АГРОЭКОИНЖЕНЕРИЯ 3(112)

Прежнее название –ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МЕХАНИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА И ЖИВОТНОВОДСТВА

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-78977 от 14.08.2020

В номере:

- ✓ Представлены результаты исследований по определению показателей биоиндикационной оценки состояния агроэкосистем;
- ✓ Рассмотрены показатели эффективности и экологической безопасности технологических операций и технологий в растениеводстве;
- ✓ Представлены результаты исследований по оценке компостов на основе органических отходов животноводства и фосфогипса;
- ✓ На базе нечетко-возможностного метода представлена модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов;
- ✓ Приведена методика формирования технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства;
- ✓ Дан анализ систем управления на животноводческих предприятиях;
- ✓ Представлены результаты исследований по моделированию и обоснованию систем и технических средств в садоводстве и животноводстве.

Главный редактор:
Брюханов А.Ю.чл.-кор. РАН, д-р техн. наук
Зам.главного редактора:
Максимов Д.А., канд. техн. наук;
Редакционная коллегия:
Попов В.Д., акад. РАН; д-р техн. наук
Вторый В.Ф., д-р техн. наук;
Ракутько С.А., д-р техн. наук;
Джабборов Н.И., д-р техн. наук;
Смелик В.А., д-р техн. наук
Трифанов А.В., канд. техн. наук,
Гордеев В.В., канд. техн. наук;
Перекопский А.Н., канд. техн. наук;
Каледин Г.В., канд. техн. наук;
Папушин Э.А., канд. техн. наук
Васильев Э.В., канд. техн. наук;
Захаров А.М., канд. техн. наук;
Миронов В.Н., канд. техн. наук.
Иностранные члены редакционной коллегии:
Валкама (Костина) Елена, Финляндия
Корнел Салаи, Венгрия
Андрес Аннук, Эстония

Над номером работали:
Плеханова Ю.В. редактор;
Левченко Л.В. перевод;
Научные редакторы номера:
Васильев Э.В., Захаров А.М.

Учредитель и издатель:
Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства-филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ"

Адрес редакции:
196625, Санкт-Петербург, Тярлево
Фильтровское шоссе, 3.
Телефон (812) 466-83-08
E-mail: nii@sznii.ru

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).
Полные тексты статей размещены на сайтах электронных библиотек: elibrary.ru; КиберЛенинка; ЭБС «Лань».

Отпечатано в ИАЭП-филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Подписано в печать 07.11.2022
Формат 84×108 $^{1}/_{16}$.
Объем 15,54 усл.печ.л.
Тираж 300 экз

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА……..4

Ракутько С.А., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н., Маркова А.Е. Биоиндикационная оценка состояния агроэкосистемы при выращивании столовой свеклы (*BETA VULGARIS L.*) ……4

Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Морфо-генетический подход в биоиндикации по стабильности развития растений на примере картофеля *(SOLANUM TUBEROSUM)*……...24

Добринов А.В., Джабборов Н.И., Сухопаров А.И. Показатели оценки эффективности и экологической безопасности технологий и технических средств производства продукции растениеводства…….……....39

Ху Цайли, Ван Дунвэй, Ван Цзяшэн,Шан Шукси,Лю Хуаньвэй, Лян Цяоцзюнь, Чи Джункан, Ли Яо Проектирование и имитационный анализ прореживателя цветов во фруктовых садах с двойной стрелой на гусеничном ходу…….....50

Валге А.М., Сухопаров А.И. Определение размеров накопительной площадки у хранилища при заготовке силоса…….……....61

Никифоренко Ю.Ю. Влияние компостов на основе производственных отходов на плодородие почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур..……70

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА……82

Васильев Э.В., Спесивцев А.В., Шалавина Е.В., Спесивцев В.А. Математическая модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов на основе экспертных знаний……..82

Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Методика формирования технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства……97

Плаксин И.Е., Плаксин С.И., Трифанов А.В. Применение систем управления на животноводческих предприятиях…….……..…...…109

Сошнев Д.А., Трифанов А.В., Базыкин В.И., Плаксин И.Е. Результаты опытно-производственной проверки работы технологического модуля для выращивания бройлеров……...……..121

Семенов К.Д., Сидыганов Ю.Н., Медяков А.А., Онучин Е.М. Моделирование работы системы обогрева производственных помещений животноводческого комплекса…….……129

Каунова Л.М. Обоснование конструктивных параметров индукционного нагревателя для пастеризации молока……..141

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

УДК 57.087: 633.41 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-4-23

БИОИНДИКАЦИОННАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АГРОЭКОСИСТЕМЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ СТОЛОВОЙ СВЕКЛЫ (*BETA VULGARIS L.*)

С.А. Ракутько д-р.техн.наук; Е.Н. Ракутько;
А.П. Мишанов; А.Е. Маркова канд.с.-х.наук.

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

В органическом земледелии вопросы оценки состояния агроэкосистем в настоящее время приобретают все большую значимость. Цель исследования – разработка и апробация методики биоиндикационной оценки агроэкосистемы органического севооборота на примере свекловичного поля. Оценивали влияние доз органического удобрения «БИАГУМ» в размере 0,80 и 160 кг·га$^{-1}$ азота на растения свеклы столовой (*Beta vulgaris L.*) сорта «Двусемянная ТСХА» в фазе пучковой зрелости. Составлена математическая модель (цифровой двойник) растения свеклы. Оценка стабильности развития растений по флуктуирующей асимметрии показала статистическую незначимость этого показателя от дозы азота. Различия не наблюдались также для оптической плотности листьев. Найдены амплитуды реакции на дозу внесенного азота по морфо-цветовым показателям. Предложен синтетический показатель, вычисляемый как отношение площади листа к среднему значению серого на его цифровом снимке. Найдено уравнение, по которому можно определить внесенную дозу азота по величине данного показателя. Проведен анализ главных компонент измеряемых переменных. Выявлено, что четыре главных компоненты объясняют 91.2 % всей дисперсии. Исследование показало возможность использования приемов морфо-цветометрии, дополненных математическим методом анализа главных компонент, для биоиндикационной оценки состояния агроэкосистемы в органическом производстве растениеводческой продукции.

Ключевые слова: агроэкосистема, биоиндикация, стабильность развития, флуктуирующая асимметрия, билатеральный признак, растение, биометрический показатель, цифровой двойник, оптическая плотность, компьютерная морфо-цветометрия, анализ главных компонент

Для цитирования: Ракутько С.А., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н., Маркова А.Е. Биоиндикационная оценка состояния агроэкосистемы при выращивании столовой свеклы (*BETA VULGARIS L.*) // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3(112). С.4-24

BIOINDICATION ASSESSMENT OF THE AGROECOSYSTEM STATUS IN TABLE BEET (*BETA VULGARIS L.)* GROWING

S.A. Rakutko, DSc (Engineering), E.N. Rakutko;
A.P. Mishanov; A.E. Markova, Cand. Sc. (Agriculture)

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSBSI FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

The appraisal of agroecosystems in organic farming becomes currently of great importance. The purpose of the study was to develop and test a bioindicative assessment method for the agroecosystem of the organic crop rotation on the example of a table beet field. The study considered the effect of BIAGUM organic fertilizer doses (0.80 and 160 kg N ha^{-1}) on the bunched beetroots (*Beta vulgaris L.),* Dvusemiannaya TSHA cultivar. A mathematical model (digital twin) of a beet plant was created. The plant developmental stability was estimated by the fluctuating asymmetry. The study revealed the statistical insignificance of this indicator from the nitrogen dose and the leaf optical density. The response amplitudes to the introduced nitrogen doses were found by morpho-color indicators. A synthetic indicator calculated as the ratio of the leaf area to the average grey value in its digital image was proposed and an equation to determine the introduced nitrogen dose by the value of this indicator was derived. The study analysed the principal components of the measured variables. The four principal components were found to explain 91.2% of the total variance. The study proved the usability of morpho-colorimetry techniques together with the mathematical method of principal component analysis for the bioindicative assessment of the agroecosystem in the organic crop production.

Key words: agroecosystem, bioindication, developmental stability, fluctuating asymmetry, bilateral trait, plant, biometrics, digital twin, optical density, computer-aided morpho-colorometry, principal component analysis

For citation: Rakutko S.A., Mishanov A.P., Rakutko E.N., Markova A.E. Bioindication assessment of the agroecosystem status in table beet (*BETA VULGARIS L.)* growing. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 3 (112): 4-24 (In Russian)

Введение. В настоящее время экосистемы во всем мире сталкиваются с беспрецедентным уровнем антропогенного воздействия, приводящего их к критическому состоянию [1]. Мониторинг экосистем является необходимым шагом к выявлению причин происходящих процессов. Для получения полной картины текущего состояния экосистемы необходима информация о всех переменных среды, что практически невозможно из-за их огромной размерности. Благодаря тому, что в статистическом смысле переменные состояния часто не являются независимыми (то есть коррелированны между собой) и одни экологические переменные косвенно зависят от других, становится возможной биоиндикация. Биоиндикацией называют оценку текущего качества среды обитания и динамики ее изменения по состоянию биоты. Для этих целей составлены и пополняются списки индикаторных организмов – биоиндикаторов, по

наличию которых, степени их развития, изменению морфологических, структурно-функцио-нальных и других характеристик судят о состоянии экосистемы [2].

Биоиндикаторы оказались очень полезными отчасти потому, что они отражают широкий спектр экологических переменных кумулятивным, интегрированным во времени образом. По сути, они являются биосенсорами, аналогичными используемым человеком техническим датчикам, которые определяют уровень конкретной переменной в пределах определенной погрешности и сообщают об этом пользователю [3]. В целом биоиндикаторы отражают общее состояние экосистемы, но также могут оценивать конкретные физико-химические переменные, такие как концентрация химических загрязнителей и т.п. [4].

Биомониторинг и биоиндикация играют центральную роль в понимании того, как экосистемы реагируют на изменения окружающей среды и антропогенные факторы стресса, и играют важную роль в управлении экосистемами.

Тем не менее, вопрос об определении причинно-следственных связей в экосистемах на основе данных наблюдений далёк от ответа, поскольку упомянутые выше корреляции в сложных экосистемах не подразумевают ни причинно-следственной связи, ни обязательно прямой механистической связи [5]. Теоретические основы биоиндикации учитывают сложную природу экосистем и базируются на теоретической экологии, теории информации, семиотики и изучении сложных систем. Такой подход важен при разработке методов биоиндикации на основе машинного обучения [6].

Несмотря на то, что агроэкосистемы характеризуются относительно упрощенной структурой и обедненным видовым составом (что обеспечивает повышенную урожайность культивируемых растений), разработка методов оценки их состояния не менее важна. Считается, что наиболее приемлемыми для использования в качестве биоиндикаторов являются многолетние древесные растения или древовидные кустарники [7]. Однако отмечается, что и травянистые виды растений могут быть хорошими индикаторами степени загрязнения окружающей среды [8]. Имеется опыт, свидетельствующий о возможности оценки состояния агроэкосистемы по целенаправленно выращиваемых для хозяйственных целей растениям. Установлено, что такие культуры, как чеснок, лук репчатый, редька черная, свекла и морковь обыкновенная обладают избирательной, иногда высокой способностью к накоплению химических элементов или соединений [9]. Разработка способов и технических средств биоиндикации состояния экосистем весьма актуальна в настоящее время.

