового покрова коз, подтвердили, что он является частным случаем механической обработки кожного покрова животных [2, 4, 5], поэтому рассматривать его следует как сложную биотехническую систему (БТС) вида «человек – машина – животное». В связи с этим для математического моделирования были выбраны методы, основанные на вероятностно-статистическом принципе. Наиболее близкими к рассматриваемому процессу были марковские процессы с непрерывным временем и дискретным состоянием. Мы приняли, что переходы системы (подсистемы) из одного состояния в другое происходят не в определённые моменты времени, а случайно, предсказать которые заранее сложно. Определённые ограничения и допущения, которые не противоречат экспериментальным и статистическим данным: численное количество состояний систем – величина конечная; для любого момента времени t_0 , ограничения состояний системы в будущем (при $t > 0$) зависят только от состояния системы в настоящем ($t = t_0$) и не зависят от того, когда и как система оказалась в этом состоянии [4, 9].

Для детального и информативного анализа динамики изменений состояний БТС процесс вычёсывания пуха был представлен в виде размеченного графа (рис. 1).

Состояния S_{o1} , S_{y1} , $S_{ж1}$ являются исходными и желательными, соответствуют вершинам размеченного графа. Вероятность пребывания системы $P(S_{o1})$, $P(S_{y1})$, $P(S_{ж1})$ соответствует каждому из состояний S_{o1} , S_{y1} , $S_{ж1}$.

Следует отметить, что в процессе производственного эксперимента работу разработанного устройства сравнивали с гребнем для ручного вычёсывания. Для этого варианта также построен размеченный граф (рис. 2).

На рисунках 1 и 2 обозначения соответствуют определённым состояниям каждой из подсистем.

Подсистема «оператор»:

S_{o1} – оператор выполняет процесс механической обработки пухо-шерстного покрова животного в соответствии с технологией вычёсывания пуха и способствует получению продукции высокого качества; S_{o2} – оператор допускает незначительные нарушения технологического регламента, что вы-

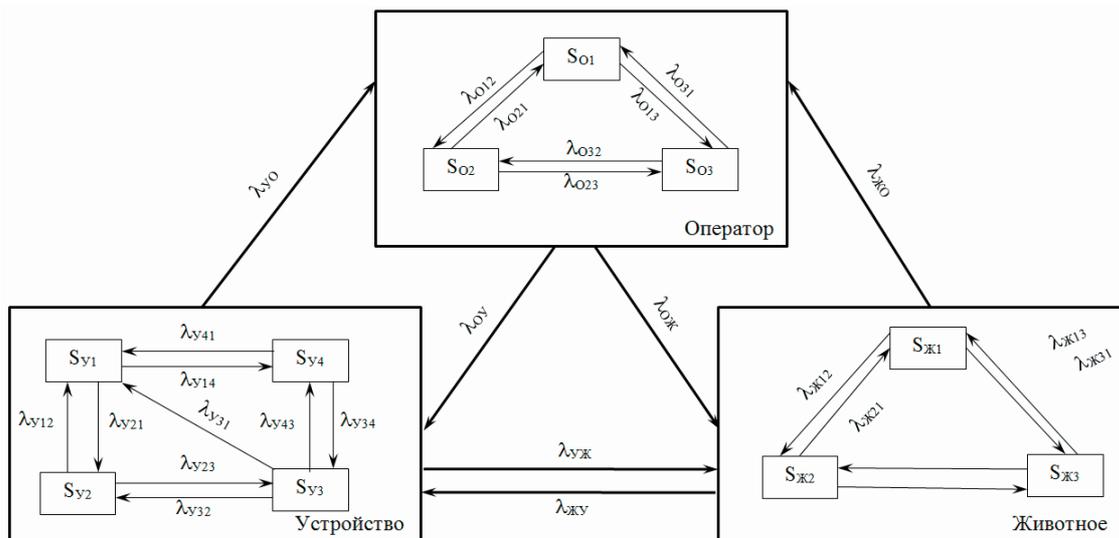


Рис. 1 – Графовая математическая модель состояния БТС процесса вычёсывания пуха коз при использовании механического вычёсывающего устройства ленточного типа

