

5. Krum, V. A. Intensifikatsiia protsessa separatsii gorizontalnym tsilindricheskim reshetom s avtozonansnym rezhimom dvizheniia obrabatyvaemogo zerna: avto-ref. diss... kand. tekhn. nauk / V. A. Krum. – Novosibirsk, SFNTsA RAN, 2020. – 24 s.

6. Patrin, V. A. Vlianie vida dvizheniia zernovogo vorokha v gorizontalnem tsilindricheskom reshete na intensivnost protsessa separatsii / V. A. Patrin, V. A. Krum // Vestnik NGAU (Novosibirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet). –

2014. – No. 4 (33). – С. 168-173. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23873203>.

7. Sorochenko, S. F. Obosnovanie parametrov reshetno-vintovogo separatora v sisteme oчитki zernouborochnogo kombaina: diss ... kand. tekhn. nauk / Sorochenko Sergei Fedorovich. – Barnaul, 1996. – 210 s.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям по программе «УМНИК-2021».



УДК 636.034

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-233-3-98-103

С.В. Речкин, А.П. Сырбаков, В.А. Ротова
S.V. Rechkin, A.P. Syrbakov, V.A. Rotova

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПАСТБИЩНОГО ЖИВОТНОВОДСТВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

MATHEMATICAL MODELING OF PASTURE LIVESTOCK FARMING PROCESS USING DIGITAL TECHNOLOGIES

Ключевые слова: цифровые технологии, культурное пастбище, биотехническая система, Марковский процесс, пастбищное животноводство, математическое моделирование.

Цифровизация технологических процессов в сельском хозяйстве является важным аспектом получения высококачественной и конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции. В настоящее время существует потребность в разработке и применении цифровых решений, основанных на математическом моделировании, для оптимизации процессов и принятия информированных решений в области пастбищного животноводства. Применение современных цифровых и информационных процессов в пастбищном животноводстве сопряжено с разработкой и обоснованием функционирования сложной биотехнической системы «Человек (оператор) – машина (устройство) – животное». Было проведено математическое моделирование функционирования системы с использованием случайных Марковских процессов, которые часто применяются в теории массового обслуживания. Предложена графовая модель для изучаемой биотехнической системы, а также система дифференциальных уравнений, которые описывают ее математическую модель. Решение этих уравнений позволяет нам эффективно выявлять проблемные участки функционирования системы в целом и оценивать надежность работы отдельных ее компонентов. Благодаря этому на этапе проектирования технических решений возможно легко устранять или минимизировать эти проблемные моменты, что позволит получать продукцию высокого ка-

чества с минимальными затратами ручного труда и временными издержками. Оценка надежности работы звена «машина» способствует выявлению первоочередных технических проблем, решение которых возможно на этапе проектирования и испытания технического устройства. Моделирование пастбищного животноводства позволяет предсказать показатели продуктивности животных, потребности в кормах, а также оценить влияние изменений в условиях содержания на результативность производства.

Keywords: digital technologies, plantation pasture, biotechnical system, Markov process, pasture livestock farming, mathematical modeling.

The digitalization of technological processes in agriculture is an important aspect of obtaining high-quality and competitive agricultural products. Currently, there is a need for the development and application of digital solutions based on mathematical modeling to optimize processes and make informed decisions in the field of pasture livestock farming. The application of modern digital and information processes in pasture livestock farming is associated with the development and justification of the functioning of a complex biotechnical system "human (operator) - machine (device) - animal." In this study, mathematical modeling of the system operation using random Markov processes often used in queuing theory was conducted. A graph model for the studied biotechnical system was proposed as well as a system of differential equations that described its mathematical model. Solving these equations allows to effectively identifying the problem areas of the system op-

eration as a whole and evaluating the reliability of the individual components. This, in turn, makes it easy to eliminate or minimize these problem areas at the stage of designing technical solutions, resulting in high-quality production with minimal manual labor and time costs. The evaluation of the reliability of the "machine" link helps to identify priority

technical issues that may be addressed at the stage of design and testing of the technical device. Modeling pasture livestock farming allows predicting animal productivity indices, feed requirements, and evaluating the impact of changes of the environmental conditions on production efficiency.

Речкин Сергей Васильевич, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, г. Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: sto.111@mail.ru.

Сырбаков Андрей Павлович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, г. Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: sirbakovap@yandex.ru.