При наличии стрессового воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды при адаптации растений изменяется их морфология, прежде всего, лиственной части [10]. Предложено использование морфогенетического подхода, при котором в качестве критерия состояния агроэкосистемы принимают показатель стабильности развития тестовых растений. При этом в качестве тестовых предлагается использовать те же растения, которые выращиваются в

агроэкосистеме с целью получения сельскохозяйственной продукции. В качестве численной характеристики стабильности принимают величину флуктуирующей асимметрии (ФА) билатеральных признаков (БП) выращиваемых растений [11].

Данный метод с успехом находит применение при исследовании стабильности развития различных видов растений. Согласно методу, из пространственно-разнесенных органов (или их частей) растения выбирается билатеральная структура, геометрическая симметричность которой дает основание полагать равенство значений измеряемых БП.

Не менее перспективным, более удобным и не таким трудоемким является подход в биоиндикации, основанный на определении фрактальной размерности биологических объектов путем компьютерной обработки их цифрового изображения. Метод апробирован на листьях трех сортов свеклы [12].

Востребованным подходом для экологического мониторинга объектов окружающей среды является использование компьютерной морфо-цветометрии, позволяющей исследовать форму и цвет – важнейшие показатели биологических объектов. Компьютерная морфо-цветометрия нашла широкое применение благодаря доступности цифровых гаджетов (планшетных сканеров, цифровых фотоаппаратов, смартфонов и т.д.) с хорошими метрологическими характеристиками [13]. Использование цифровых регистрирующих устройств позволяет с легкостью обеспечить создание измерительных приборов для решения конкретных задач, что обусловливает широкое использование этого современного метода в самых различных областях [14].

Современные цифровые устройства при поддержке соответствующего программного обеспечения позволяют совместно фиксировать параметры цветности и морфологические параметры объекта и его фрагментов (характерные размеры, форму и т.д.). Это позволяет эффективно использовать данный метод в биоиндикации как тонкий инструмент для регистрации физиологических процессов различной природы в динамике [15]. Извлечение признаков из объектов с использованием алгоритмов анализа изображений (морфометрия) широко применяется для изучения различных видов растений по ряду параметров, используемых для морфометрического анализа [16]. Для анализа используются показатели формы листа, жилкования, текстуры, фрактальной размерности и т.д. [17].

Исследования, основанные на морфо-цветометрии, применяют в многомерном анализе данных с оценкой основных признаков при распознавании различных листьев по форме, контуру либо цветовым дескрипторам. Растет интерес к автоматическому распознаванию листьев с использованием алгоритмов машинного обучения для идентификации, классификации или обнаружения биотических и абиотических стрессов [18].

Вопросы оценки состояния агроэкосистем приобретают еще большую значимость в органическом земледелии, предусматривающем получение высококачественной, экологически чистой продукции в системе севооборота без применения минеральных удобрений, гербицидов и других веществ химического происхождения. Для восполнения

плодородия почвы при этом используют органические удобрения, а также природные минеральные компоненты.

На базе опытной станции ИАЭП ведутся работы по созданию функционирующей модели «умного» органического сельскохозяйственного предприятия, включающего информационно-управляющую систему органическим производством с входящей в неё системой мониторинга [19].

Столовая свекла является одной из самых распространенных овощных культур открытого грунта. В технологии органического производства столовой свеклы исключены технологические операции применения синтезированных препаратов. Восполнение питательных веществ, необходимых для роста растений, возможно за счет использования органических удобрений и агротехнических приемов, способствующих улучшению питания растений [20].

Свекла богата не только питательными веществами, минералами и витаминами, комплексом витаминов группы В и фолиевой кислотой, но также содержит множество уникальных биоактивных соединений, обладающих рядом лечебных и терапевтических свойств. Вещества, выделенные из различных частей свеклы, обладают лечебными свойствами, такими как обезболивающее, гепатопротекторное, антиоксидантное, противомикробное, противовоспалительное, антигипертензивное, противовирусное, антигипергликемическое, антипрогестагенное, противоаллергическое, антитромботическое, противоопухолевое, а также способствуют предотвращению мигрени, нейродегенерации, повреждения печени [21].

Изучение изменений биометрических показателей различных сортов столовой свеклы (Детройт, Цилиндрика, Бордо) в различных ее частях (лист, черешок, корнеплод) в процессе роста и их биологической ценности показало, что ботва свеклы может быть использована как рецептурный компонент в продуктах питания в период между 55-м и 85-м днями после начала формирования корнеплода, в зависимости от сорта. Кроме этого, ботва имеет высокую органолептическую оценку – она сочная, без постороннего привкуса [22].

Выявлено, что благодаря высокому содержанию железа в ботве свеклы и питательных веществ, способствующих лучшему его усвоению, свекольную ботву целесообразно использовать в производстве продуктов питания, способных предотвращать развитие железодефицитных состояний в организме человека [23].

Качество корнеплодов свеклы столовой определяется комплексом признаков и свойств. Выявлено, что ее современные сорта – в основном гетерозиготные популяции, подверженные сильной изменчивости под влиянием условий среды. Установлено, что реакция разных сортов и гибридов свеклы на изменение условий выращивания неодинакова, что свидетельствует об их генотипических различиях [24].

Выявлено влияние отдельных химических элементов в составе удобрений на ботанические характеристики свеклы [25]. Азот оказывает выраженное влияние на рост и физиолого-химические показатели урожая свеклы. Фосфор играет важную роль в росте корней, а калий повышает качество продукции и устойчивость растений к болезням. В различных

условиях окружающей среды требуется оптимальное применение удобрений [26].

Цель – разработка и апробация методики биоиндикационной оценки агроэкосистемы органического севооборота на примере свекловичного поля.

Задачи:

1) получение биометрических данных растений свеклы в период пучковой зрелости, при выращивании их под различными дозами органического удобрения;

2) проверка гипотезы о возможности использования стабильности развития растений, оцениваемой по флуктуирующей асимметрии содержания хлорофилла в листьях как БП для целей биоиндикации свекловичного поля;

3) проверка гипотезы о возможности использования оптической плотности листьев при биоиндикации свекловичного поля;

4) проверка гипотезы о возможности применения морфо-цветового анализа при биоиндикации свекловичного поля.

Материалы и методы

Организация эксперимента. Исследования проводили на опытном поле ИАЭП (59°39′20.0″ N, 30°23′03.9″ E). Почва дерново-подзолистая суглинистая окультуренная. Предшественник – картофель в шестипольном органическом севообороте. Посадки свеклы производили 25.05.2022 г, измерения – 14.07.2022 (рис. 1). Погодные условия этого периода: температура и осадки – выше средних многолетних значений. В целом условия для развития растений были благоприятные.

Рис. 1. Сбор экспериментальных данных на свекловичном поле

В трех вариантах опыта оценивали влияние доз органического удобрения на биометрические и морфо-цветовые параметры растений свеклы столовой (*Beta vulgaris L.*). Использовали удобрение «БИАГУМ» - приготовленный на основе куриного помета индустриальным способом в биоконвекторе ИАЭП компост. На часть делянок вносили различные дозы органического удобрения, 4,0 и 8,0 т·га$^{-1}$ (соответствующие внесению азота 80 и 160 кг·га$^{-1}$). Размер делянок 78,4 м^2 (восемь гребней длиной 14 м, междурядье 0,7 м), между делянками располагались защитные полосы, повторность трехкратная, расположение – систематическое. В качестве контроля брали делянки, на которые в сезон 2022 г не вносились органические удобрения. В предыдущем году под предшественник вносили удобрение в дозе 80 кг·га$^{-1}$.

В опыте использовали семена свеклы столовой сорта «Двусемянная ТСХА», который относится к сортам среднего срока созревания, районированного в том числе и для Северо-Западного региона. Розетка листьев полуприподнятая и стоячая. Пластинка листа темно-зеленая и зеленая, гладкая. Черешок темно-красный и фиолетовый, без прожилок или с розовыми прожилками. Корнеплоды выровненные, округлой

формы, темно-красные, гладкие. Основание закругленное. Головка мелкая, выпуклая, темно-красная, нежная, не израстает. Корнеплод на 2/3 погружен в почву, осевой корешок тонкий, без разветвлений, легко выдергивается. Мякоть нежная, сочная, темно-красная. Урожайность высокая и составляет 4.0–5.2 кг·м$^{-2}$ [27].

Измерения вели в фазу пучковой зрелости (начало образования корнеплодов). В соответствии с поставленными задачами, производили следующие измерения.

Получение биометрических данных. Для каждого варианта опыта извлекали по 15 экземпляров здоровых растений, без повреждений, с хорошими фитосанитарными показателями, однородных по внешним признакам. Во избежание обезвоживания до измерений собранные растения хранили в файле-пакете в холодильнике не более суток до измерений.

В лабораторных условиях на весах ВТЛ-500 с точностью ± 10 мг определяли сырую массу всего растения $M_р$ и каждой его структурной части – листьев $M_л$, черешков $M_ч$, корнеплода $M_{кп}$, корня $M_к$. Содержание сухого вещества ν, %, в структурных частях растения определяли весовым методом, высушивая образцы до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 70 ^{o}С. Максимальную длину листа L_{max} определяли с помощью мерной линейки (цена деления 1 мм), накладывая ее на лист растения вдоль рахиса. Результаты фиксировали с точностью ± 0,5 мм. Диаметр корнеплода d определяли с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм, производя измерения в месте максимальной толщины корнеплода в двух перпендикулярных направлениях и беря среднее значение.

Удельная масса листа (индекс *LMA, Leaf Mass per Area*), мг·см$^{-2}$, характеризующий ассимиляцию CO_2 и освоение предоставляемых окружающей средой ресурсов находили как отношение сухой массы листа к его площади. Площадь листьев кроны S находили как сумму площадей отдельных листьев.

Определение стабильности развития растений. При оценке стабильности развития растений в условиях экосистемы традиционно используют отклонения в симметрии билатеральных (зеркальных) морфологических структур, т.е. геометрические размеры листа. В наших предыдущих исследованиях было выявлено, что оценка возможна и по физиологическим параметрам листа, в частности, асимметрии содержания хлорофилла [28].

Для каждого варианта опыта на поле выбирали растения в количестве 150 шт, с вполне сформировавшимися для данной фазы развития листьями. Стабильность развития растений оценивали в соответствии с существующей методикой [29].

В данном исследовании в качестве билатеральной структуры приняты листья второй-третьей пары. В качестве БП принято содержание хлорофилла в левой и правой половинках листа, в точках, симметричных относительно его центральной жилки [30].

