

*На правах рукописи*



**Афанасьев Михаил Анатольевич**

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
МОЛОДНЯКА ОВЕЦ**

Специальность 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование  
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Краснодар – 2023**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ)

Научный руководитель **Рубцова Елена Ивановна**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Будаговский Андрей Валентинович**  
доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», заведующий научно-исследовательской проблемной лабораторией "Биофотоника" (г. Мичуринск);

**Юран Сергей Иосифович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет» (УдГАУ), кафедра автоматизированного электропривода (г. Ижевск)

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова» (г. Элиста)**

Защита состоится 28 июня 2023 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, корпус факультета энергетики, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент  
Самурганов Евгений Ерманекосович



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Сегодня в овцеводстве большое внимание уделяется увеличению мясной продуктивности и улучшение ее качества. Особую актуальность имеет направление исследований по выращиванию здоровых, жизнеспособных животных. В настоящее время имеется множество разработок по влиянию биофизических факторов на важнейшие адаптивные системы организма, стимулированию продуктивности, повышению резистентности животных.

Использование электротехнологических способов, направленных на повышение продуктивности молодняка овец, является перспективным направлением исследований в овцеводстве. Недостаточная изученность данных способов и отсутствие адаптированного к реальным производствам оборудования приводит к нестабильным результатам, к повышенным срокам внедрения новых технологий.

Работа выполнялась в ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» согласно тематическому плану проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на 2016–2020 гг., согласно госбюджетной теме НИР во ВНИИОК: (№ Госрегистрации 1201453956), а также гранту Федерального агентства по делам молодежи «Росмолодежь» от 29 мая 2008 г. № 119/17.

**Степень разработанности темы.** Способам увеличения производства мяса, в том числе баранины, посвящено много исследовательских работ. Определенная часть ученых доказывает своими работками эффективность приемов повышения продуктивности воздействием на живой организм физических методов: И. О. Бугаева, Д. Ю. Дегтярев, С. В. Москвин, Л. Н. Скорых. Одним из таких методов является лазерное излучение, воздействием которого на различные сельскохозяйственные объекты занимались А. В. Будаговский, О. Н. Будаговская, С. Ю. Юран, А. М. Башилов, В. М. Чудновский. Научные работники уделяют большое внимание лазерному излучению низкой интенсивности как фактору активизации биологических резервов организма с повышением естественной резистентности. Научно-исследовательские организации также ведут поиски повышения продуктивности с применением оптического излучения: Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и

козоводства, ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции» (ГНУ НИИММП) и т. д.

Несмотря на наличие исследований с применением низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ) для повышения продуктивности животных отсутствуют автоматизированные установки для определенного вида сельскохозяйственного скота с рекомендациями по режимам работы.

**Научная гипотеза.** Проведение исследований по особенностям проникновения лазерного излучения через биологические ткани животного, можно разработать автоматизированную лазерную установку для получения стабильных результатов по повышению продуктивных показателей молодняка овец.

**Цель работы.** Обосновать параметры и режимы лазерной автоматизированной установки для повышения продуктивных показателей молодняка овец.

**Задачи исследования:**

– провести теоретические исследования по проникающей способности лазерного излучения через биологические ткани и провести моделирование физических процессов при лазерном облучении шейного отдела молодняка овец;

– на основе результатов моделирования обосновать место расположения лазера и необходимые параметры и режимы лазерной установки;

– обосновать конструктивно-технологическую схему установки для воздействия на молодняк овец и разработать алгоритм управления ее работы;

– изготовить автоматизированную лазерную установку для лазерного облучения молодняка овец и провести экспериментальные исследования по подтверждению теоретических значений параметров и режимов этой установки;

– провести испытания установки на овцеферме по подтверждению стабильности повышения мясной продуктивности;

– дать оценку экономической эффективности использования разработанной установки при выращивании овец.

**Методы исследования:** математическое моделирование совместно с прикладной программой «Comsol»; лабораторные

экспериментальные исследования с использованием общепринятых методик и поверенного современного оборудования; тепловизионная съемка обрабатываемых поверхностей овец; полевые экспериментальные исследования проводились на овцефермах с высокой степенью репрезентативности выборок, что обеспечивало объективность полученных результатов.

**Объект исследования** – процессы взаимодействия лазерного излучения с биотканями, лазерная автоматизированная установка.

**Предмет исследования** – параметры и режимы автоматизированной лазерной установки, зависимости температуры и интенсивности лазерного излучения от свойств биотканей и характеристик лазера.

**Научная новизна работы:**

– мультифизические модели основных процессов, протекающих в биологических тканях при воздействии лазерного излучения;

– обоснованные параметры и режимы лазерной установки лазерного воздействия на шейный отдел ягнят для повышения продуктивности и резистентности животных;

– алгоритм управления установкой лазерного воздействия на шейный отдел ягнят.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в разработанных мультифизических моделях проникновения лазерного излучения через биологические ткани, позволяющих установить необходимые параметры установки и рекомендовать наиболее эффективный режим работы для обработки любых других частей тела различных животных. Параметры и режимы работы лазерной установки для повышения продуктивности, резистентности могут использоваться в технологических процессах при промышленном овцеводстве. Предлагаемый метод воздействия на тимус животного оказывает стимулирующее действие на рост организма животных, повышает жизнеспособность организма и его резистентность к неблагоприятным факторам окружающей среды, что повышает сохранность молодняка. Полученные результаты исследований дополняют и расширяют базу знаний по биологическому действию НИЛИ на животные объекты, а также доказывают его безопасность и эффективность в отрасли овцеводства. Автоматизированная установка для лазерной обработки овец, техническая новизна которой

подтверждается патентом на изобретение № 2698214, может быть модернизирована и применяться для взрослых животных.

**Реализация результатов исследований.** Результаты исследований внедрены в хозяйствах Ставропольского края: колхозе-племзаводе им. Ленина, СПК колхозе-племзаводе «Россия» Апанасенковского района, а также используются в научных исследованиях и в учебном процессе Ставропольского ГАУ.