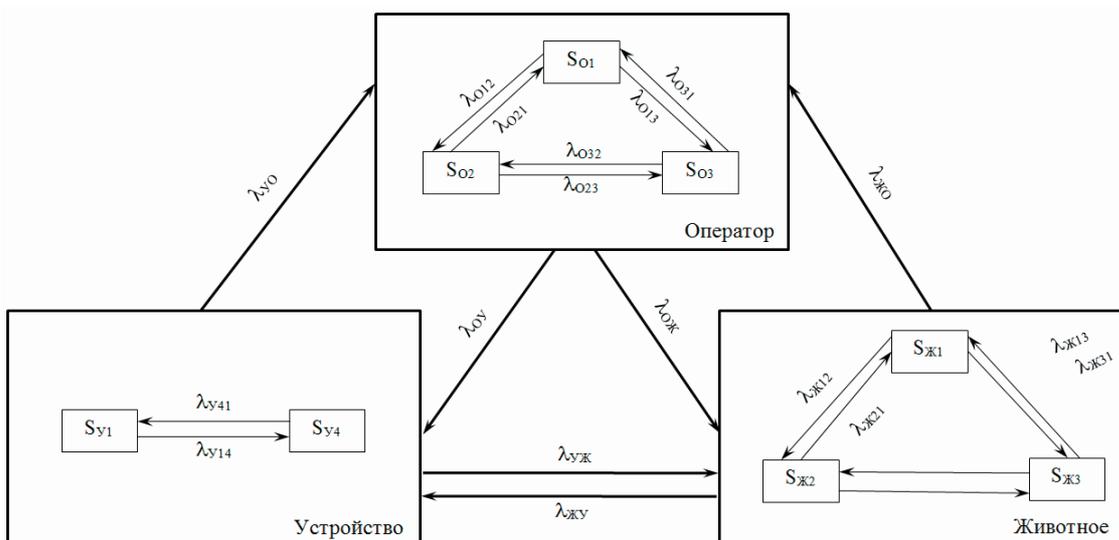


Рис. 2 – Графовая математическая модель состояния БТС процесса вычёсывания пуха коз при использовании традиционного гребня при ручном вычёсывании

зывает снижение качества получаемой продукции; S_{o3} – оператор выполняет технологический регламент с грубыми нарушениями, что приводит к получению продукции низкого качества, нарушению работы подсистемы «устройство», ухудшению физиологического состояния подсистемы «животное».

Подсистема «устройство»:

S_{y1} – устройство в рабочем состоянии, способствует получению продукции высокого качества; S_{y2} – устройство в рабочем состоянии, но требует регулировки конструктивно-режимных параметров, возможно, замены планок с зубьями, получения продукции высокого или среднего качества; S_{y3} – устройство работоспособно, но возникают отка-

зы, снижающие качество получаемой продукции; S_{y4} – устройство неработоспособно.

Подсистема «животное»:

$S_{ж1}$ – физиологическое состояние животного нормальное, способствует получению продукции высокого качества; $S_{ж2}$ – беспокойное состояние животного, но получаемая при этом продукция имеет удовлетворительное качество; $S_{ж3}$ – животное в тревожном состоянии, наблюдается снижение продуктивности и качества получаемой продукции.