Неразрушающее определение содержания хлорофилла производили с помощью измерителя (Chlorophyll Content Meter) CCM-200 (рис.2). Действие прибора основано на измерении пропускающей способности листа на длинах волн 931 нм (которая зависит от толщины листа) и 653 нм (зависящей от концентрации хлорофилла). Индекс

содержания хлорофилла в образце (*Chlorophill Content Index, CCI,* отн.ед.) определяется как отношение измеренных коэффициентов пропускания. Точность измерителя составляет 0,1 отн.ед. *CCI*.

Рис. 2. Определение содержания хлорофилла в листьях

Статистический анализ закона распределения значений асимметрии был выполнен с использованием критериев согласия Колмогорова-Смирнова, Шапиро-Уилка и Лиллиефорса. Проверку направленности асимметрии проводили с использованием одновыборочного критерия Уилкоксона. Проверку наличия связи между величиной асимметрии признака и его средним размером использовали непараметрический коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Наличие антисимметрии проверяли по эксцессу распределения различий между сторонами.

Значение показателя ФА вычисляли по формуле

$$ФА = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left|CCI_{Li} - CCI_{Ri}\right|}{(CCI_{Li} + CCI_{Ri})}, \qquad (1)$$

где CCI_{L_i}, CCI_{R_i} - значения индекса соответственно на левой и правой половине листа.

Измерение оптических свойств листьев. Пигменты листа поглощают излучение в определенных спектральных диапазонах. Поскольку содержание пигментов часто связано с другими физиологическими или структурными свойствами листа, можно выявить критические состояния растений исходя из оптических свойств листьев. Поэтому оптические свойства листьев могут выступать как индикаторы комплексной физиологии листьев в широком диапазоне условий окружающей среды. В наших исследованиях на растениях томата выявлено различие в силе действия факторов внешней среды на отдельные показатели оптических свойств листа [31].

Измерения производили с помощью денситометра ДП-1М [32]. Спектральный диапазон для измерения выбирали светофильтрами группы А. Диапазоны пропускания на уровне 0.3 от пикового значения: синий *b* 425-454 нм, зеленый *g* 518-546 нм и красный *r* 611-645 нм. Измерения проводили при диафрагме диаметром 5 мм, с точностью до двух знаков после запятой. Измеряли оптическую плотность листьев $ОП_r$, $ОП_g$ и $ОП_b$ в этих диапазонах.

Морфо-цветовой анализ. Для получения исходных данных использовали сканер Benq S2W 5000E с разрешением 300 dpi, в цветном режиме. Предварительную калибровку производили по изображению линейки длиной 250 мм. Масштаб изображений – 11.8248 пикселей на миллиметр. Пример полученных изображений листьев свеклы показан на рис. 3. Номера соответствуют порядку их появления на растении.

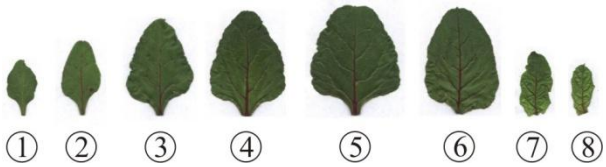

Рис. 3. Листья растений свеклы

Изображения листьев были проанализированы с помощью программы ImageJ [33]. Границу листовой пластинки выделяли инструментом Волшебная палочка (Wand Tool). Пользуясь возможностями, предоставляемыми программой (пункт меню Analyze / Set Measurements), определяли следующие морфо-цветовые параметры (рис. 4).

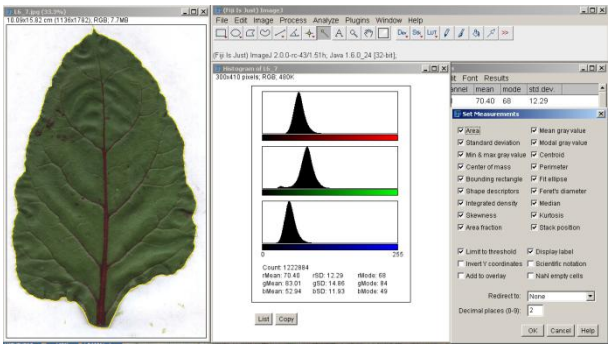

Рис. 4. Интерфейс программы ImageJ

Находили площадь каждого листа (*Area*, см^2) и их периметр (*Perim*, см). Среднее значение серого (*Mean*) определяли как сумму значений серого всех пикселей изображения, деленное на количество пикселей. Использовалось взвешенное значение, вычисляемое через координаты цветности по формуле *Mean* = 0.299**R* + 0.587**G* + 0.114**B*. Вычисляли стандартное отклонение от среднего значения серого (*StdDev*). Ограничивающий (наименьший) прямоугольник, охватывающий выделение, характеризовали параметрами ширины (*Width*) и высоты (*Height*). Из показателей формы листа определяли степень близости к окружности (*Circularity*) по формуле $Circ = 4\pi \cdot Area / Perim^2$. Эквивалентный эллипс (fitted ellipse) характеризовали величинами его большой (*Major*) и малой (*Minor*) осей. Коэффициент формы (*AR, Aspect ratio)* вычисляли как их отношение. Коэффициент округлости (*Roundness*) вычисляли по формуле $Round = 4 \cdot Area / \pi \cdot Major^2$.

Компактность (*Solidity*) вычисляли как отношение реальной площади выделенной области к площади выпуклой области, ограниченной кривой, проведенной по выпуклым частям области. Определяли наибольшее (*Feret*) и наименьшее (*MinFeret*) расстояния между любыми двумя точками вдоль границы выбора. Координаты *R*, *G* и *B* определяли по гистограммам в соответствующих цветовых каналах. В качестве показателя амплитуды реакции на дозу внесенного удобрения по каждому показателю использовали отношения соответствующих величин для делянок с максимальной дозой и контрольных.

Математическая обработка полученных данных. Экспериментальные данные обрабатывали с использованием программ EXCEL и STATISTICA. Значимость различия средних для измеренных параметров оценивали с помощью дисперсионного анализа (*ANOVA*). Использовали критерий Тьюки ($p = 0.05$). Все многомерные морфо-цветовые данные были проанализированы на предмет взаимосвязи с помощью анализа главных компонентов (*PCA, principal component analysis*). Использовали еще две переменные – *Уровень* (доза азота) и *Лист* (номер листа в розетке). *PCA* позволяет выявить основные взаимосвязи между измеряемыми переменными. В соответствии с методом, первые главные компоненты (*PC1, PC2,* …) представляют те морфо-цветовые характеристики листа, которые имеют бо́льшие дисперсии.

Результаты и обсуждение

Биометрические показатели сведены в таблицу 1. В целом наблюдается статистически значимое увеличение их численных значений по мере увеличения дозы азота.

Таблица 1

Биометрические показатели

Показатель	Доза азота N, кг·га$^{-1}$		
	0	80	160
Сырая масса растения M_p, г, в т.ч.	22.07±2.36	25.05±3.58	37.19±3.98*
- подземной части (root), в т.ч.	3.44±0.55	3.83±0.67	6.91±1.63*
-- корешок $M_к$	0.47±0.12	0.52±0.10	0.62±0.13
-- корнеплода $M_{кп}$	2.97±0.49	3.31±0.60	6.29±1.61*
- надземной части (shoot), в т.ч.	18.63±2.22	21.22±3.06	30.27±2.80*
-- черешков $M_ч$	4.66±0.97	5.59±0.75	8.06±1.04*
-- листьев $M_л$	13.97±1.56	15.63±2.61	22.22±2.00*
Отношение shoot/root, отн.ед.	5.60±1.02	5.76±0.70	4.77±0.92
Диаметр плода d, мм	15.09±1.42	15.12±1.28	19.59±2.22*
Макс. длина листа L_{max}, см	21.03±1.32	23.08±1.24	25.21±1.64*
Площадь листьев кроны S, см^2	282.3±27.1	313.1±30.8	488.8±47.6*
Сод. сухого в-ва в листьях ν, %	9.4±0.1	11.1±0.1	9.5±0.1*
Отн. масса LMA, мг·см$^{-2}$	4.70±0.40	5.64±0.50	4.41±0.40*
Сод. хлорофилла CCI, отн.ед.	19.1±0.3	20.1±0.3	20.3±0.2*

* значимость различий на уровне $p<0.05$

Различия отношения массы надземной и подземной частей растения не значимы, что свидетельствует о равномерном их развитии не зависимо от дозы азота. Степень освоения внешних ресурсов и их аккумуляции в листьях (показатель LMA), вслед за содержанием сухого вещества, имеет максимум при дозе азота 80 кг·га$^{-1}$ и снижается при ее увеличении. Известно, что содержание хлорофилла в листьях варьируется в зависимости от генетики растений, содержания минеральных элементов, факторов внешней среды и т.д. и является прямым показателем здоровья и состояния растений. В эксперименте содержание хлорофилла при увеличении дозы азота незначительно увеличивается.

Аппроксимация численных значений некоторых биометрических показателей свеклы в зависимости от дозы азота N, кг·га$^{-1}$:

сырая масса растения, г

$M_p = 0.0945N + 20.55$ (R^2 = 0.89);

максимальная длина листа, мм

$L_{max} = 0.0261N + 21.0$ (R^2 = 0.99);

площадь листьев кроны, см^2

$S = 1.2906N + 258.2$ (R^2 = 0.86);

содержание хлорофилла, отн.ед.

$CCI = 0.0072N + 19.3$ (R^2 = 0.88).

Совокупность таких уравнений представляет собой математическую модель (цифровой двойник) растения, которая может быть использована для прогноза состояния растения как важнейшего элемента агроэкосистемы.

ФА содержания хлорофилла в листьях. В эксперименте анализ частоты встречаемости асимметричности содержания хлорофилла показал, что она наблюдается практически в каждом измерении (95-98%). Статистический анализ (проверка на отсутствие направленности, размер-зависимости и

антисимметрии) показал флуктуирующий характер различия содержания хлорофилла в половинках листа. Это подтвердило возможность использования данного признака для оценки стабильности развития растений.

Однако отличия значений ФА у выборок растений, выросших под различными дозами азота (0, 80 и 160 кг·га$^{-1}$) оказались статистически не значимыми (соответственно 0.0501, 0.0555 и 0.0571 отн.ед.). Это означает невозможность использования данного подхода при биоиндикации агроэкосистемы свекловичного поля.

Оптическая плотность листьев. На рисунке 5 в качестве характерного примера показана оптическая плотность в зеленом диапазоне отдельных листьев свеклы, выращиваемой при различных дозах азота.

Результаты измерений свидетельствуют, что различия средних значений оптической плотности листьев по дозам азота статистически не значимы, следовательно, этот показатель не может быть использован при биоиндикации агроэкосистемы свекловичного поля.