**Апробация работы.** Результаты исследований и основные материалы диссертационной работы представлены, обсуждены и одобрены: на расширенных заседаниях кафедры технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» (2017–2021) и ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции» (ГНУ НИИММП) (2017–2021); на международных научно-практических конференциях «Современное состояние животноводства: проблемы и пути их решения» (Саратов, 2018); «Инновационные разработки молодых учёных – развитию агропромышленного комплекса» (Ставрополь, 2018), «Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе» (Ставрополь, 2021), «Научные основы создания и реализации современных технологий здоровья» (Волгоград, 2021), «Инновации, технологические решения и менеджмент в современной биотехнологии и биомедицине» (Пушино, 2022); Всероссийской научно-практической конференции электроэнергетического факультета, посвященной Дню Российской науки (Ставрополь, 2022).

**На защиту выносятся:**

- мультифизические модели основных процессов, протекающих в биологических тканях при воздействии лазерного излучения;
- обоснованные параметры и режимы лазерной установки по воздействию на шейный отдел ягнят для повышения продуктивности и резистентности животных;
- алгоритм управления установкой лазерного облучения шейного отдела ягнят;
- результаты сопоставления модельных и экспериментальных данных при работе автоматизированной лазерной установки в рекомендованных режимах работы;

– результаты полевых экспериментов на овцеферме по повышению продуктивности животных.

**Публикации результатов работы.** Основное содержание диссертации отражено в 22 печатных работах, в том числе: 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 5 статей в международной базе данных Scopus и Web of Science. По теме диссертационного исследования получен патент РФ на изобретение.

**Объём и структура работы.** Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы, приложения. Изложена на 122 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначена актуальность работы, приведены цель исследований, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ способов сохранности молодняка животных, в том числе овец. Получает распространение биостимуляция организма с помощью лазерного излучения низких интенсивностей, при котором нормализуются обменные процессы животного и даже снижается заболеваемость молодняка. Исследованиями установлено, что активация биоэнергетических процессов под воздействием НИЛИ стимулирует выработку универсального источника энергии аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) в митохондрии, повышая метаболическую активность клетки. Научное объяснение первичного механизма биологического действия НИЛИ сделал В. М. Чудновский. Иммунная система как управляющая система организма реагирует на лазерное воздействие, однако характер данного взаимодействия остается до конца не изученным. Подтвержденные клинические и экспериментальные данные свидетельствуют о стимулирующем действии гуморального и клеточного иммунитета при оптимальных параметрах действия лазерного света. Существуют исследования по воздействию лазерного излучения на тимус животных.

Безопасность НИЛИ доказана десятками тысяч исследований, проведённых во всем мире. Максимальную эффективность от облучения НИЛИ можно получить при установлении следующих

параметров: длина волны, режим работы лазерного источника, мощность, время экспозиции, локализации расположения, периодичность проведения процедуры. Установлено, что НИЛИ с длиной волны 904 нм лучше применять для воздействия на глубоко расположенные органы. Современная методология импульсного лазерного воздействия на биологические объекты предусматривает минимизацию энергетических характеристик НИЛИ и её составляющих: мощность источника до 5 Вт, экспозиция менее 5 мин. Наиболее приемлемым для дальнейших исследований и приспособленным для установки в создаваемое оборудование является полупроводниковый лазерный ветеринарный аппарат «СТП-9».

Актуальным представляется изучение влияния лазерного излучения малой мощности на организм овец, и такие исследования проводятся в Ставропольском ГАУ. В результате воздействия НИЛИ на маток овец были получены результаты по плодовитости маток, выживаемости молодняка. Однако использование лазера в ручном режиме показало низкую производительность и высокую трудоемкость процесса.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

**Во второй главе** представлены теоретические положения и компьютерное моделирование тепловых и энергетических процессов в объекте исследований – шейном отделе ягненка. Моделирование принято производить в программном комплексе Comsol Multiphysics.

При взаимодействии излучения с биотканями происходит их нагрев, величина которого зависит от энергии излучения, времени воздействия и коэффициентов поглощения. В зоне облучения происходит локальное увеличение температуры. Из литературы известно, что при изменении температуры от 37 до 42°C не происходит нарушений тканей. Необходимо установить такие параметры и режимы, которые не допустили бы опасного превышения температуры в объекте исследований.

Дифференциальное уравнение движения тепловых потоков в общем виде можно выразить широко известным выражением:

$$\rho \cdot c_{cp} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_{cp} \cdot u \cdot \nabla T + \nabla q = \sum Q_{Тл}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{cp}$  – общая теплоемкость среды, Дж/(кг·°C);  $u$  – скорость конвективных потоков, м/с;



$q = -k_T \nabla T$  – плотность движения теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $k_T$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $\sum Q_{\text{тл}}$  – общая интенсивность тепловыделений, в данном случае за счет лазерного излучения, Вт/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, °С.

Если лазерный луч будет один и отсутствовать конвективная составляющая в уравнении 1, то теплообменные процессы будут описываться следующим образом:

$$\sum \rho_i \cdot c_i \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \sum \nabla q_i = Q_{\text{тл}}, \quad (2)$$

где  $\rho_i$ ,  $c_i$  – соответственно плотность и теплоемкость  $i$ -той структуры среды;  $q_i$  – теплопроводности отдельных  $i$ -тых сред.

При прохождении лазерного пучка через биоткань он ослабляется в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$I(z) = I_0 \cdot \exp(-\mu_a z), \quad (3)$$

где  $z$  – оптическая ось и толщина биоткани;  $I_0$  – начальная интенсивность излучения,  $\mu_a$  – коэффициент поглощения среды.

Структура шейного отдела овцы достаточно сложна, но были выделены основные составляющие: кожа, мышечная ткань, позвоночник со спинным мозгом, пищевод с внутренним содержимым, трахея и тимус. По литературным данным были определены соответствующие коэффициенты поглощения для принятой длины волны лазерного излучения.