Ротова Виктория Анзорьевна, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ, г. Оренбург, Российская Федерация, e-mail: rotova_va@mail.ru.

Rechkin Sergey Vasilevich, Asst. Prof., Novosibirsk State Agricultural University, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: sto.111@mail.ru.

Syrbakov Andrey Pavlovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Novosibirsk State Agricultural University, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: sirbakovap@yandex.ru.

Rotova Viktoriya Anzorevna, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Orenburg State Agricultural University, Orenburg, Russian Federation, e-mail: rotova_va@mail.ru.

Введение

Цифровизация технологических процессов в сельском хозяйстве играет важную роль в получении высококачественной и конкурентоспособной продукции. Широкое использование информационных технологий позволяет автоматизировать процессы, снизить затраты труда и повысить энергоэффективность. В агропромышленном комплексе активно развивается цифровая составляющая, поддерживаемая рядом целевых программ и стратегий развития. Важными направлениями в этой области являются инновационные технологии в пастбищном животноводстве, которые позволяют повысить продуктивность и эффективность производства.

Использование природных возобновляемых ресурсов, таких как пастбищные угодья, считается приоритетным. Пастбищное содержание скота способствует их активности, улучшает их здоровье и может привести к увеличению удоя коров до 1500-2000 кг молока, тем самым обеспечивая до 50% производимого молока за год [1, 2].

В настоящее время для формирования культурных пастбищ существуют традиционные методы, такие как стационарные перегородки и электрические изгороди [3, 4], которые в связи своей недостаточной мобильности требуют больших трудозатрат на сборку и установку.

В свете этих недостатков внедрение цифровых технологий в систему пастбищного животноводства становится необходимостью. В результате внедрения цифровых технологий в систему пастбищного животноводства можно достичь более точного и эффективного контроля движения животных, а также повысить продуктивность продукции животноводства [5].

Цель работы – математическое моделирование процесса пастбищного животноводства с использованием цифровых технологий. Исследование направлено на разработку и применение цифровых решений, которые могут улучшить процесс пастбищного животноводства, повысить качество и конкурентоспособность сельскохозяйственной продукции.

Объект и методы исследования

При рассмотрении процесса выпаса животных на культурных пастбищах при использовании цифровых технологий использован системный подход к поиску поставленных задач сложной биотехнической системы «Человек – машина – животное».

Объектом исследования является процесс пастбищного животноводства при использовании цифровых технологий.

Методы, которые использовались в ходе исследования, включали изучение операций [6], наблюдение и математическую обработку статистических данных.

Существует множество методов математического описания сложных систем [7, 8]. Нами выбраны методы, которые основаны на вероятностно-статистическом принципе. В частности, использовали Марковские процессы с дискретным состоянием и непрерывным временем. Однако при их использовании были сделаны некоторые предположения: считаем, что переход системы из одного состояния в другое происходит в случайные моменты времени, и эти моменты невозможно предсказать; количество возможных состояний системы ограничено; для каждого момента времени t_0 , вероятность произвольного состояния системы в будущем (при

t_0) зависит только от текущего состояния системы ($t=t_0$) и не зависит от того, как и когда система пришла в это состояние.

Экспериментальная часть

Из проведенного анализа существующих технических решений при организации культурных пастбищ можно сделать вывод, что не одно из рассмотренных решений не позволяет в достаточной мере использовать существующие информационно-цифровые технологии. В рассматриваемом регионе использования культурных пастбищ (Новосибирской области) большая часть (98%) сельскохозяйственных территорий оцифрована, т.е. имеются точные координаты расположения посевных площадей, пастбищ, лесов, рек и водоемов, что позволяет использовать в высокой степени системы позиционирования в пространстве (GPS, ГЛОНАСС). Мы предлагаем следующее техническое решение, состоящее из нескольких блоков:

- информационный блок, который определяет участок культурного пастбища, на котором проводится выпас животных и позволяет задать координаты этого участка;

- блок отслеживания местоположения животных и реагирования (принятия решения) в случае, если животное покидает заданный участок выпаса;

- блок воздействия (ошейник животного) на животное);

- блок мониторинга (квадрокоптер с видеокамерой и передающим устройством).