Применяя уравнения Колмогорова, получены системы дифференциальных уравнений для вероятностей состояний, которые мы и принимаем за математические модели при механическом (1) и ручном (2) процессе вычёсывания пуха:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP(S_o)}{dt} &= -\lambda_{o12}P(S_{o1}) - \lambda_{o13}P(S_{o1}) + \lambda_{o21}P(S_{o2}) + \lambda_{o31}P(S_{o3}) - \lambda_{o23}P(S_{o2}) + \\ &\quad + \lambda_{o32}P(S_{o3}) - \lambda_{o\text{жс}}P(S_o) + \lambda_{\text{жс}o}P(S_{\text{жс}}) - \lambda_{oy}P(S_o) + \lambda_{yo}P(S_y) \\ \frac{dP(S_{\text{жс}})}{dt} &= -\lambda_{\text{жс}12}P(S_{\text{жс}1}) - \lambda_{\text{жс}13}P(S_{\text{жс}1}) + \lambda_{\text{жс}21}P(S_{\text{жс}2}) + \lambda_{\text{жс}31}P(S_{\text{жс}3}) - \lambda_{\text{жс}23}P(S_{\text{жс}2}) + \\ &\quad + \lambda_{\text{жс}32}P(S_{\text{жс}3}) - \lambda_{o\text{жс}}P(S_o) + \lambda_{\text{жс}o}P(S_{\text{жс}}) - \lambda_{oy}P(S_o) + \lambda_{yo}P(S_y) \\ \frac{dP(S_y)}{dt} &= -\lambda_{y12}P(S_{y1}) - \lambda_{y14}P(S_{y1}) + \lambda_{y41}P(S_{y4}) + \lambda_{y21}P(S_{y2}) + \lambda_{y31}P(S_{y3}) + \\ &\quad + \lambda_{y23}P(S_{y2}) + \lambda_{y34}P(S_{y3}) - \lambda_{y32}P(S_{y3}) - \lambda_{y43}P(S_{y4}) + \\ &\quad - \lambda_{yo}P(S_y) + \lambda_{oy}P(S_o) - \lambda_{y\text{жс}}P(S_y) + \lambda_{\text{жс}y}P(S_{\text{жс}}) \\ P(S_o) + P(S_{\text{жс}}) + P(S_y) &= 1 \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

где λ_{ij} – интенсивность перехода подсистемы из состояния S_i в состояние S_j .

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP(S_o)}{dt} &= -\lambda_{o12}P(S_{o1}) - \lambda_{o13}P(S_{o1}) + \lambda_{o21}P(S_{o2}) + \lambda_{o31}P(S_{o3}) - \lambda_{o23}P(S_{o2}) + \\ &\quad + \lambda_{o32}P(S_{o3}) - \lambda_{o\text{жс}}P(S_o) + \lambda_{\text{жс}o}P(S_{\text{жс}}) - \lambda_{oy}P(S_o) + \lambda_{yo}P(S_y) \\ \frac{dP(S_{\text{жс}})}{dt} &= -\lambda_{\text{жс}12}P(S_{\text{жс}1}) - \lambda_{\text{жс}13}P(S_{\text{жс}1}) + \lambda_{\text{жс}21}P(S_{\text{жс}2}) + \lambda_{\text{жс}31}P(S_{\text{жс}3}) - \lambda_{\text{жс}23}P(S_{\text{жс}2}) + \\ &\quad + \lambda_{\text{жс}32}P(S_{\text{жс}3}) - \lambda_{o\text{жс}}P(S_o) + \lambda_{\text{жс}o}P(S_{\text{жс}}) - \lambda_{oy}P(S_o) + \lambda_{yo}P(S_y) \\ \frac{dP(S_y)}{dt} &= -\lambda_{y12}P(S_{y1}) + \lambda_{y21}P(S_{y2}) - \lambda_{y\text{жс}}P(S_y) + \lambda_{\text{жс}o}P(S_o) - \lambda_{y\text{жс}}P(S_y) + \lambda_{\text{жс}y}P(S_{\text{жс}}) \\ P(S_o) + P(S_{\text{жс}}) + P(S_y) &= 1 \end{aligned} \right. . \quad (2)$$

Решение систем возможно при задании начальных условий. Принимаем, что в начальный момент времени БТС находится в наиболее благоприятном состоянии, которому соответствуют вершины графов в каждой из подсистем: S_{o1} , S_{y1} , $S_{\text{жс}1}$, тогда все остальные вероятности $P(S_{(o, y, \text{жс})})$ будут равны 0.

В теории марковских случайных процессов [6, 7] доказываем, что, если число возможных состояний системы n конечно, то из каждого из них (за конечное число шагов) можно перейти в другое. Следовательно, имеются финальные вероятности $P(S_{(o, y, \text{жс})})$. Предельный стационарный режим в БТС устанавливается при $t \rightarrow \infty$, при котором система случайным образом меняет свои состояния, но их вероятности уже не зависят от времени. Но так как вероятности постоянные, то их производные равны нулю. Следовательно, для нахождения финальных вероятностей нужно все левые части уравнений системы дифференциальных уравнений приравнять к нулю, в результате получается система линейных алгебраических уравнений.