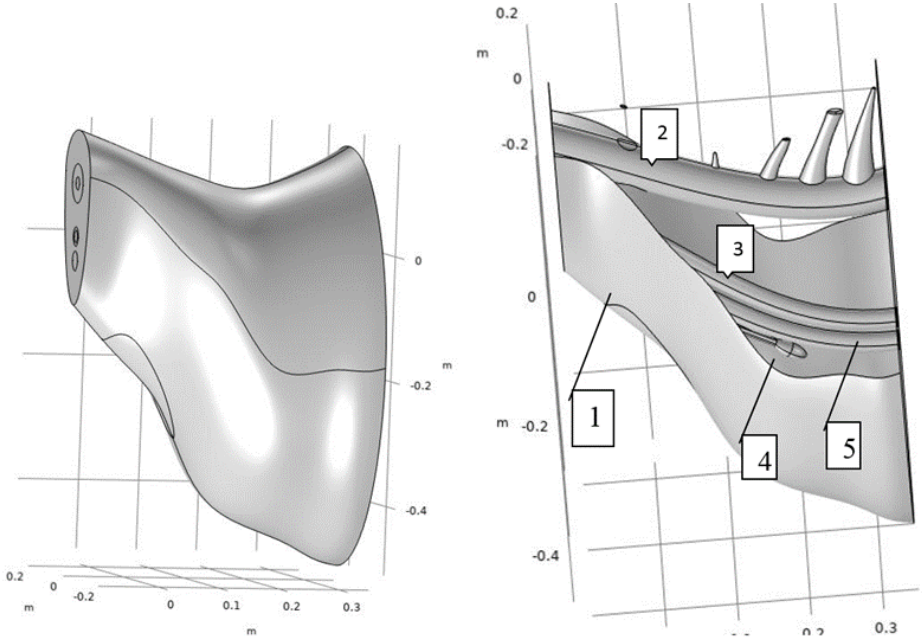
На основании ветеринарных данных по молодняку овец была разработана геометрия шейного отдела ягненка (рис. 1). Выбор интерфейсов программного продукта осуществлялся исходя из протекающих физических процессов. Так, для анализа тепловых полей в объекте был принят интерфейс «Heat Transfer in Solids», а для исследования проникновения лазерного излучения в биоткани применялся интерфейс «Radiative Beam in Absorbing Media». В качестве начальных условий принята температура тела животного ( $T_{0ж}$ ) 38 °С, а окружающая температура воздуха ( $T_{0в}$ ) равна 24 °С.

В данном программном продукте интенсивность излучения зависит от мощности излучения лазера по формуле

$$I_0 = P_{cp} f(O, e), \quad (4)$$

где  $P_{cp}$  – средняя мощность лазера, Вт;  $f(O, e)$  – функционал по площади, зависящий от координаты точки излучения  $O$ ,

распределения интенсивности излучения по излучаемой площади и направления оси излучения (вектор  $e$ ),  $m^2$ .



1 – наружная часть шеи; 2 – позвоночник; 3 – пищевод; 4 – тимус; 5 – трахея

Рисунок 1 – Вид геометрической модели шейного отдела ягненка

Функционал по площади  $f(O, e)$  связан с распределением интенсивности излучения по излучаемой поверхности, и он задавался по распределению Гаусса. Средняя мощность будет выделяться с учетом импульсной работы лазера:

$$P_{cp} = P_0 \cdot shim(t), \tag{5}$$

где  $P_0$  – излучающая мощность лазера (по паспорту 1,5 Вт);  $shim(t)$  – частотная модуляция выходного сигнала лазера.

Математическая модель физических процессов при облучении объекта в программном продукте «Comsol» с учетом начальных и граничных условий имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \rho_i \cdot c_i \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \sum \nabla q_i = Q_{\text{ТЛ}} \\ q_i = -k_{Ti} \nabla T \\ \frac{e_i}{|e_i|} \cdot \nabla I_i = -k_i I_i \\ Q_{\text{ТЛ}} = \sum k_i I_i \\ I_0 = P_{\text{cp}} \cdot f(O, e) \\ f(O, e) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right); d = \frac{\|e \times (x-o)\|}{\|e\|} \\ P_{\text{cp}} = P_0 \cdot \text{shim}(t) \\ q_{\text{CT}} = h(T_0 - T); T_{0\text{B}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}; T_{0\text{Ж}} = 38 \text{ }^\circ\text{C} \\ G_{\text{Sh}} = G_{\text{Sh}}(X, Y, Z), \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $G_{\text{Sh}} = G_{\text{Sh}}(X, Y, Z)$  – геометрическая модель шеи;  $e_i$  – ориентация  $i$ -го луча,  $k_i$  – коэффициент поглощения  $i$ -той среды.

Решение модели проводилось в нестационарном режиме и в течение одной минуты. Первоначально лазер был размещен над шейным отделом строго вертикальной линии. Однако решения модели показали, что при данной интенсивности излучения и времени экспозиции получаем перегрев верхней части шеи и позвоночника (из-за повышенного его коэффициента поглощения). На рисунке 2 представлено температурное поле в разрезе шеи и температурные графики по глубине объекта исследований.

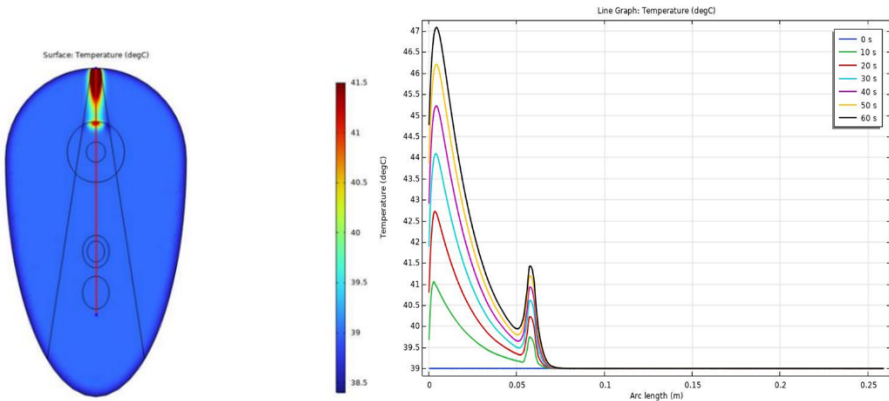


Рисунок 2 – Изображения температурных полей шеи в разрезе через 60 с работы (слева) и температурные графики от глубины проникновения излучения и при разном времени работы

После анализа прохождения луча через верхнюю часть шейного отдела было установлено, что внутренние органы шеи перекрывают поступающую энергию от лазера. Решено было проводить облучение в трех точках шейного отдела для увеличения вероятности попадания энергии на тимус. Изменена геометрия модели: угол отклонения от вертикальной оси точек излучения составил  $20^\circ$ ; дистанция лазера от поверхности шеи стала в интервале от 4,3 см до 4,8 см; расстояние между точками излучения составляет 4,2 см.