На основании исходных данных (поголовье, нормы выпаса, урожайность травостоя, координаты культурного пастбища) информационным блоком рассчитываются площадь участка для выпаса и его координаты. У животных на шею крепится блок воздействия, состоящий из GPS датчика, приемника-передатчика данных, электродов и аккумуляторной батареи. GPS датчик определяет положение животного, передает через приемник-передатчик данных информацию на блок отслеживания и реагирования. В случае если животное приближается к границе участка выпаса, блок отслеживания и реагирования подает обратный сигнал на ошейник животного, в результате которого на электроды подается очередь разрядов малой мощности. В результате болевого ощущения животное меняет направление движения от границ участка. При пересечении предела участка выпаса на элект-

роды подается очередь более интенсивных разрядов большей мощности, что заставляет вернуться животного на участок. Для оперативного контроля предусмотрен блок мониторинга – на квадрокоптер передаются координаты полета (формируются информационным блоком, блоком сравнения и реагирования). В режиме реального времени квадрокоптер направляется в зону выпаса для наблюдения за обстановкой, при этом передавая видеосигнал с камеры. Таким образом, нет необходимости в стационарном ограждении культурного пастбища (облегчает механическую обработку, отсутствуют затраты на стационарные ограждения, не требуется электрификация территории), площадь выпаса строго ограничена, а настройка системы контроля за выпасом позволяет минимизировать трудовые затраты.

Предложенное техническое решение можно представить в виде сложной биотехнической системы вида «Человек – машина – животное». Подсистема «Человек – оператор» выполняет настройку, оперативный контроль за подсистемами «Машина» и «Животное» (рис.).

На рисунке представлена графовая модель состояния биотехнической системы. Вершины графа соответствуют состояниям S_{01} , S_{y1} , $S_{ж1}$. Эти состояния являются исходными и наиболее предпочтительными. Вероятность нахождения системы в каждом из этих состояний равна $P(S_{01})$, $P(S_{y1})$, $P(S_{ж1})$.

Подсистема «Оператор» включает в себя два состояния: S_{01} и S_{02} . Состояние S_{01} является наиболее подходящим для оператора, который выполняет настройку и оперативный контроль в соответствии с технологическим регламентом. Это позволяет получать продукцию наилучшего качества. В состоянии S_{02} оператор не всегда придерживается правил технологического процесса или совершает ошибки, что отрицательно сказывается на работе системы.

Подсистема «Устройство» состоит из трех состояний: S_{y1} , S_{y2} и S_{y3} . В состоянии S_{y1} устройство работает правильно и обеспечивает производство качественной продукции. В состоянии S_{y2} устройство работает, но нуждается в дополнительной настройке со стороны оператора или обновлении данных. Основные функции устройства выполняются, и качество продукции остается хорошим, хотя возможны небольшие нарушения технологического регламента. В состоянии S_{y3} устройство неработоспособно и

требует значительного вмешательства подсистемы «Оператор» для восстановления нарушенных связей.

Подсистема «Животное» имеет два состояния: $S_{Ж1}$ и $S_{Ж2}$. Состояние $S_{Ж1}$ способствует хорошему физиологическому состоянию животного, что влияет на хорошее качество получаемой продукции. С наступлением $S_{Ж2}$ животное находится в стрессе, что оказывает негативное влияние на его продуктивность и качество выпускаемой продукции.

Л.П. Карташов, Л.В. Погорелова и М.М. Лученко в ходе исследований выявили возможные переходы между различными состояниями подсистем [9].

При расчете вероятностей состояний были использованы уравнения Колмогорова [6]. Дифференциальные уравнения (1) были выведены на их основе и приняты за математическую модель процесса выпаса животных на культурных пастбищах при применении цифровых технологий.