Тогда для подсистемы «оператор» получим:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 - \lambda_{12}P_1 - \lambda_{13}P_1 &= 0 \\ \lambda_{12}P_1 + \lambda_{32}P_3 - \lambda_{21}P_2 - \lambda_{23}P_2 &= 0 \\ \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2 - \lambda_{31}P_3 - \lambda_{32}P_3 &= 0 \\ P_1 + P_2 + P_3 &= 1 \end{aligned} \right. . \quad (3)$$

Значения величин интенсивности переходов λ_{ij} представлены в таблице 1. Они получены в результате производственного наблюдения в ходе съёмки и обработки хронометража технологического процесса вычёсывания пуха.

1. Интенсивность переходов в подсистеме «оператор»

λ_o	λ_{o12}	λ_{o21}	λ_{o13}	λ_{o31}	λ_{o23}	λ_{o32}
Значение при механическом вычёсывании, (ч)	0,37	0,17	0,83	0,33	0,17	0,13
Значение при ручном вычёсывании, (ч)	0,4	0,33	0,9	0,85	0,33	0,38

Для подсистемы «устройство» получены две системы – при механическом (4) и ручном (5) вычёсывании:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{41}P_4 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 - \lambda_{12}P_1 - \lambda_{14}P_1 &= 0 \\ \lambda_{12}P_1 + \lambda_{32}P_3 - \lambda_{21}P_2 - \lambda_{23}P_2 &= 0 \\ \lambda_{23}P_2 + \lambda_{43}P_4 - \lambda_{32}P_3 - \lambda_{31}P_3 - \lambda_{34}P_3 &= 0, \\ \lambda_{14}P_1 + \lambda_{34}P_3 - \lambda_{41}P_4 - \lambda_{43}P_4 &= 0 \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 &= 1 \end{aligned} \right. , \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{41}P_4 - \lambda_{14}P_1 &= 0 \\ P_1 + P_4 &= 1 \end{aligned} \right. . \quad (5)$$

В таблицах 2 и 3 представлены значения интенсивности переходов в подсистемах «устройство» и «животное».

Система алгебраических выражений (6) для подсистемы «животное» имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 - \lambda_{12}P_1 - \lambda_{13}P_1 &= 0 \\ \lambda_{12}P_1 + \lambda_{32}P_3 - \lambda_{21}P_2 - \lambda_{23}P_2 &= 0 \\ \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2 - \lambda_{31}P_3 - \lambda_{32}P_3 &= 0 \\ P_1 + P_2 + P_3 &= 1 \end{aligned} \right. . \quad (6)$$

Решение систем линейных уравнений позволило получить значения вероятности пребывания под-

2. Интенсивность переходов в подсистеме «устройство»

λ_{ν}	$\lambda_{\nu 12}$	$\lambda_{\nu 21}$	$\lambda_{\nu 31}$	$\lambda_{\nu 14}$	$\lambda_{\nu 41}$	$\lambda_{\nu 23}$	$\lambda_{\nu 32}$	$\lambda_{\nu 34}$	$\lambda_{\nu 43}$
Значение при механическом вычёсывании, (ч)	0,67	0,25	0,67	2	4,42	0,67	0,25	0,67	0,25
Значение при ручном вычёсывании, (ч)	–	–	–	0,67	1,72	–	–	–	–

3. Интенсивность переходов в подсистеме «животное»

λ_o	λ_{12}	λ_{21}	λ_{13}	λ_{31}	λ_{23}	λ_{32}
Значение при механическом вычёсывании, (ч)	0,08	0,08	0,17	0,12	0,17	0,3
Значение при ручном вычёсывании, (ч)	0,5	0,17	0,83	0,5	0,5	0,22

систем в том или ином состоянии, а это, в свою очередь, позволяет проанализировать результаты расчётов и сделать соответствующие выводы.

Так, при решении системы уравнений (3) для подсистемы «оператор» получены следующие вероятности: при вычёсывании механическим устройством $P(S_{O1})=55\%$, $P(S_{O2})=25\%$, $P(S_{O3})=20\%$, а при ручном вычёсывании – соответственно $P(S_{O1})=36\%$, $P(S_{O2})=30\%$, $P(S_{O3})=34\%$. Эти результаты можно интерпретировать следующим образом: оператор (чесальщик) при механическом вычёсывании с вероятностью 55% будет находиться в состоянии S_{O1} , желательном для функционирования БТС, а при ручном вычёсывании эта вероятность составляет всего 36%. Следовательно, механизация процесса и повышение квалификации оператора будут способствовать эффективному функционированию БТС в целом. Ещё один резерв повышения вероятности – оптимизация по времени всех технологических операций и неукоснительное соблюдение режимов труда и отдыха для оператора.