После изменения геометрии объекта математическая модель стала в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \rho_i \cdot c_i \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \sum \nabla q_i = Q_{\text{тл } j} \\ q_i = -k_{Ti} \nabla T \\ \frac{e_i}{|e_i|} \cdot \nabla I_i = -k_i I_i \\ Q_{\text{тл } j} = \sum k_i I_{ij} \\ I_{0j} = P_{\text{ср}} \cdot f(O_j, e); j = 1, 2, 3 \\ f(O, e) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right); d = \frac{\|e \times (x-o)\|}{\|e\|} \\ P_{\text{ср}} = P_0 \cdot \text{shim}(t) \\ q_{\text{ст}} = h(T_0 - T); T_{0\text{в}} = 24^\circ\text{C}; T_{0\text{ж}} = 38^\circ\text{C} \\ G_{\text{sh}} = G_{\text{sh}}(X, Y, Z); g_{\text{beam}} = g_{\text{beam}}(x_j, y, z), \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $Q_{\text{тл } j}$ ,  $I_{0j}$  – тепловыделение и интенсивность излучения отдельными  $j$ -ми точками расположения луча;  $O_j$  – центр геометрического места  $j$ -го луча;  $g_{\text{beam}} = g_{\text{beam}}(x_j, y, z)$  – геометрическое место  $j$ -го луча, изменяется только по оси  $x$ .

Первоначально была установлена длительность облучения в каждой точке, равная одной минуте, и расчетные данные моделирования выводились в отдельные файлы через 10 секунд. На рисунке 3 изображена интенсивность излучения лазера в объёмном виде и в поперечном разрезе, где видно, что луч достигает кожного покрова и его интенсивность резко уменьшается по глубине проникновения. На рисунке 4 представлен график зависимости интенсивности излучения от глубины проникновения до расположения тимуса.

По графику видно, что исходящая плотность мощности излучения составляет  $38000 \text{ Вт/м}^2$ , на поверхности шеи она уже равна  $29000 \text{ Вт/м}^2$ .

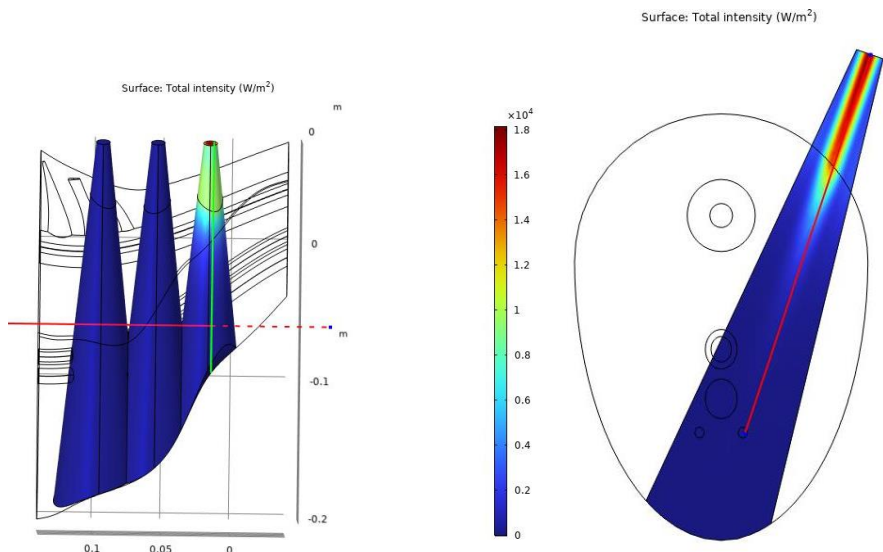


Рисунок 3. – Вид полей интенсивности излучения в объеме и в разрезе шеи

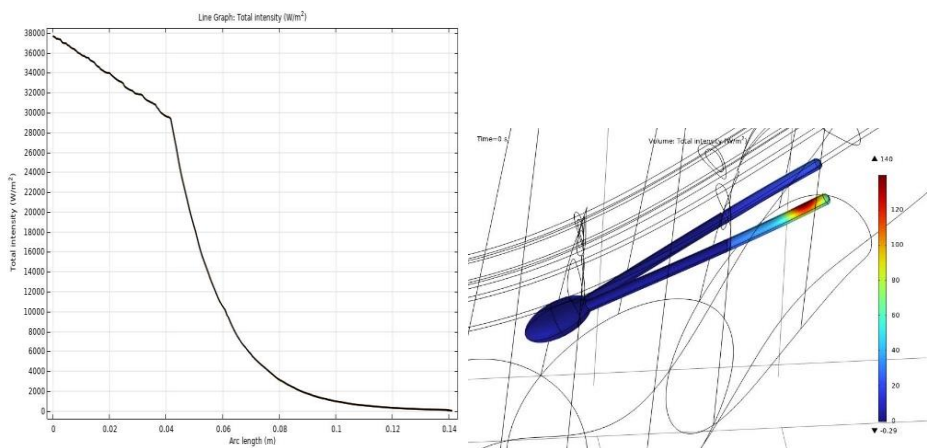


Рисунок 4 – График зависимости интенсивности излучения от глубины проникновения в тело и изображение тимуса с уровнями попадающей интенсивности излучения

Снижение интенсивности излучения связано с потерями в воздухе по длине луча и отражением от обрабатываемой поверхности. Можно увидеть, как изменяется данный показатель по мере удаления от поверхности шеи: на наружной части интенсивность излучения равна  $29000 \text{ Вт/м}^2$ , а на тимусе –  $140 \text{ Вт/м}^2$ . Используя графики зависимости температуры от глубины проникновения излучения лазера по отрезкам времени, было рекомендовано время экспозиции по точкам. Результаты получения тимусом энергии излучения и изменения температуры тимуса и биотканей с максимальной температурой сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования по энергии излучения и температурного поля объекта исследований

Номер позиции лазера	Удельная энергия на тимусе, $\text{Вт/м}^2$	Конечная температура тимуса, $^{\circ}\text{C}$	Изменение температуры тимуса, $^{\circ}\text{C}$	Максимальная температура части шеи, $^{\circ}\text{C}$ , при времени работы	Изменение максимальной температуры шеи, $^{\circ}\text{C}$
1	140	39,05	0,2	42,5 (25 с)	3,65
2	39	38,98	0,1	43 (40 с)	4,15
3	11	38,88	0,03	43 (25 с)	4,15

На основании рекомендуемого режима работы лазера и с учетом опыта работы с лазером в ручном режиме была разработана конструктивно-технологическая схема установки (рис. 5).