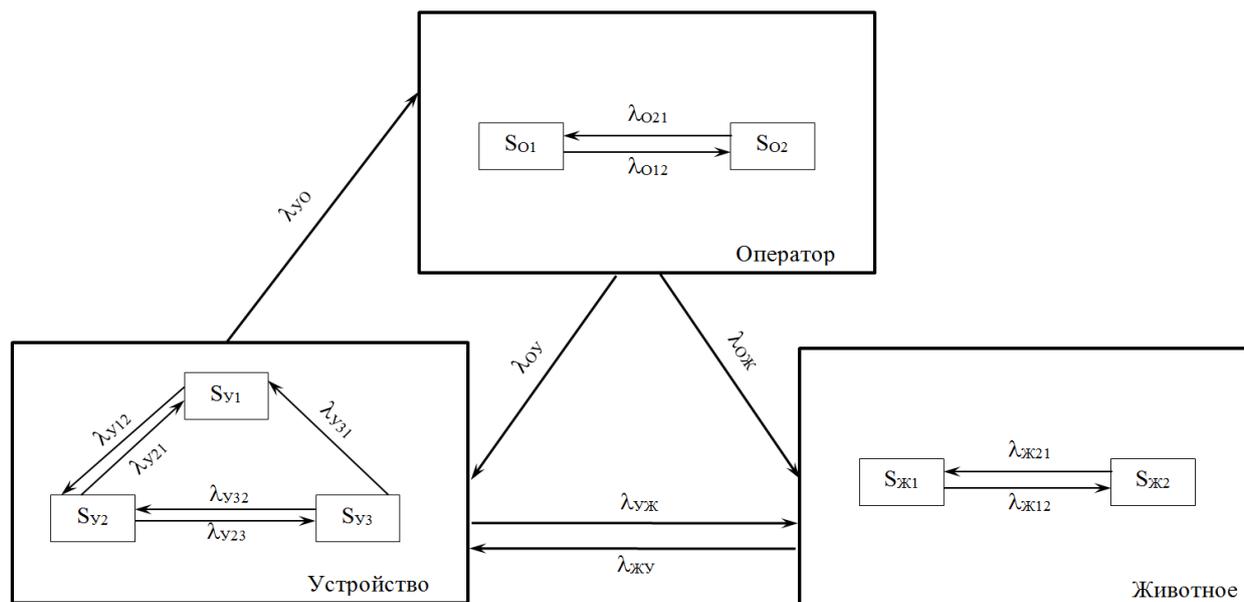


Рис. Состояния биотехнической системы процесса выпаса животных на культурных пастбищах при использовании цифровых технологий (графовая математическая модель)

$$\begin{cases} \frac{dP(S_O)}{dt} = -\lambda_{O12}P(S_{O1}) + \lambda_{O21}P(S_{O2}) - \lambda_{OЖ}P(S_O) - \lambda_{OY}P(S_O) + \lambda_{YO}P(S_Y) \\ \frac{dP(S_Y)}{dt} = -\lambda_{Y12}P(S_{Y1}) + \lambda_{Y31}P(S_{Y3}) + \lambda_{Y21}P(S_{Y2}) - \lambda_{Y23}P(S_{Y2}) + \\ + \lambda_{Y32}P(S_{Y3}) - \lambda_{YЖ}P(S_Y) - \lambda_{YO}P(S_Y) + \lambda_{ЖY}P(S_{Ж}) + \lambda_{OY}P(S_O) , \\ \frac{dP(S_{Ж})}{dt} = -\lambda_{Ж12}P(S_{Ж1}) + \lambda_{Ж21}P(S_{Ж2}) - \lambda_{ЖY}P(S_{Ж}) + \lambda_{YЖ}P(S_Y) + \lambda_{OЖ}P(S_O) \end{cases} \quad (1)$$

$$P(S_O) + P(S_Y) + P(S_{OЖ}) = 1$$

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

Эти уравнения можно решить при выполнении начальных условий. Предполагается, что в начальный момент система находится в исходном состоянии S_1 , поэтому все остальные вероятности состояний равны 0. Доказывается, что количество возможных состояний n , конечно, и система может перейти из любого состояния в другое за конечное число шагов. Исходя из этого предположения существуют финальные вероятности для каждой подсистемы $P(S_{(O,Y,Ж)})$. В

предельном стационарном режиме биотехнической системы при $t \rightarrow \infty$ система случайно меняет свои состояния, однако их вероятности не зависят от времени. Мы приняли допущение о том, что вероятности являются постоянными, поэтому их производные равняются 0. Приравняв левые части всех уравнений системы дифференциальных уравнений к 0, мы получаем систему линейных алгебраических уравнений для подсистем «Оператор» и «Животное»:

$$\begin{cases} \lambda_{21}P_2 - \lambda_{12}P_1 = 0; \\ P_1 + P_2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

для подсистемы «Устройство»:

$$\begin{cases} \lambda_{31}P_3 + \lambda_{21}P_2 - \lambda_{12}P_1 = 0 \\ \lambda_{12}P_1 + \lambda_{32}P_3 - \lambda_{21}P_2 - \lambda_{23}P_3 = 0 \\ \lambda_{23}P_2 - \lambda_{31}P_3 - \lambda_{32}P_3 = 0 \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Используя замены и упрощения в системах уравнений (2) и (3), а также задавшись интенсивностями переходов подсистем из одного состояния в другое, были определены вероятности нахождения каждой подсистемы в рассматриваемых состояниях, а также была оценена надежность работы каждой из подсистем. Значения интенсивностей переходов λ_{ij} зависят от ряда условий: квалификации и опыта оператора, надежности передачи управляющих сигналов в подсистеме «Устройство», стрессоустойчивости животного, состояния культурного пастбища.