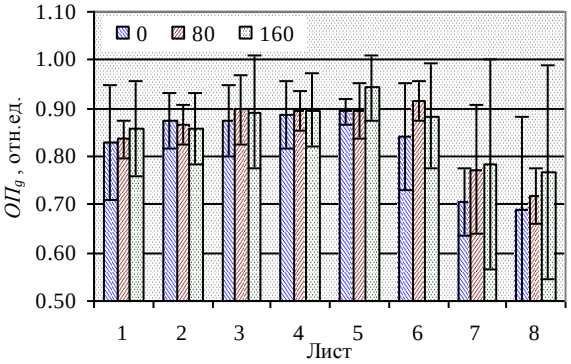

Рис. 5. Зависимость оптической плотности листьев в розетке у свеклы, выращиваемой при различных дозах азота

Морфо-цветовые параметры были найдены для каждого листа растений свеклы, выращенных при различных дозах азота. В плане закономерности их изменения по листьям растения в розетке можно выделить три группы параметров:

1) принимающие максимальное значение для средних и минимальное для молодых и старых листьев. Это параметры, характеризующие геометрические размеры листа: *Area, Perim, Width, Height, Feret, MinFeret, Major, Minor*. Их численные значения выше при повышенной дозе азота. Характерным примером является зависимость площади *Area* отдельных листьев растения от дозы азота (рис. 6).

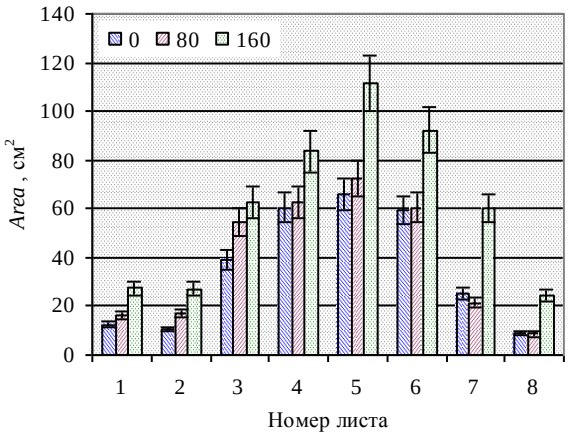

Рис. 6. Зависимость площади листьев в розетке от дозы азота

2) параметры, характеризующие интенсивность серого и составляющих цвета в отдельных каналах *Mean, StdDev, R, G, B*. Они принимают бо́льшие значения у молодых и старых и меньшие у средних листьев в розетке.

Примером являются средние значения серого *Mean* на изображении листьев от дозы азота (рис. 7). Однозначная зависимость для всех листьев от дозы здесь не просматривается.

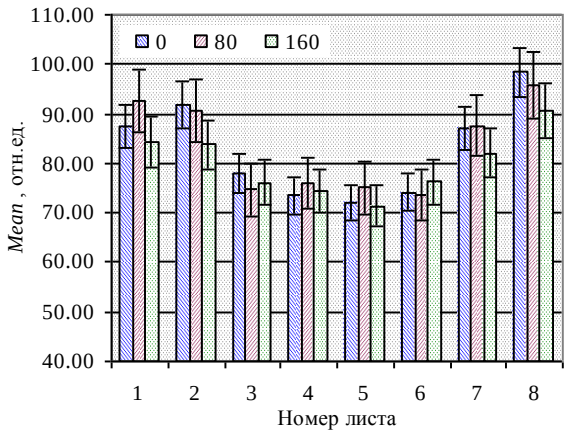

Рис. 7. Зависимость параметра *Mean* листьев в розетке от дозы азота

3) Параметры, характеризующие форму листа - *Circ, Solidity, Round, AR*. Характерным примером является параметр *Circularity* (рис. 8). Здесь явно отсутствует закономерность зависимости значения параметра как от порядкового номера листа, так и от дозы азота.

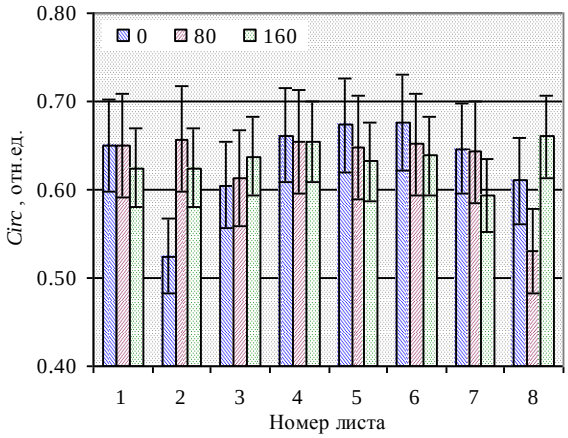

Рис. 8. Зависимость параметра *Circularity* листа от его номера и дозы азота

На рисунке 9 показана амплитуда реакции на дозу внесенного азота по каждому морфо-цветовому показателю для второго листа свеклы. Наиболее чувствительным оказался показатель площади листа *Area*.

Еще большей амплитуды реакции можно добиться, используя синтетический показатель *A*, вычисляемый как отношение измеряемых морфо-цветовых параметров, при этом значение параметра в числителе должно увеличиваться с увеличением дозы азота, а в знаменателе – уменьшаться.

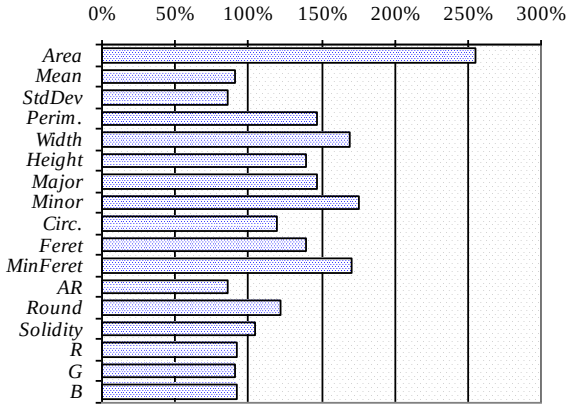

Рис. 9. Амплитуда реакции (%)

Этому требованию удовлетворяет, например, отношение площади листа *Area* к среднему значению серого *Mean*. Для обеспечения безразмерности данного показателя величины, его образующие, следует брать тоже в относительных единицах. Таким образом возможно нахождение зависимости этого показателя от дозы азота *A=f(N)*. Для целей биоиндикации представляет интерес обратная зависимость. Опираясь на полученные экспериментальные данные, можно определить дозу (кг·га$^{-1}$) по величине данного показателя по уравнению

$$N=86.7A-77.5 \ (R^2 = 0.97).$$

По сути, данное уравнение представляет собой простейшую математическую модель биоиндикации, где измеряемыми параметрами являются некоторые свойства растения, а определяемой величиной – доза азота, обеспечивающая данный уровень качества окружающей среды.

Для оценки влияния дозы внесенного азота на морфо-цветовые параметры отдельных листьев свеклы проведен

анализ главных компонентов. Первый главный компонент (*PC1*) объяснил 64.4 % дисперсии, второй (*PC2*) – 10.8 %, третий (*PC3*) – 10.1 %, четвертый (*PC4*) – 5.9 % (итого 91.2 % всей дисперсии). Это позволяет произвести переход из исходного многомерного пространства исходных признаков в пространство четырех первых главных компонент с потерей всего 8.8% информации.

PC1 сильно-положительно коррелирован с переменными *Area* (0,9442), *Perim* (0,9609), *Width* (0,9786), *Height* (0,9281), *Major* (0,9194), *Minor* (0,9800), *Feret* (0,9296), *MinFeret* (0,9801) и *Round* (0,7253); сильно-отрицательно с переменными *Mean* (-0,9216), *R* (-0,9205), *G* (-0,9165), *B* (-0,8376), *AR* (-0,7415) и средне-отрицательно с переменной *StdDev* (-0,6311). *PC2* средне-отрицательно коррелирован с переменной *Лист* (-0,6970). *PC3* сильно-положительно коррелирован с переменными *Solidity* (0,8527) и *Circ* (0,7512). *PC4* средне-положительно коррелирован с переменной *Доза* (0,6868).

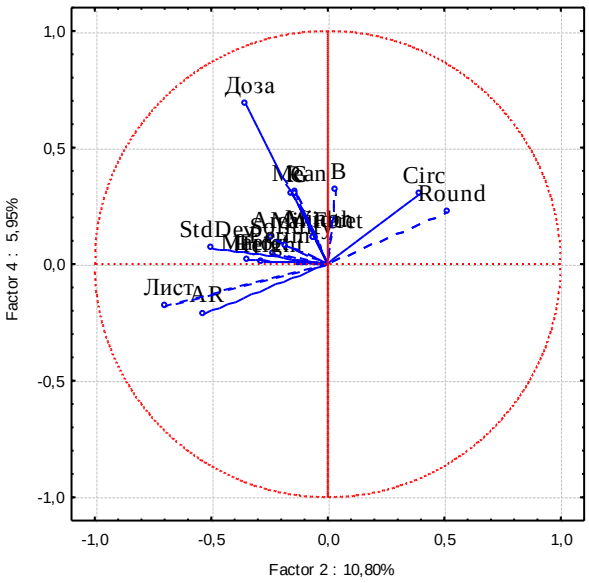

Рис. 10. Проекции исходных признаков на плоскость второй и четвертой главных компонент

Можно обеспечить еще большее снижение размерности, отказавшись от четвертой главной компоненты (85,3% всей дисперсии). Но тогда будет утеряна информации по переменной *Доза*, которая является основной при биоиндикации.

Связи между переменными и их влияние на соответствующие компоненты наглядно представлены на рисунке 10.

Заключение

Экосистемы являются сложными объектами для изучения, поскольку характеризуются множеством взаимодействующих переменных, часто не взаимозависящих ни статистически, ни функционально. В силу слабой исследованности причинно-следственных связей переменных возможны косвенные эффекты и нелинейные реакции. Являясь разновидностью экосистем, агроэкосистемы наследуют все их характерные признаки, что позволяет констатировать не меньшую актуальность биоиндикации в агроэкосистемах. Как чувствительные биоиндикаторы, растения позволяют оценивать состояние агроэкосистемы в целом, с позиции целенаправленно выращиваемых культур.

В работе рассмотрены вопросы применения метода биоиндикации в органическом земледелии, при котором возделывание сельскохозяйственных культур в системе севооборота производится без применения сложных синтезированных химических веществ (удобрений, гербицидов, пестицидов). В целом исследование показало актуальность биоиндикационной оценки состояния агроэкосистемы органического севооборота

Полученные биометрические данные растений свеклы в период пучковой зрелости показали влияние доз органического удобрения на развитие растений. Получены математические зависимости основных биометрических параметров растений свеклы в пучковый период от дозы внесенного азота, характеризующие состояние агроэкосистемы органического севооборота в целом.

Не подтвердилась гипотеза о возможности использования показателя ФА содержания хлорофилла в листьях свеклы как БП для целей биоиндикации свекловичного поля, поскольку различия средних значений ФА при различных дозах удобрения оказались не значимыми. Так же не подтвердилась гипотеза о возможности использования оптической плотности листьев свеклы при биоиндикации свекловичного поля.