Для подсистемы «устройство» решены системы уравнений (4) и (5): при механическом вычёсывании вероятности пребывания БТС в том или ином состоянии – $P(S_{\nu 1})=41\%$, $P(S_{\nu 2})=33\%$, $P(S_{\nu 3})=15\%$, $P(S_{\nu 4})=11\%$, а при ручном вычёсывании $P(S_{\nu 1})=72\%$ и $P(S_{\nu 4})=28\%$. Анализируя полученные результаты, мы пришли к выводу, что степень надёжности ручного гребня несколько выше, чем у разработанного механического вычёсывающего устройства ленточного типа. Поэтому необходимо проводить целенаправленные исследования по совершенствованию конструкции устройства или отдельных его узлов, используя при этом более износостойкие материалы.

Подсистема «животное» оказалась наименее управляемой. В варианте механического вычёсывания вероятности нахождения в том или ином состоянии составляют $P(S_{\nu 1})=28\%$, $P(S_{\nu 2})=43\%$, $P(S_{\nu 3})=29\%$ а при ручном вычёсывании – $P(S_{\nu 1})=21\%$, $P(S_{\nu 2})=32\%$, $P(S_{\nu 3})=47\%$. Анализ показывает, что в первом случае вероятность нахождения животного в состоянии, когда возможно получение качественного волокна, составляет 71%,

в то время как при втором варианте (ручной чёске) для животного эта вероятность всего 53%. Это свидетельствует о том, что при длительном воздействии на шерстно-пуховый покров козы животное испытывает болевые ощущения, дискомфорт, стресс. Эти негативные моменты могут привести в будущем к снижению продуктивности и сказаться на физиологическом состоянии животного.

Выводы. Предложенная математическая модель обосновывает возможность использования марковских случайных процессов при описании сложных биотехнических систем. Полученные результаты моделирования позволяют выявить перспективные направления по повышению эффективности процесса механического вычёсывания пуха у коз. Определены уязвимости в подсистемах «оператор» и «устройство». Сформулированные предположения согласуются с результатами исследований отечественных учёных, занимающихся проблемами получения высококачественного пуха коз.

Литература

1. Маслов М.Г., Петрова Г.В. Состояние и перспективы развития животноводства Оренбургской области // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 4 (60). С. 120–124.
2. Хлопко Ю.А., Осипова А.М. Математическая модель функционирования биотехнической системы процесса механической стрижки овец // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=21349> (дата обращения: 26.10.2016).
3. Хлопко Ю.А., Ротова В.А., Осипова А.М. Перспективные направления совершенствования процесса чёски пуха коз с позиции сложной биотехнической системы «человек – машина – животное» // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15109> (дата обращения: 26.10.2016).
4. Хлопко Ю.А., Осипова А.М. Математическая модель функционирования биотехнической системы процесса механической обработки кожного покрова животного // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-3. С. 534–539.
5. Поздняков В.Д., Ротова В.А., Салыкова О.С. К вопросу исследования сложных биотехнических систем // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. № 1 (39). С. 36–37.
6. Венцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
7. Карташов Л.П., Соловьёв С.А. Повышение надёжности системы «человек – машина – животное». Екатеринбург: УрО РАН, 2000.
8. Хлопко Ю.А. Процессы механической обработки кожных покровов животных с позиции биотехнической системы «человек – машина – животное» // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012. Вып. 96. С. 342–346.
9. Карташов Л.П., Соловьёв С.А., Шахов В.А. Лабораторные стенды для испытания животноводческой техники. М.: Колос, 2009. 116 с.
10. Хлопко Ю.А. Повышение эффективности процесса стрижки овец и вычёсывания пуха коз / Ю.А. Хлопко, В.А. Ротова, А.М. Осипова, Д.Ю. Драницин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2013. № 3. С. 224–228.