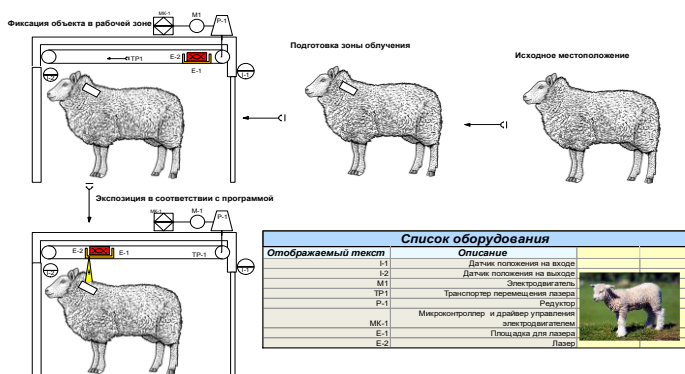


Рисунок 5 – Конструктивно-технологическая схема установки

Также был разработан алгоритм управления основными функциональными процессами установки, который позволяет максимально автоматизировать технологический процесс.

**В третьей главе** приводятся результаты лабораторных и полевых экспериментов. Лабораторные исследования проводились в Ставропольском ГАУ и в его опытном хозяйстве. Была сконструирована автоматизированная лазерная установка станка (рис. 6). На раме установлена специальная мобильная площадка для лазера СТП-9, ее привод осуществлялся от шагового двигателя через цепную передачу. После проведения лабораторных испытаний автоматизированной установки и корректировки программного обеспечения управления дальнейшие испытания проводились уже в полевых условиях. В станок помещалось животное, а площадка с лазером двигалась к головному отделу ягненка (рис. 7).

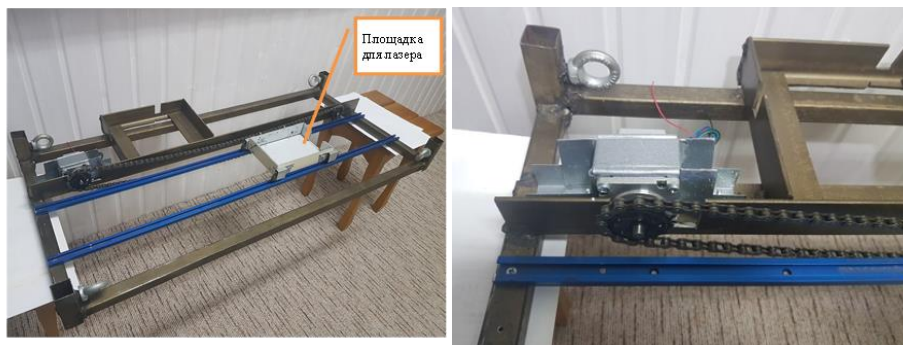


Рисунок 6 – Внешний вид установки лазерного облучения



Рисунок 7 – Внешний вид установки во время экспозиции

На рисунке 8 показаны варианты тепловизионной съёмки шейных отделов ягнят после экспозиции, где можно наблюдать локальное повышение температуры обрабатываемых областей. Отмечалось, что максимальная температура локальных областей не превысила 43 °С. Статистическая обработка полученных данных показала, что среднее превышение температуры поверхности после обработки по сравнению с температурой до воздействия составило 3,9 °С при стандартном отклонении 2 °С.

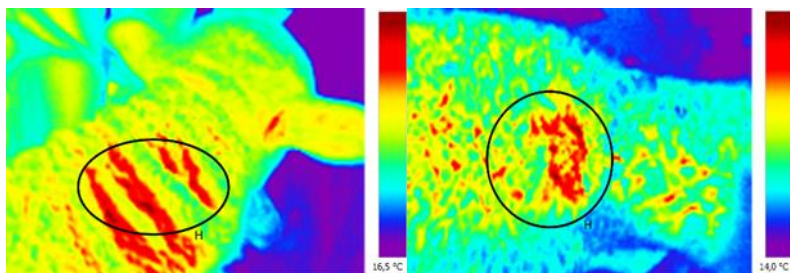


Рисунок 8 – Фрагменты тепловизионной съёмки шейных отделов трех ягнят

Для проведения полевых экспериментов после ягнения овцематок были сформированы три группы ягнят: I группа была контрольной и состояла из 20 особей; II и III группы были опытными. Ягнят из II группы (21 особь) обрабатывали с помощью лазерного излучения на 15 сутки после рождения, а III группу (24 особи) обрабатывали на 20 сутки. Облучение ягнят лазером проводили на автоматизированном станке. Исследование формирования мясной продуктивности ягнят проводилось путем отслеживания динамики живой массы, приростов, промеров статей экстерьера, контрольного убоя, товарной оценки туш качества мяса в соответствии с методиками, рекомендованными ВИЖ, СНИИЖК. Анализ структурных особенностей тимуса у исследуемых особей осуществлялся на 5 и 7 месяцев после их рождения. Исследования гистологической структуры тимуса (рис. 9) проводились в Региональном научно-диагностическом и лечебно-ветеринарном центре ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет».





Рисунок 9 – Отбор тимуса для гистологических исследований

Определение прироста живой массы показало, что наибольшая динамика отмечается у III группы исследуемых животных: прирост к 7 месяцу в III группе составил 29,1 кг по сравнению с контролем – 27,9 кг. Оценку их экстерьера проводили через 5 и 7 месяцев после рождения. Результаты промеров на 7 месяц показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений частей тела в возрасте 7 месяцев

Показатель	Группа исследуемых животных		
	I	II	III
Высота в холке, см	60,7	60,9	61,2
Высота в крестце, см	61,5	61,8	62,2
Глубина груди, см	25,0	26,0	27,0
Ширина груди, см	20,0	21,0	22,0
Обхват груди, см	75,2	78,0	82,0
Косая длина туловища, см	62,3	62,7	63,2
Обхват пясти, см	8,0	8,1	8,1

Как видно из данных таблицы 2, исследуемые животные во II и III группах обладали лучшим экстерьером по сравнению с животными из I группы, и преобладание сохраняется по всем измеряемым показателям.

Были исследованы морфологические и биохимические параметры крови. Как видно из диаграммы, представленной на рисунке 10, количество эритроцитов у ягнят всех групп значительно увеличивается с момента рождения до 2 месяцев (с  $8 \cdot 10^{12}/л$  до  $10,8 \cdot 10^{12}/л$ ). Наибольшее количество эритроцитов наблюдалось у ягнят II ( $10,5 \cdot 10^{12}/л$ ) и особенно III ( $10,8 \cdot 10^{12}/л$ ) групп.