Использование приемов морфо-цветометрии, дополненных математическим методом анализа главных компонент позволило разработать методику биоиндикационной оценки состояния агроэкосистемы в органическом производстве растениеводческой продукции.

Заявленный вклад соавторов:

С.А. Ракутько – концепция и дизайн исследования, идея статьи; А.П. Мишанов – полевой эксперимент; первичные данные; Е.Н. Ракутько – литературный обзор, морфо-цветометрия, А.Е. Маркова – статистическая обработка.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Steffen W., Richardson K., Rockstrom J., Schellnhuber H.J., Dube O.P., Dutreuil S., Lenton T.M., Lubchenco J. The emergence and evolution of Earth System Science. *Nat Rev Earth Environ* 2020. Vol.1, pp. 54-63. https://doi.org/10.1038/s43017- 019-0005-6.

2. Неверова О.А., Еремеева Н.И. Опыт использования биоиндикаторов в оценке загрязнения окружающей среды: аналитический обзор // *Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы.* 2006. № 80. С. 1-88. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9306119.

3. Cordier T., Alonso-Saez L., Apotheloz-Perret-Gentil L. et al. Ecosystems monitoring powered by environmental genomics: a review of current strategies with an implementation roadmap. *Mol Ecol*, 2020. Vol. 30 (13), pp. 2937-2958. https://doi.org /10.1111/mec.15472

4. Sagova-Mareckova M., Boenigk J., Bouchez A. et al. Expanding ecological assessment by integrating microorganisms into routine freshwater biomonitoring. *Water Res* 2021. Vol. 191, 116767. https://doi.org/ 10.1016/j.watres.2020.116767.

5. Ulanowicz R.E. The tripartite nature of causalities in ecosystem dynamics. *Curr*

Opin Syst Biol 2019. Vol. 13, pp. 129-135. https://doi.org/10.1016/j. coisb.2018.12.006.

6. Theodor Sperlea T., Heider D., Hattab G. A theoretical basis for bioindication in complex ecosystems. *Ecological Indicators* 2022. Vol. 140, 109050. https://doi.org/10.1016/ j.ecolind.2022.109050.

7. Кулик К. Н., Исаков А. С., Новочадов В. В. Новые возможности анализа листовых пластинок деревьев-биоиндикаторов в оценке состояния окружающей среды в условиях аридной зоны // *Известия НВ АУК*. 2021. №1(61). С. 25-36. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-01-02.

8. Безель В.С., Жуйкова Т.В. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов наземной фитомассой травянистой растительности // *Экология*. 2007. № 4. С. 259-267. https://elibrary.ru /item.asp?id=9517276

9. Радионов А.С., Сердюкова А.В., Шумилов Ю.В. Использование растительно-овощных биоиндикаторов для локально-региональных экологических оценок // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2014. № 5 (21). С. 123-129. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22498 688

10. Кавеленова Л.М., Кравцева А.П., Трубников А.М., Янков Н.В. К возможностям оценки функциональной активности листовых пластинок древесных растений // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2013. Т. 15. № 3-7. С. 2333-2336. http://www.ssc.smr.ru/media /journals/ izvestia/2013/ 2013_3_2333_2336.pdf

11. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А., Цзянь Су, Ян Ма. Методы биоиндикационной оценки состояния агроэкосистем: аналитический обзор // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. № 1 (110). С. 19-42. https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2022-1110-19-42

12. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А., Васькин А.Н., Су Ц. Опыт применения фрактального анализа при биоиндикации агроэкосистем на примере листьев свеклы (*Beta vulgaris L.*) // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. № 2 (111). С. 42-61. https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2022-2111-42-60

13. Моногарова О.В., Осколок К.В., Апяри В.В Цветометрия в химическом анализе // *Журнал аналитической химии*. 2018. Т. 73. № 11. С. 857-867. https://elibrary.ru/ item.asp?id=36362081

14. Шульц Э.В., Моногарова О.В., Осколок К.В. Цифровая цветометрия: аналитические возможности и перспективы использования // *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия.* 2019. Т. 60. № 2. С. 79-87. https://elibrary.ru/item.asp?id=36923396

15. Тирас Х.П., Нефедова С.Е., Апяри В.В. Биологическая цветометрия как новый метод в динамической морфометрии. В сб.: *Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности* (SCVRT2019). Труды Международной конференции. Пущино, Россия: ИТЭБ РАН, 2019. С. 77-83. https://elibrary.ru/ item.asp?id=41725575

16. Backhaus A., Kuwabara A., Bauch M., Monk N., Sanguinetti G., Fleming A. LEAFPROCESSOR: a new leaf phenotyping tool using contour bending energy and shape cluster analysis. *New*

Phytologist. 2010. Vol. 187, pp. 251-261. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137. 2010.03266.x.

17. Cope J.S., Corney D., Clark J.Y., Remagnino P., Wilkin P. Plant species identification using digital morphometrics: a review. *Expert Syst Appl* 2012. Vol. 39, pp. 7562-7573. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.073

18. Backes A.R., Casanova D., Bruno O.M. Color texture analysis based on fractal descriptors. *Pattern Recogn* 2012. Vol. 45, pp. 1984-1992. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2011.11.009

19. Максимов Д.А., Валкама Е., Минин В.Б., Ранта-Корхонен Т., Захаров А.М. Подходы к освоению органического земледелия // *АгроЭкоИнженерия*. 2020. № 4 (105). С. 101-113. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10270

20. Романовский Н.В. Возделывание столовой свеклы в органическом севообороте // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 93. С. 48-53. https://www.elibrary.ru/ item.asp?id=30782049

21. Pandita D., Reddy R., Nayik G.A., Pandita A. Beetroot. In: Nayik G.A., Gull A. (eds.) *Antioxidants in Vegetables and Nuts - Properties and Health Benefits*. Springer Singapore, 2020, pp. 45-74. https://doi.org/ 10.1007/978-981-15-7470-2_3

22. Кургузова К.С., Зайко Г.М., Мищенко Е.А. Биометрическая и биохимическая характеристики столовой свеклы как сырья для производства продуктов функционального назначения // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2012. № 1 (325). С. 12-14. https://www.elibrary.ru/ item.asp?id=17586726

23. Джабоева А.С., Туменова А.Х., Хатохов Д.М. Биохимическая характеристика ботвы столовой свеклы, оценка ее безопасности и возможности использования в производстве продуктов профилактического назначения // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова.* 2020. № 1 (27). С. 38-43. https://www.elibrary.ru/ item.asp?id=42877065

24. Буренин В.И., Пискунова Т.М., Соколова Д.В. Проблема качества корнеплодов свеклы столовой и пути ее решения // *Овощи России*. 2016. № 3 (32). С. 24-31. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27330412

25. Gashash E.A., Ashmawi A.E., El-Taher A.M., Omar M.A., Osman N.A., Taha N.M., Elkelish Amr. Effect of fertilizing with different levels of phosphorous and zinc on the botanical characteristics of table beet (*Beta vulgaris L.). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2022. Vol. 50(1), 12579 https://doi.org/10.15835/nbha50112579

26. Kadam V.D., Shinde S.J., Syed S.J. Effect of different spacing and fertilizer levels on growth parameter and quality parameters of beetroot (*Beta vulgaris L.*). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2018. Vol. 7(5), pp. 2845-2848 https://www.phytojournal.com/ archives/2018/vol7issue5/PartAV/7-5-316-374.pdf

27. Свекла столовая «Двусемянная ТСХА» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://leplants.ru/veta-vulgaris-var-vulgaris-dvusemyannaya-tsha/ (дата обращения 27.07.2022).

28. Rakutko S.A., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. In: *Engineering for Rural Development*. Proc. 17th Int. Sci. Conf., Jelgava, Latvia: LLU. 2018, pp. 186-191. https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N196

29. Зорина А. А. Методы статистического анализа флуктуирующей асимметрии // *Принципы экологии*. 2012. № 3. С. 24–47. https://doi.org/10.15393/j1.art.2012.1461

30. Ракутько С.А., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н., Маркова А.Е. Исследование возможности биоиндикации агроэкосистем по растениям со спиральным филлотаксисом // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. № 2 (111). С. 22-42. https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2022-2111-22-41

31. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Мишанов А.П. Влияние параметров световой среды на содержание хлорофилла в листьях рассады томата и их оптические свойства // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.* 2020. № 60. С. 67-74. https://doi.org/10.24411/2078-1318-2020-13067

32. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Методика измерения оптической плотности листьев растений с применением денситометра ДП-1М // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 94. С. 23-35. https://doi.org/ 10.24411/0131-5226-2018-10003

33. Rueden C. T., Schindelin J., Hiner M. C., DeZonia B. E., Walter A. E., Arena E. T., Eliceiri K. W. ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 2017. Vol. 18(1), 529. https://doi.org/ 10.1186/s12859-017-1934-z

REFERENCES

1. Steffen W., Richardson K., Rockstrom J., Schellnhuber H.J., Dube O.P., Dutreuil S., Lenton T.M., Lubchenco J. The emergence and evolution of Earth System Science. *Nat Rev Earth Environ* 2020. Vol. 1: 54-63. https://doi.org/10.1038/s43017- 019-0005-6.

2. Neverova O.A., Eremeeva N.I. Opyt ispol'zovaniya bioindikatorov v otsenke zagryazneniya okruzhayushchei sredy: analiticheskii obzor [Experience of using bioindicators to estimate the pollution of environment]. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mi-rovoi literatury*. 2006. No. 80: 1-88 (In Russian) https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9306119 .

3. Cordier T., Alonso-Saez L., Apotheloz-Perret-Gentil L. et al. Ecosystems monitoring powered by environmental genomics: a review of current strategies with an implementation roadmap. *Mol Ecol*, 2020. Vol. 30 (13): 2937-2958. https://doi.org /10.1111/mec.15472

4. Sagova-Mareckova M., Boenigk J., Bouchez A. et al. Expanding ecological assessment by integrating microorganisms into routine freshwater biomonitoring. *Water Res* 2021. Vol. 191, 116767. https://doi.org/ 10.1016/j.watres.2020.116767.

5. Ulanowicz R.E. The tripartite nature of causalities in ecosystem dynamics. *Curr Opin Syst Biol* 2019. Vol. 13: 129-135. https://doi.org/10.1016/j. coisb.2018.12.006.

6. Theodor Sperlea T., Heider D., Hattab G. A theoretical basis for bioindication in complex ecosystems. *Ecological Indicators* 2022. Vol. 140, 109050. https://doi.org/10.1016/ j.ecolind.2022.109050.

7. Kulik K. N., Isakov A. S., Novochadov V. V. Novye vozmozhnosti analiza listovykh plastinok derev'ev-bioindikatorov v otsenke sostoyaniya okruzhayushchei sredy v usloviyakh aridnoi zony [Leaf blades of bioindicator trees: new possibilities for analysis in the assessment of the environmental state in the conditions of the arid zone]. *Izvestiya NV AUK*. 2021. No. 1(61): 25-36. (In Russian)

https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-01-02.