Таким образом, используя интенсивности перехода (определялись опытным путем, проведением хронометража, наблюдением за поведением животных), мы определили вероятности нахождения каждой подсистемы в различных состояниях и оценили надежность работы каждой подсистемы.

Для подсистемы «Оператор» получены следующие значения вероятностей: $P(S_{O1})=0,85$, $P(S_{O2})=0,15$. Это значит, что оператор с вероятностью 85% будет находиться в состоянии, когда он выполняет настройку и контроль в соответствии с регламентом и обеспечивает получение продукции высокого качества. Таким образом, обеспечиваются стабильная работа всей системы и максимальная объем продукции высокого качества.

Наиболее проблемной является подсистема «Устройство», так как содержит комплекс технических решений, от слаженности которого зависит вероятность нахождения подсистемы в желаемом состоянии $P(S_{Y1})=0,60$, а в других рассматриваемых состояниях $P(S_{Y2})=0,35$ и $P(S_{Y3})=0,05$ соответственно. Анализ работы этой подсистемы свидетельствует о зависимости качества функционирования от ряда условий: стабильности передачи данных от блока воздействия (ошейник животного) к блоку отслеживания местоположения животных и принятия решения, а также слаженности в работе алгоритмов этих блоков. Наиболее стабильную работу подсистемы наблюдали после тщательной отладки программного обеспечения блоков.

Наименее предсказуемая подсистема «Животное», вероятности $P(S_{Ж1})=0,55$, $P(S_{Ж2})=0,45$.

Поведение животного зависело в большей степени от состояния культурного пастбища (урожайности того или иного участка), погодных условий, внешних раздражающих факторов, длительности адаптационного периода.

Наиболее важным в полученных результатах является определение проблемных (наиболее надежных) вариантов состояний системы в целом. Повышение квалификации оператора и получение навыков действий в тех или иных условиях позволит минимизировать потери продуктивности животных на этапе адаптации.

Животных перед началом пастбищного сезона (за 1-2 недели) нужно приучать к ошейнику и возможным ограничениям по нахождению на открытом (не огороженном) пространстве; устанавливать качественные GPS датчики, с минимальным запаздыванием по передаче сигнала; тщательно проводить мониторинг состояния культурного пастбища и корректно задавать координаты участка для выпаса.

Выводы

1. Цифровизация технологических процессов в сельском хозяйстве является важным аспектом достижения высокой качественной и конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции.

2. Применение цифровых технологий позволяет минимизировать производственные вопросы на этапе проектирования технических решений при организации процессов выпаса животных на культурных пастбищах.

3. Разработаны графовая модель и система дифференциальных уравнений, описывающих математическую модель биотехнической системы «Человек (оператор) – машина (устройство) – животное».

4. При работе подсистемы «Оператор» вероятность составила: $P(S_{O1})=0,85$, $P(S_{O2})=0,15$, что позволяет оператору с вероятностью 85% находиться в состоянии, когда он выполняет настройку и контроль в соответствии с регламентом, обеспечивая получение продукции высокого качества. Таким образом, обеспечиваются стабильная работа всей системы и максимальная объем продукции высокого качества.

5. Работа подсистемы «Устройство» свидетельствует о зависимости качества функционирования от ряда условий: стабильности передачи данных от блока воздействия (ошейник животного) к блоку отслеживания местоположения

животных и принятия решения, а также слаженности в работе алгоритмов этих блоков. Вероятность нахождения подсистемы в желаемом состоянии $P(S_{y1})=0,60$, а в других рассматриваемых состояниях – $P(S_{y2})=0,35$ и $P(S_{y3})=0,05$ соответственно.

6. При работе подсистемы «Животное» вероятность составила $P(S_{ж1})=0,55$, $P(S_{ж2})=0,45$. В большей степени зависит от состояния культурного пастбища (урожайности того или иного участка), погодных условий, внешних раздражающих факторов, длительности адаптационного периода.