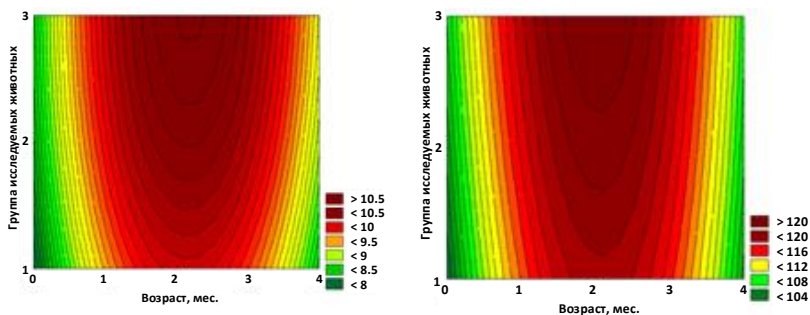


Рисунок 10 – Диаграмма влияния низкоинтенсивного лазерного излучения на эритроциты (RBC,  $10^{12}/\text{л}$ ) (слева) и на гемоглобин (HGB, г/л) (справа) исследуемых групп животных

В результате гематологических исследований сделан вывод об интенсификации обменных процессов у животных после применения НИЛИ.

Помимо гематологических исследований, важным является определение защитного потенциала исследуемых животных. Так, содержание лейкоцитов в крови ягнят увеличивалось во всех группах до второго месяца, но наибольшее значение данного показателя было у III группы животных и составило  $5,9 \cdot 10^9/\text{л}$ . После второго месяца концентрация лейкоцитов падала у всех групп животных, приближаясь к уровню взрослых особей, что, по всей видимости, связано со стабилизацией их иммунной системы (рис. 11).

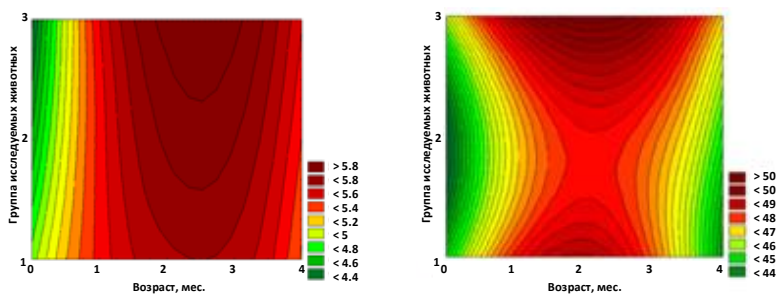


Рисунок 11 – Диаграмма влияния низкоинтенсивного лазерного излучения на лейкоциты ( $\text{WBC} \cdot 10^9/\text{л}$ ) (слева) и лимфоциты (Lymph, %) (справа) исследуемых групп животных

Другим важным показателем, характеризующим иммунную систему животных, является количество лимфоцитов. Наибольшая концентрация зафиксирована у III группы особей – 50,3 %. Преобладание III группы животных также сохранилось и при исследовании количества моноцитов и гранулоцитов. Также проводилась оценка активности фагоцитоза и антимикробных свойств крови, общее состояние иммунной системы животных (БАСК – бактерицидной активности сыворотки крови и ЛАСК – лизоцимной активности сыворотки крови), формирования активированных лимфоцитов, обеспечивающих клеточно-опосредованный иммунитет (Т-лимфоцитов), и формирования антител, обеспечивающих клеточно-опосредованный иммунитет (В-лимфоцитов). В результате проведенных исследований крови животных можно говорить о том, что НИЛИ активизирует механизмы естественной защиты ягнят. При этом наибольший эффект достигнут при воздействии лазером на 20 сутки после рождения животных.

Для оценки продуктивности по мясу был проведен контрольный убой животных в возрасте 5 и 7 месяцев. Наилучшие результаты показала III группа испытуемых. Так, например, предубойная живая масса животных из III группы в 5-месячном возрасте превысила таковую во II и I группах на 1,4 и 4,3 %, а по массе парной туши – на 2,6 и 6,1 % соответственно. Увеличение внутреннего жира во II и III группах на 0,02 и 0,04 кг соответственно по отношению к контрольной группе привело к увеличению убойной массы. Данный параметр увеличился по отношению к контролю во II группе на 3,7 %, а в III – на 6,8 %. Также вырос и убойный выход по отношению к контролю во II группе на 1 %, а в III группе – на 2,7 %. В 7-месячном возрасте предубойная живая масса во II и III группах превосходила контрольную группу на 2,1 и 3,3 %, масса парной туши – на 2,2 и 5 %, убойная масса – на 2,3 и 5,3 %, убойный выход – на 0,2 и 2,1 % соответственно. Помимо мясных качеств, важны и пищевые показатели туш, определяемые сортовым и морфологическим составом мышечной ткани исследуемых животных. Для их определения была проведена сортовая разубка и обвалка туш. Выход отрубов 1 сорта был выше в опытных группах по сравнению с контролем в 5- и 7-месячном возрасте. Помимо

этого, во II и III группах было наибольшее количество мякоти. Также коэффициент мясности, определяющий соотношение мышечной и костной тканей, был во II и III группах к 5 месяцу выше, чем в контрольной, на 5,4 и 9,8 % соответственно. Также были проведены исследования по определению массы и площади полученных овчин. Данные параметры были больше у III группы животных. Так, в 5-месячном возрасте масса овчины у III группы животных по сравнению со II была больше на 0,1 кг, а по сравнению с контрольной группой – на 0,2 кг. То же касается и площади овчин – у III группы она была больше по сравнению со II группой на 1,5 дм<sup>2</sup>, а по сравнению с контрольной – больше на 2,5 дм<sup>2</sup>. В 7-месячном возрасте такая же тенденция сохранилась.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Итоги выполненного исследования**

1. Проведены теоретические исследования проникающей способности лазерного излучения с длиной волны 940 нм через отдельные биологические ткани, которые показали, что высокой поглощающей способностью обладают костные ткани и тимус. В программном обеспечении «Comsol» разработана геометрическая модель шейного отдела ягненка, которая стала составной частью компьютерной модели протекающих физических процессов в изучаемом объекте при лазерном излучении.