8. Bezel V.S., Zhuikova T.V. Khimicheskoe zagryaznenie sredy: vynos khimicheskikh elementov nazemnoi fitomassoi travyanistoi rastitel'nosti [Chemical pollution: transfer of chemical elements to the aboveground phytomass of herbaceous plants]. *Ekologiya*. 2007. No. 4: 259-267. (In Russian) https://elibrary.ru /item.asp?id=9517276

9. Radionov A.S., Serdyukova A.V., Shumilov Yu.V. Ispol'zovanie rastitel'no-ovoshchnykh bioindikatorov dlya lokal'no-regional'nykh ekologicheskikh otsenok [Use of vegetable and vegetable bioindicators for local and regional ecological estimates]. *XXI vek: itogi pro-shlogo i problemy nastoyashchego plyus*. 2014. No. 5 (21): 123-129 (In Russian) https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22498688

10. Kavelenova L.M., Kravtseva A.P., Trubnikov A.M., Yankov N.V. K vozmozhnostyam otsenki funktsional'noi aktivnosti listovykh plastinok drevesnykh rastenii [Concerning the possibilities of functional activity evaluation for tree leaf lamina]. *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2013. Vol. 15. No. 3-7: 2333-2336 (In Russian) http://www.ssc.smr.ru/media /journals/ izvestia/2013/ 2013_3_2333_2336.pdf

11. Rakutko E.N., Rakutko S.A., Jian Su, Yang Ma. Metody bioindikatsionnoi otsenki sostoyaniya agroekosistem: analiticheskii obzor [Bioindication methods for the agroecosystems assessment: a review]. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 1 (110): 19-42. (In Russian) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2022-1110-19-42

12. Rakutko E.N., Rakutko S.A., Vaskin A.N., Su Jian. Opyt primeneniya fraktal'nogo analiza pri bioindikatsii agroekosistem na primere list'ev svekly (*Beta vulgaris L.*) [Experience with fractal analysis in bioindication of agroecosystems on the example of beet leaves (*Beta Vulgaris L.)*]. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 2 (111): 42-61. (In Russian)

https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2022-2111-42-60

13. Monogarova O.V., Oskolok K.V., Apyari V.V Tsvetometriya v khimicheskom analize [Colorimetry in chemical analysis]. *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2018. Vol. 73. No. 11: 857-867 (In Russian) https://elibrary.ru/ item.asp?id=36362081

14. Schults E.V., Monogarova O.V., Oskolok K.V. Tsifrovaya tsvetometriya: analiticheskie vozmozhnosti i perspektivy ispol'zovaniya [Digital colorimetry: analytical possibilities and prospects of use]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya*. 2019. Vol. 60. No. 2: 79-87 (In Russian)

https://elibrary.ru/item.asp?id=36923396

15. Tiras Kh.P., Nefedova S.E., Apyari V.V. Biologicheskaya tsvetometriya kak novyi metod v dinamicheskoi morfometrii [Biological colorimetry as a new method in dynamic morphometry]. In: *Situatsionnye tsentry i informatsionno-analiticheskie sistemy klassa 4i dlya zadach monitoringa i bezopasnosti (SCVRT2019). Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii.* [Situational Centers and Class 4i Information and Analytical Systems for Monitoring and Security Problems, Proc. SCVRT2019 Int. Sci. Conf.]. Pushchino, Russia: ITEB RAN, 2019: 77-83 (In Russian)

https://elibrary.ru/ item.asp?id=41725575

16. Backhaus A., Kuwabara A., Bauch M., Monk N., Sanguinetti G., Fleming A. LEAFPROCESSOR: a new leaf phenotyping tool using contour bending energy and shape cluster analysis. *New Phytologist.* 2010. Vol. 187: 251-261. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137. 2010.03266.x.

17. Cope J.S., Corney D., Clark J.Y., Remagnino P., Wilkin P. Plant species identification using digital morphometrics: a review. *Expert Syst Appl* 2012. Vol. 39: 7562-7573. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.073

18. Backes A.R., Casanova D., Bruno O.M. Color texture analysis based on fractal descriptors. *Pattern Recogn* 2012. Vol. 45: 1984-1992 https://doi.org/10.1016/j.patcog.2011.11.009

19. Maksimov D.A., Valkama E., Minin V.B., Ranta-Korhonen T., Zakharov A.M. Podkhody k osvoeniyu organicheskogo zemledeliya [Approaches to harnessing organic agriculture]. *AgroEkoInzheneriya.* 2020. No. 4 (105): 101-113 (In Russian) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10270

20. Romanovsky N.V. Vozdelyvanie stolovoi svekly v organicheskom sevooborote [Cultivation of table beet in organic crop rotation]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva me-khanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2017. No. 93: 48-53 (In Russian) https://www.elibrary.ru/ item.asp?id=30782049

21. Pandita D., Reddy R., Nayik G.A., Pandita A. Beetroot. In: Nayik G.A., Gull A. (eds.) *Antioxidants in Vegetables and Nuts - Properties and Health Benefits*. Springer Singapore, 2020: 45-74. https://doi.org/ 10.1007/978-981-15-7470-2_3

22. Kurguzova K.S., Zaiko G.M., Mishchenko E.A. Biometricheskaya i biokhimicheskaya kharak-teristiki stolovoi svekly kak syr'ya dlya proizvodstva produktov funktsional'nogo nazna-cheniya [Biometric and biochemical characteristics of table beet as raw materials for manufacture of the functional purpose products]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya.* 2012. No. 1 (325): 12-14. (In Russian) https://www.elibrary.ru/ item.asp?id=17586726

23. Dzhaboeva A.S., Tumenova A.Kh., Hatokhov D.M. Biokhimicheskaya kharakteristika botvy stolovoi svekly, otsenka ee bezopasnosti i vozmozhnosti ispol'zovaniya v proizvodstve pro-duktov profilakticheskogo naznacheniya [Biochemical characteristics of table beet tops, assessment of its safety and possibilities of use in the production of preventive purpose products]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvenno-go agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova.* 2020. No. 1 (27): 38-43. (In Russian) https://www.elibrary.ru/ item.asp?id=42877065

24. Burenin V.I., Piskunova T.M., Sokolova D.V. Problema kachestva korneplodov svekly stolovoi i puti ee resheniya [Problem of table beet roots quality and ways of solving]. *Ovoshchi Rossii*. 2016.

No. 3 (32): 24-31. (In Russian) https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27330412

25. Gashash E.A., Ashmawi A.E., El-Taher A.M., Omar M.A., Osman N.A., Taha N.M., Elkelish Amr. Effect of fertilizing with different levels of phosphorous and zinc on the botanical characteristics of table beet (*Beta vulgaris L.). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2022. Vol. 50(1), 12579. https://doi.org/10.15835/nbha50112579

26. Kadam V.D., Shinde S.J., Syed S.J. Effect of different spacing and fertilizer levels on growth parameter and quality parameters of beetroot (*Beta vulgaris L.*). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2018. Vol. 7(5): 2845-2848 https://www.phytojournal.com/ archives/2018/vol7issue5/PartAV/7-5-316-374.pdf

27. Svekla stolovaya «Dvusemyannaya TSKhA» [Table beet of Dvusemyannaya TSKhA cultivar]. Available at: https://leplants.ru/veta-vulgaris-var-vulgaris-dvusemyannaya-tsha/ (accessed 27.07.2022) (In Russian)

28. Rakutko S.A., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. In: *Engineering for Rural Development.* Proc. 17th Int. Sci. Conf. Jlgava, Lativia: LLU. 2018: 186-191. https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N196 (In English)

29. Zorina A. A. Metody statisticheskogo analiza fluktuiruyushchei asimmetrii [Methods of statistical analysis of fluctuating asymmetry]. *Printsipy ekologii*. 2012. No. 3: 24–47. (In Russian) https://doi.org/10.15393/j1.art.2012.1461

30. Rakutko S.A., Mishanov A.P., Rakutko E.N., Markova A.E. Issledovanie vozmozhnosti bioindikatsii agroekosistem po rasteniyam so spiral'nym fillotaksisom [Study into the feasibility of bioindication of agroecosystems by plants with spiral phyllotaxis]. *AgroEkoInzheneriya.* 2022. No. 2 (111): 22-42 (In Russian) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2022-2111-22-41

31. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Mishanov A.P. Vliyanie parametrov svetovoi sredy na soderzhanie khlorofilla v list'yakh rassady tomata i ikh opticheskie svoistva [Impact of light environment parameters on the chlorophyll content in tomato transplant leaves and their optical properties]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2020. No. 60: 67-74 (In Russian) https://doi.org/10.24411/2078-1318-2020-13067

32. Rakut'ko E.N., Rakut'ko S.A. Metodika izmereniya opticheskoi plotnosti list'ev rastenii s primeneniem densitometra DP-1M [Measurement technique of plant leave optical density with DP-1M densitometer]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekha-nizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva.* 2018. No. 94: 23-35 (In Russian) https://doi.org/ 10.24411/0131-5226-2018-10003

33. Rueden C. T., Schindelin J., Hiner M. C., DeZonia B. E., Walter A. E., Arena E. T., Eliceiri K. W. ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 2017. Vol. 18(1), 529. https://doi.org/ 10.1186/s12859-017-1934-z

УДК 58.035/57.084.2:633.491 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-24-39

МОРФО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД В БИОИНДИКАЦИИ ПО СТАБИЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ КАРТОФЕЛЯ (*SOLANUM TUBEROSUM)*

С.А. Ракутько , д–р техн. наук; Е.Н. Ракутько

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

Оценка стабильности индивидуального развития растений является распространенным подходом в экологическом мониторинге и биоиндикации. Удобным параметром для определения стабильности служит величина флуктуирующей асимметрии. При ее расчете в качестве билатеральных признаков наиболее часто используют морфологические. Исследовали влияние спектра на физиологический (содержание хлорофилла) и морфологические (ширину и длину) билатеральные признаки долей листьев картофеля. Цель работы – подтверждение гипотезы о воздействии различий в спектральном составе излучения на уровень флуктуирующей асимметрии билатеральных признаков листьев картофеля, а также выявление взаимосвязи величин флуктуирующей асимметрии, найденных по физиологическому и морфологическим признакам. Анализируемые признаки измеряли у различных долей сложного листа картофеля – с первого по четвертый. Картофель выращивали в естественных условиях; различие спектров обеспечивали применением цветных укрывных пленок. Белая и синяя пленки имели практически одинаковые спектральные характеристики, пропуская свет достаточно равномерно на всем диапазоне длин волн ФАР на уровне 90…92 %. Красная пленка демонстрировала спад в пропускательной способности в синей области ФАР до уровня 80 %. Растения на контрольном участке выращивали без укрытия. Выявлено значимое влияние спектрального состава на размер листьев и содержание в них хлорофилла. Применение красной пленки по сравнению с синей и белой пленкой привело к снижению площади поверхности листьев на 22% и увеличению содержания в них хлорофилла на 9 %. При этом наблюдалось увеличение флуктуирующей асимметрии на 21%. На примере растений картофеля экспериментально доказано, что показатели флуктуирующей асимметрии могут быть использованы для оценки влияния агротехнических приемов на рост и развитие растений. Выявленные закономерности дают возможность лучше понять механизмы приспособления растений в регулируемых условиях произрастания.