Библиографический список

1. Роботы для животноводства (краткий аналитический обзор): учебное пособие / составитель Л. П. Карташов. – Оренбург: Изд-кий центр ОГАУ, 2015. – 192 с. – Текст: непосредственный.
2. Тихомиров, И. А. Повышение эффективности технологии производства молока в летний пастбищный период / И. А. Тихомиров. – Текст: непосредственный // Техника и технологии в животноводстве. – 2020. – № 1. – С. 38-44.
3. А. с. 195768 СССР, МПК А Электрическая изгородь для пастбы животных / А. Г. Бернис (СССР). – 1071624/30-15; заявл. 21.04.1966; опубл. 04.05.1967, Бюл. № 10. – Текст: непосредственный.
4. Патент 2704851 Российская Федерация, МПК А01К 3/00 (2006.01). Блок ограждения загона для содержания сельскохозяйственных животных / Лебедев А. Т., Очинский В. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Ставропольский гос. аграрный университет. – № 2019100170; заявл. 09.01.2019; опубл. 31.10.2019, Бюл. № 31. – Текст: непосредственный.
5. Sørensen, C., Fountas, S., Nash, E., et al. (2010). Conceptual model of a future farm management information system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 72. 37-47. DOI: 10.1016/j.compag.2010.02.003.
6. Таха, Х. А. Введение в исследование операций / Х. А. Таха. – Москва: Изд-кий дом «Вильямс», 2001. – 192 с. – Текст: непосредственный.
7. Карташов, Л. П. Повышение надежности системы «человек-машина-животное» / Л. П. Карташов, С. А. Соловьев – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 168 с. – Текст: непосредственный.
8. Карташов, Л. П. Параметрический и структурный синтез технологических объектов на основе системного подхода и математического моделирования / Л. П. Карташов, Т. М. Зубкова – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 126 с. – Текст: непосредственный.
9. Погорельый, Л. В. Биотехнические системы в животноводстве / Л. В. Погорельый, М. М. Луценко – Киев: Урожай, 1992. – 212 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Roboty dlia zhivotnovodstva (kratkii analiticheski obzor): uchebnoe posobie / sost. L.P. Kartashov. – Orenburg: Izdatelskii tsentr OGAU, 2015. – 192 s.
2. Tikhomirov I.A. Povyszenie effektivnosti tekhnologii proizvodstva moloka v letnii pastbishchnyi period / I.A. Tikhomirov // Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve. – 2020. – No. 1. – S. 38-44.
3. A.s. 195768 SSSR, MPK A Elektricheskaia izgorod dlia pastby zhivotnykh / Bernis A.G. (SSSR). – 1071624/30-15 zaiavl. 21.04.1966; opubl. 04.05.1967, Biul. No. 10.
4. Pat. 2704851 Rossiiskaia Federatsiia, MPK A01K 3/00 (2006.01). Blok ograzhdeniia zagona dlia sodержaniia selskokhoziaistvennykh zhivotnykh / Lebedev A.T., Ochinskii V.V i dr.; zaiavitel i patentoobladatel Stavropolskii gos. agrarnyi universitet. – No. 2019100170; zaiavl. 09.01.2019; opubl. 31.10.2019, Biul. No. 31.
5. Sørensen, C., Fountas, S., Nash, E., et al. (2010). Conceptual model of a future farm management information system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 72. 37-47. DOI: 10.1016/j.compag.2010.02.003.
6. Takha Kh.A. Vvedenie v issledovanie operatsii / Kh.A. Takha. – Moskva: Izd. dom «Viliams», 2001. – 192 s.
7. Kartashov L.P. Povyszenie nadezhnosti sistemy «chelovek-mashina-zhivotnoe» / L.P. Kartashov, S.A. Solovev. – Ekaterinburg: UrO RAN, 2000. – 168 s.
8. Kartashov L.P. Parametricheskii i strukturnyi sintez tekhnologicheskikh obieektov na osnove sistemnogo podkhoda i matematicheskogo modelirovaniia / L.P. Kartashov, T.M. Zubkova. – Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. – 126 s.
9. Pogorelyi L.V. Biotekhnicheskie sistemy v zhivotnovodstve / L.V. Pogorelyi, M.M. Lutsenko – Kiev: Urozhai, 1992. – 212 s.