2. Реализация компьютерной модели физических процессов в шейном отделе ягненка с источником лазерного излучения показала, что внутренние органы шеи имеют высокую поглощающую способность и размещение лазера над позвоночником не позволит получить тимусу значительной энергии излучения.

3. На основе анализа реализации модели физических процессов с источником лазерного излучения в объекте исследований рекомендованы следующие параметры лазерной установки: размещение лазера в верхней части установки и под углом 20° к вертикальной оси; проводить облучение в трех горизонтальных точках с расстоянием между ними 4,2 см и со средней дистанцией от шеи 4,5 см. При ограничении превышения температуры биологической ткани на уровне 43 °С, средней излучающей мощности лазера 1,5 Вт с длиной

волны 940 нм рекомендован режим работы лазера в трех местах фиксации лазера, начиная от головы: 25 с, 40 с, 25 с.

4. Полученные решения компьютерной модели показали, что по мере удаления от головы на тимус падает энергия излучения от трех соответствующих точек:  $140 \text{ Вт/м}^2$ ,  $39 \text{ Вт/м}^2$ ,  $11 \text{ Вт/м}^2$ , при этом температура тимуса повышается соответственно на  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5. Обоснована конструктивно-технологическая схема автоматизированной лазерной установки для воздействия на молодняк овец, позволяющая проводить требуемую экспозицию облучения в автоматическом режиме. Разработан универсальный алгоритм управления автоматизированной лазерной установкой для реализации в контроллерах различного типа.

6. Изготовлена автоматизированная лазерная установка для облучения ягнят, которая позволяет производить автоматическое перемещение лазера над телом животного и проводить временную экспозицию излучения в фиксированных положениях. Тепловизионное исследование шейного отдела подопытных животных показало, что после воздействия лазерного облучения температура обрабатываемых поверхностей возрастает в среднем на  $3,9 \text{ }^\circ\text{C}$  при стандартном отклонении  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ , что не опасно для животных, свидетельствует о влиянии лазерного света на тело ягненка и подтверждает результаты моделирования.

7. Экспериментальные исследования по продуктивности овец показали следующее: превышение массы молодняка овец, подвергшегося лазерному облучению на 15 (II группа) и 20 (III группа) день после рождения, по сравнению с контрольными ягнятами (I группа) составило 3,1 и 4,1 % соответственно; в 7-месячном возрасте предубойная живая масса во II и III группах превосходила контрольную группу на 2,1 и 3,3 %, масса парной туши – на 2,2 и 5 %, убойная масса – на 2,3 и 5,3 %, убойный выход – на 0,2 и 2,1 %, коэффициент мясности был выше на 4,3 и 6,1 % соответственно; увеличение массы полученной овчины от исследуемых животных для III группы к 7-месячному возрасту составило на 0,2 кг больше, чем во II группе, и на 0,4 кг больше, чем в контрольной, площади овчины у III группы больше, чем у II, на  $2,6 \text{ дм}^2$  и больше контрольной на  $3,2 \text{ дм}^2$ .

8. Микроскопические исследования срезов тимуса у животных показали, что жировая инволюция тимуса контрольной группы начинается гораздо раньше, чем у животных из II и III групп; у облученных животных в тимусе выявлены морфофункциональные резервы для терминальной дифференцировки и селекции Т-лимфоцитов по сравнению с контрольной группой. Исследования эритроцитарных индексов, лейкоцитарной формулы крови, а также иммунной реактивности молодняка ягнят показали увеличение количества эритроцитов и гемоглобина у животных, подвергшихся лазерному воздействию, что говорит об ускорении окислительно-восстановительных и обменных процессов в их организме.

9. Экономическая эффективность внедрения установок лазерного облучения в овцефермах показала снижение себестоимости 1 кг живой массы от 1,9 до 2,3 %; увеличение уровня рентабельности производства с 22,9 до 26,5 % при забое овец в 5-месячном возрасте. Расчет экономического эффекта предлагаемых обработок в хозяйствах природно-климатической зоны Ставропольского края при поголовье реализуемого молодняка овец 87,5 тыс. голов показал возможное получение годового эффекта в размере до 23,7 млн руб. Срок окупаемости инвестиций на закупку установок лазерного облучения находится в диапазоне от 4 до 8 месяцев.

### **Рекомендации производству**

В овцеводческих хозяйствах результаты исследования могут быть использованы при выращивании ягнят, что приведет к получению более здорового поколения и снижению падежа животных. Периодическое лазерное облучение овец в сочетании с другими способами интенсификации выращивания, в том числе с генетической работой, позволит получать больше продукции в виде мяса и шерсти. Для предприятий, изготавливающих оборудование для овцеводства АПК, результаты полезны при создании и производстве автоматизированных установок лазерного облучения животных.

## **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют разрабатывать новые мультифизические модели процессов при лазерных обработках в других частях тела овец. Разработанные компьютерные модели можно применить при моделировании проникновения лазерного луча в различные биоткани и для других животных. Лазерное облучение в ветеринарии позволяет успешно бороться с болезнями животных и приводит к повышению их продуктивности особенно в комплексном использовании других методов профилактики. Полученный алгоритм управления автоматизированной лазерной установкой можно реализовывать в различных микроконтроллерах и при соответствующей доработке позволяет получить полностью автоматическую установку для нескольких животных или при обработке молодняка в технологическом потоке.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ**

*– в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science*

1. Afanasyev, M. A. Analysis of the Results of the Impact of the Laser Device on the Technological Process of Rearing Young Sheep / Mikhail Afanasyev, Elena Rubtsova, Nikolay Bogatyrev, Alexander Yanovsky and Victoria Afanasyeva // International Scientific and Practical Conference “Innovations, Technological Solutions and Management in Modern Biotechnology and Biomedicine” (ITSM-2022). BIO Web of Conferences 57, (2023) 07002.

2. Afanasyev, M.A. Productive And Morphological Features Of Sheep Determined By Biophysical Methods / M.A. Afanasyev, L.N. Skorykh, D.V. Kovalenko, A.A. Omarov / В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness, TSIA // 2019. 2020. – С. 012001. – 6 с.

3. Afanasyev, M.A. Studying Meat Productivity And Morphological Indicators Of Sheep By Biophysical Methods / M.A. Afanasyev, L.N. Skorykh, D.V. Kovalenko, A.S. Sergienko, D.I. Fursov // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2018. – № 9 (3). – P. 713–717.