Ключевые слова: биоиндикация, флуктуирующая асимметрия, картофель, лист, спектр, хлорофилл, билатеральный признак, морфологический признак, физиологический признак, стабильность развития

Для цитирования: Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Морфо-генетический подход в биоиндикации по стабильности развития растений на примере картофеля (*SOLANUM TUBEROSUM)* // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3(112). С.24-39

MORPHO-GENETIC APPROACH IN BIOINDICATION BY PLANT DEVELOPMENTAL STABILITY ON THE EXAMPLE OF POTATO (*SOLANUM TUBEROSUM*)

S.A. Rakutko , DSc (Engineering); ыеп E.N. Rakutko
ы04

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

A common approach in environmental monitoring and bioindication is the assessment of plant developmental stability. The fluctuating asymmetry is a convenient parameter in this respect. The morphological traits are most often used as bilateral ones in calculating this parameter. The study considered the effect of the radiation spectrum on morphological (width and length) and physiological (chlorophyll content) bilateral traits of the potato leaf lobes grown under different light quality. The study aimed to confirm the hypothesis about the influence of different light quality on the level of fluctuating asymmetry of bilateral traits in the potato leaves and to reveal the relationship between the fluctuating asymmetry values calculated by morphological and physiological traits. The considered traits were measured in different lobes of a compound potato leaf (from the first to the fourth). The potatoes were grown in natural conditions. The colored covering films provided the difference in light quality. White and blue films had practically the same spectral characteristics and transmitted the light fairly evenly over the entire PAR wavelength range at a level of 90 to 92%. The red film demonstrated a drop in transmission capacity in the blue range of PAR up to 80%. Plants in the control plot were grown uncovered. The study revealed a significant influence of light quality on the leaf size and chlorophyll content. The use of red films resulted in a 22% decrease in the leaf surface area and a 9% increase in chlorophyll content against the blue and white films. At the same time, a 21% increase in the fluctuating asymmetry was observed. The experiments proved on the example of potato plants that the fluctuating asymmetry indicators could be used to assess the influence of cultivating practices on the growth and development of plants. The revealed patterns contribute to better understanding of plant adaptation mechanisms in regulated growing conditions.

Keywords: bioindication, fluctuating asymmetry, potato, leaf, light quality, chlorophyll, bilateral trait, morphological trait, physiological trait, developmental stability

For citation: Rakutko S.A., Rakutko E.N. Morpho-genetic approach in bioindication by plant developmental stability on the example of potato (*SOLANUM TUBEROSUM*). *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 3 (112): 24-39 (In Russian)

Введение

Большой научный и практический интерес представляет оценка стабильности развития растений под действием факторов окружающей среды. Для естественных условий, в природных популяциях, исследование стабильности находит широкое применение в рамках популяционной биологии развития, при изучении последствий антропогенного воздействия на природную среду, оценки ее качества. Для искусственных условий

выращивания растений данный подход является одним из центральных в рамках энергоэкологии светокультуры [1, 2], в силу актуальности при оценке возможности применения различных источников света в целях оптимизации светокультуры [3].

Внешним проявлением стабильности развития растений на макроуровне является явление флуктуирующей асимметрии (ФА) как ненаправленные различия между правой и левой сторонами морфологических структур, в норме обладающих билатеральной симметрией. Другими словами, те билатеральные признаки (БП), у которых исходя из общей архитектуры растения, можно было ожидать идеальную симметрию, в реальности статистически демонстрируют незначительные и случайные отклонения от идеальной симметрии. Считается, что уровень ФА является минимальным при оптимальных условиях среды и возрастает при любых стрессовых воздействиях. При этом происходят анатомо-морфологические флуктуации в вегетативных и генеративных органах растений. Поэтому изучение явления ФА является важным для оценки уровня воздействия факторов на биологический обьект [4].

В лаборатории энергоэкологии светокультуры ИАЭП проведены исследования по выявлению взаимосвязи уровня ФА растений со стрессом и качеством световой среды при выращивании растений в искусственных условиях [5]. Исследования проводили на растениях томата (в лабораторных условиях [6] и в промышленной теплице [7]), огурца [8], петрушки [9]. Представляет интерес расширение таких исследований в целях пополнения базы известных фактов о ФА различных видов растений.

Картофель (*Solanum tuberosum*) является одной из наиболее широко употребляемой в пищу овощной культурой во всем мире. Он содержит большое количество углеводов, свободных незаменимых аминокислот, белка, волокон, минералов и витаминов.

Большое количество информации получено исследователями в последнее время при выращивании растений картофеля *in vitro*. Установлено, что при высокой интенсивности излучения со спектром, имитирующем солнечный, наблюдается подавление роста, уменьшение количества листьев и сырого веса растений. При понижении интенсивности излучения, напротив, выявлено достоверное увеличение высоты растений, размеров листа и количества листьев [10].

Спектральный состав света, как и его интенсивность, является сильным морфогенетическим фактором, регулирующим ростовые реакции растения. Показано, что развитием морфологии растения можно управлять изменением спектрального состава излучения в области фотосинтетически активной радиации (ФАР). У картофеля под синим цветом наблюдался меньший размер клеток, чем под красным [11]. Сообщается, что красный свет приводит к большей длине стебля. Синий свет напротив, уменьшает высоту растения. Наибольшее количество листьев на микрорастениях было получено при голубом свете. Количество корней было увеличено тепло-белым светом, но оно уменьшилось с добавлением красного [12]. Использование белого и красного света приводит к увеличению массы корней, что указывает на на увеличение их активной поглощающей поверхности, способствующей увеличению побега [13].

Использование наборов красно-синих и красно-сине-зеленых диодов показало больший рост проростков картофеля *in vitro* с увеличением диаметра стебля, сырой массы и содержания сухого вещества. Использование только синих СД привело к наибольшему диаметру стебля, содержанию

растворимого белка и свободной аминокислоты. После пересадки в теплице в течение 2 месяцев, растения, выращиваемые только на синих СД, увеличили сухую и сырую массу у самого большого клубня, однако уменьшили количество клубней на росток. Сочетание красных, синих и зеленых СД привело к увеличению количества клубней, их сырой массе и содержания сухого вещества. Состояние проростков картофеля в конце стадии *in vitro* влияет на выработку мини-клубней после пересадки [14].

Выявлено, что различное соотношение распределения энергии в спектре излучения между синим и красным диапазоном существенно влияет на ростовые процессы и активность фотосинтетического аппарата у картофеля в течение онтогенеза. Исследовали рост и развитие растений картофеля под СД облучателями с максимумами 660/450 нм и 630/470 нм. Для второго варианта наблюдалась большая биомасса надземной части (в 2,5 раза), высота стебля (в 1,4), площадь листовой поверхности (в 2.1 раза), при меньшем содержании хлорофиллов (в 1,2 раза) и менее эффективной работе фотосинтетического аппарата (в 1,5 раза). Различия в показателях авторы обьясняют большей скоростью фотосинтеза при более близком положени пиков излучения в спектре (660/450) к максимумам поглощения пигментов. Масса клубней для первого варианта была большей почти в 10 раз. Такие результаты могут быть связаны с изменением гормонального баланса в растении в процессе онтогенеза [15]. Отмечается, что преобладание красного света усиливает накопление гибереллинов в надземной части растения, что приводит к увеличению площади листовой поверхности в начальный период роста [16]. Синяя часть спектра вызывает накопление цитокининов в подземных органах растений приводит к усилению клубнеобразования в конце вегетации [17].

В естественных условиях изменение интенсивности и спектрального состава происходит в зависимости от высоты Солнца над горизонтом и времени суток. При прямом излучении Солнца соотношение между синей и красной спектральными областями составляет около 0,5, при диффузном – около 0,95. Исследовали длительное действие излучения всей областью ФАР на активность первичных процессов и скорость фотосинтеза при добавке синего и красного потока. При добавке красного потока была отмечена меньшая скорость фотосинтеза как при низких, так и высоких уровнях облученности. Изменение спектрального режима с повышенной долей красного на повышенную долю синего приводило к увеличению скорости фотосинтеза, некоторому повышению эффективного квантового выхода и усилению нефотохимического тушения. При обратном изменении эти показатели соответственно снижались [18].

Целью работы является подтверждение гипотезы о влиянии различий в спектральном составе излучения на уровень ФА БП листьев растений картофеля, а так же определение этой величины в полевых условиях и ее изменения под влиянием накрывных пленок различного цвета.

Материалы и методы

Эксперимент проводили на опытном участке в г. Пушкин (*59°44'11"N 30°24'33"E*) в 2021 г. Выращивали столовый, раннеспелый, красно-розовый сорт Ред Леди. Почва на участке суглинистая, pH 6,2. Размер делянок 1,5x3 м, расположение систематическое. Фон – предшествующие посадки картофеля. С осени под вспашку вносили суперфосфат (1 кг/сотку) и серно-калийные удобрения (2 кг/сотку). При посадке в лунку добавляли горсть перегноя.

Пророщенные клубни на расстоянии 30 см сажали в борозды, идущие в направлении с севера на юг. Расстояние между бороздами 60-65 см. Посадки вели 27 апреля. Полив рядков под пленками осуществляли в количестве выпавших естественных осадков на контрольной делянке. Проводили рыхление и окучивание. Погодные условия вегетационного периода: температура и количество осадков соответствовали средним многолетним для региона, ранняя весна, солнечное лето. Условия для развития растений были благоприятные.

Спектральный состав излучения, действующий на листья картофеля при его выращивании в естественных условиях, корректировали с помощью цветных пленок. На рисунках 1 и 2 показаны посадки картофеля соответственно 12 мая и 12 июня.

Рис.1. Посадки картофеля под пленками различного цвета (12 мая)

Рис. 2. Посадки картофеля под пленками различного цвета (12 июня)

Пленки различного цвета были натянуты на дуги, смонтированные на деревянных рамках размерами 1,5 х 3,0 м. Для обеспечения вентиляции торцы у получившихся укрытий отсутствовали. Кроме того, для этих же целей укрытия были подняты над уровнем почвы на высоту 0,2 м.

Спектральные коэффициенты пропускания пленок измеряли в лабораторных условиях с помощью установки на базе спектроколориметра ТКА-ВД/04. Найдено, что белая (W) и синяя (B) пленки имеют практически одинаковые спектральные характеристики, пропуская свет достаточно равномерно на всем диапазоне длин волн ФАР на уровне 90…0,92 %. Красная (R) пленка имеет спад в пропускательной способности в синей области ФАР до уровня 80 %. Это обстоятельство позволяет ожидать отличий в отклике растений (стабильности их развития, оцениваемой по величине ФА), выращиваемых именно под красной пленкой.