4. Afanasyev, M.A. Low-intensity laser radiation effect on protein metabolism in young sheep / Afanasyev M., Shlykov S., Omarov R., Mosolov A.A., Starodubova Yu.V., Petrovich M.P., Reshetnikova A.O. // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Krasnoyarsk, 2021. – С. 32011.

5. Afanasyev, M.A. Low-intensity laser radiation effect on young sheep growth and development / Afanasyev M., Shlykov S., Omarov R., Mosolov A.A., Starodubova Yu.V., Reshetnikova A.O. // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2021. – С. 12078.

*– в изданиях, рекомендованных ВАК:*

6. Афанасьев, М. А. Особенности морфологического состава крови полутонкорунных овец при использовании биофизических методов / М. А. Афанасьев, Л. Н. Скорых, Е. А. Киц [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. – 2019. – № 1 (33). – С. 56–60.

7. Афанасьев, М. А. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на продуктивность овец / Л. Н. Скорых, Д. В. Коваленко, М. А. Афанасьев, В. А. Кисюк // Сельский механизатор. – 2017. – № 1. – С. 32–33.

8. Афанасьев, М. А. Исследование температуры тела животных при воздействии низкоинтенсивного лазерного излучения / М. А. Афанасьев, Е. И. Рубцова, В. С. Афанасьева, Н. И. Богатырев // Сельский механизатор. – 2022. – № 9. – С. 8–10.

*– в прочих изданиях:*

9. Афанасьев, М. А. Особенности мясных качеств у молодняка создаваемого типа скороспелых овец при использовании биофизических методов / М. А. Афанасьев, Л. Н. Скорых, Д. В. Коваленко // Вестник АПК Ставрополя. – 2018. – № 1 (29). – С. 60–62.

10. Афанасьев, М. А. Гистологические особенности мышечной ткани у молодняка овец при использовании биофизических методов / М. А. Афанасьев, Л. Н. Скорых, И. И. Дмитрик, А. С. Сергиенко // Вестник АПК Ставрополя. – 2018. – № 4 (32). – С. 55–58.

11. Афанасьев, М. А. Алгоритм проверки статистической значимости различий хозяйственно полезных признаков между



различными генеалогическими группами животных / К. А. Катков, Г. Т. Бобрышова, Л. Н. Скорых, О. С. Копылова, М. А. Афанасьев // Вестник АПК Ставрополя. – 2018. – № 2 (30). – С. 86–90.

12. Афанасьев, М. А. Продуктивные показатели, иммунная реактивность молодняка создаваемого типа скороспелых овец при использовании низкоинтенсивного лазерного излучения / Л. Н. Скорых, А. А. Омаров, Д. В. Коваленко, М. А. Афанасьев [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. – 2017. – № 3 (27). – С. 27–29.

13. Афанасьев, М.А. Устройство для фиксации мелкого рогатого скота при проведении зооветеринарных мероприятий и применении биофизических методов воздействия / М.А. Афанасьев, С.Н. Шлыков, Д.В. Коваленко, М.А. Мастепаненко // Главный зоотехник. – 2021. – № 6 (215). – С. 60–66.

14. Афанасьев, М. А. Морфобиологические особенности молодняка овец при использовании биофизических методов / М. А. Афанасьев, А.-М. М. Айбазов, Л. Н. Скорых [и др.] // Главный зоотехник. – 2019. – № 2 (187). – С. 28–35.

15. Афанасьев, М. А. Формирование мясной продуктивности молодняка создаваемого типа скороспелых овец в возрастном аспекте при использовании биофизических методов / М. А. Афанасьев, Л. Н. Скорых, Д. В. Коваленко, А. С. Сергиенко // Главный зоотехник. – 2018 – № 9 (182). – С. 34–40.

16. Омаров, А. А. Особенности метаболизма у молодняка создаваемого типа скороспелых овец при разных технологиях выращивания / А. А. Омаров, Л. Н. Скорых, Д. В. Коваленко, М. А. Афанасьев [и др.] // Главный зоотехник. – 2018. – № 4. – С. 33–38.

17. Афанасьев, М. А. Влияние озоно-воздушной среды на прочность овечьей шерсти / М. А. Афанасьев, В. А. Кисюк, Г. В. Загородняя [и др.] // Главный зоотехник. – 2017. – № 4. – С. 47–51.

18. Селионова, М. И. Изменение гистологической структуры тимуса овец в возрастном аспекте при использовании биофизических методов / М. И. Селионова, М. А. Афанасьев, Л. Н. Скорых [и др.] // Ветеринария и кормление. – 2019. – № 1. – С. 29–32.

19. Афанасьев, М. А. Мясная продуктивность у молодняка создаваемого типа скороспелых овец при использовании биофизических методов / М. А. Афанасьев, Л. Н. Скорых, С. С. Бобрышов // Современное состояние животноводства: проблемы и пути их

решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2018. – С. 97–98.

20. Афанасьев, М. А. Интерьерные особенности полутонкорунных овец при использовании биофизических методов / М. А. Афанасьев // Инновационные разработки молодых учёных – развитию агропромышленного комплекса: материалы VI Междунар. конф. – Ставрополь, 2018. – Т. 1. – С. 36–40.

### *Монография*

21. Афанасьев, М. А. Биофизические методы повышения продуктивности и резистентности овец: монография / М. А. Афанасьев, С. Н. Шлыков, М. И. Сложенкина. – Волгоград: ООО «СФЕРА», 2021. – 120 с. – Тираж 500 экз.

### *Патент*

22. Пат. 2698214 Российская Федерация, МПК А61D3/00 (2006.01), А01К 1/06 (2006.01) Станок для фиксации мелкого рогатого скота / М. А. Афанасьев, А.-М. М. Айбазов, Л. Н. Скорых, М. А. Мастепаненко, В. А. Кисюк, Д. В. Коваленко, О. С. Копылова, Д. И. Фурсов, А. С. Сергиенко, А. С. Лабынцев ; патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. – №2018139580; заявлено 08.11.2018; опубликовано 23.08.2019. – 6 с.

Подписано в печать 20.04.2023.

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии издательско-полиграфического комплекса СтГАУ

«АГРУС», г. Ставрополь, ул. Пушкина, 15. Тел. (8652) 35-06-94.

E-mail: agrus2007@mail.ru