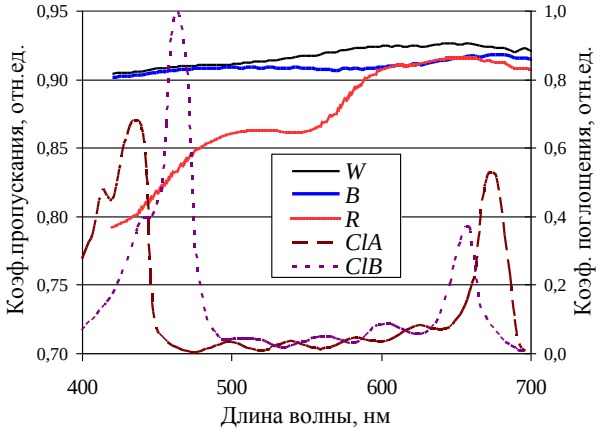

Рис. 3. Спектральные коэффициенты пропускания пленок и поглощения хлорофиллов

У картофеля листья прерывисто-непарно-перисторассеченные, состоящие из конечной доли и боковых долей, между которыми расположены более мелкие дольки.

Для определения величины ФА с растений собирали не пораженные, зеленые листья с каждого варианта опыта. Измерение биометрических показателей вели 26-29 июня. Листья отбирали после завершения их интенсивного роста.

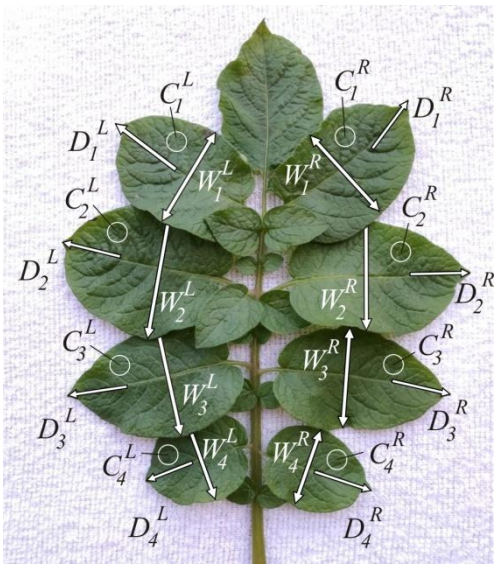

Рис. 4. Билатеральные признаки листа картофеля

В качестве билатеральных признаков были приняты (рис. 4): длины центральных жилок у долей, с 1-й по 4-ю, от верхушечного сложного листа картофеля слева (D_1^L … D_4^L) и справа (D_1^R … D_4^R) [19]; ширины этих долей слева (W_1^L … W_4^L) и справа (W_1^R … W_4^R) содержание в них хлорофилла слева (C_1^L … C_4^L) и справа (C_1^R … C_4^R) соответственно.

Длины жилок измеряли с помощью линейки с точностью до 0,5 мм. При определении ширины доли листа складывали пополам. Неразрушающее определение содержания хлорофилла в относительных единицах CCI (*Chlorophill Content Index*) производили оптическим методом с помощью прибора CCM-200 (Opti-Science, USA). Использовали методику определения ФА БП по оптическим характеристикам листьев [20, 21].

Наличие асимметрии признака для *i*-го измерения *j*-го билатерального признака B_j, в качестве которых принимали упомянутые выше признаки, считали в случае ее превышения некоторой величины Δ (порога различения).

$$n_{ji} = \begin{cases} 1, \text{если } \left|B_{ji}^L - B_{ji}^R\right| \geq \Delta \\ 0 \end{cases}. \qquad (1)$$

Частоту встречаемости этого признака определяли как долю таких измерений от общего их количества *N*

$$\varpi_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} n_{ji}\,. \qquad (2)$$

Значение показателя ФА вычисляли по формуле

$$\Phi A_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left|B_{ji}^L - B_{ji}^R\right|}{2\cdot(B_{ji}^L + B_{ji}^R)}\,. \qquad (2)$$

Урожай убрали 11 августа. Произвели раздельный учет общей массы клубней картофеля, полученных с каждой делянки (рис. 5).

Рис. 5. Уборка и учет урожая картофеля

Полученные данные обрабатывали с помощью пакетов программ *Statistica* 6.0 and *Excel 2003*. Статистические различия анализировали с использованием методов дисперсионного анализа. Значимость различий оценивали на уровне p≤0.05 с помощью критерия Фишера.

В двухфакторной модели дисперсионного анализа для каждого цвета

пленки (3 варианта и контроль) и номера листочка (4 варианта) анализировали содержание хлорофилла в листьях и их размеры.

Статистическая обработка результатов оценки уровня ФА включала проверку данных для нормального распределения разницы между двусторонними признаками; наличие направленной асимметрии и антисимметрии; на зависимости величины асимметрии признака от его размера; сравнение уровня ФА у растений, выращенных под разными пленками.

Результаты и обсуждение

В таблицах ниже для каждого фактора и для их взаимодействий приведены результаты проверки гипотезы о равенстве средних (по градациям) фактора. Эта же гипотеза может быть сформулирована как равенство нулю всех отклонений средних по градациям фактора от генерального среднего. В строках указаны источники вариации. Жирным шрифтом выделены факторы их взаимодействия, которые оказывают значимое влияние на результативный признак. Например, в таблице 1 для всех факторов (П – тип пленки, Л – номер доли листа), а так же взаимодействия П*Л нулевая гипотеза отклоняется, а выполняется альтернативная гипотеза, что означает их влияние на среднюю длину доли листа.

Таблица 1

Результаты проверки гипотезы о равенстве средних длины долей листа D

	SS	*df*	*MS*	*F*	*p*
П	2633,6	3	877,9	5,4	0,00
Л	40671,1	3	13557,0	83,4	0,00
П*Л	3346,3	9	371,8	2,2	0,01
Error	55265,9	340	162,5		

На графиках, приведенных ниже, показаны средние значения взаимодействия по сочетанию градаций факторов (доверительный интервал 95%).

На рисунке 6 взаимодействие факторов (изменения одного эффекта под воздействием другого) заключается в изменении длины доли листа у растений, выращиваемых под различным типом пленки. Средние значения получены усреднением каждой из повторностей, соответствующих сочетанию факторов в эксперименте.

Наибольшие значения длины наблюдаются у второй доли листа, что связано с его морфологией, определяемой генетически. Варьирование спектральным составом изменяет эти пропорции. Под красной пленкой (задерживающей синее излучение) размеры долей листа имеют тенденцию к уменьшению.

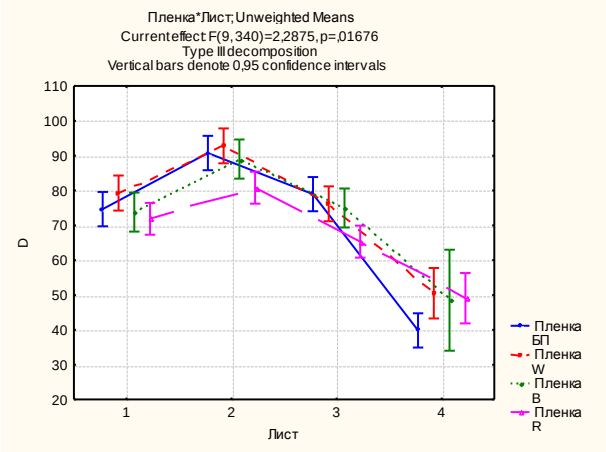

Рис. 6. Взаимодействие факторов типа применяемой пленки и номера доли при влиянии на длину доли листа

В таблице 2 приведены результаты проверки гипотезы о равенстве средних для ширины долей листа

Таблица 2

Результаты проверки гипотезы о равенстве средних ширины долей листа W

	SS	*df*	*MS*	*F*	*p*

П	2223,5	3	741,1	17,9	0,00
Л	6671,1	3	2223,7	53,9	0,00
П*Л	763,0	9	84,7	2,0	0,03
Error	14004,8	340	41,1		

Анализ свидетельствует о значимости как отдельных факторов, так и их взаимодействия. На рисунке 7 взаимодействие факторов при влиянии на ширину доли листа.

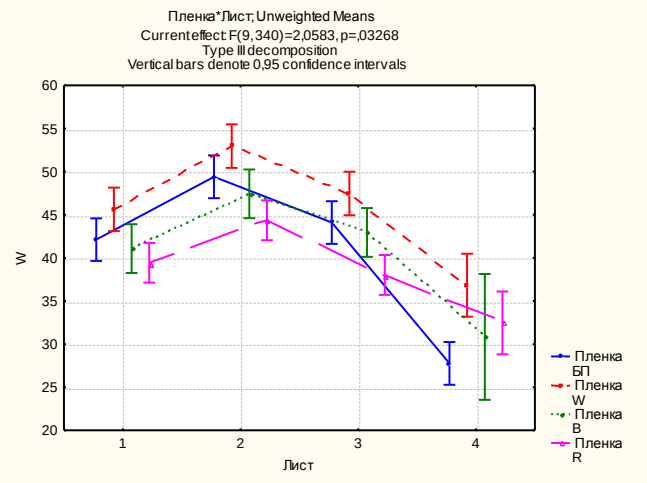

Рис. 7. Взаимодействие факторов типа применяемой пленки и номера доли при влиянии на ширину доли листа

В таблице 3 приведены результаты проверки гипотезы о равенстве средних для содержания хлорофилла в долях листа

Таблица 3

Результаты проверки гипотезы о равенстве средних содержания хлорофилла С

	SS	*df*	*MS*	*F*	*p*
П	402,2	3	134,0	18,7	0,00
Л	661,2	3	220,4	30,8	0,00
П*Л	31,8	9	3,5	0,4	0,87
Error	2429,6	340	7,1		

На рисунке 8 показано взаимодействие факторов при влиянии на содержание хлорофилла.

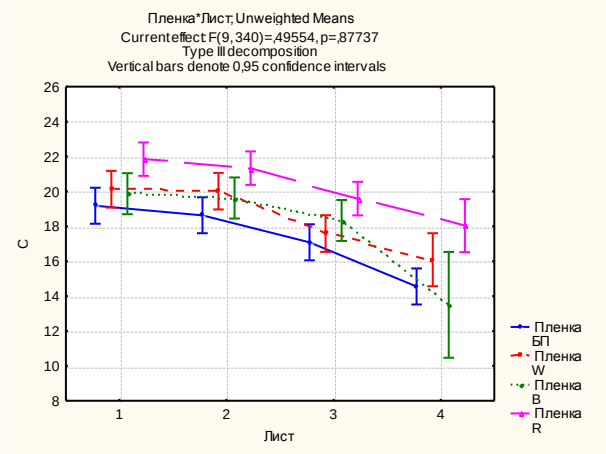

Рис. 8. Взаимодействие факторов типа применяемой пленки и номера доли при влиянии на содержание хлорофилла в доле листа

Здесь обращает на себя внимание следующий эффект. Если влияние типа пленки на геометрические размеры долей листа увеличивалось в ряду R, B, W и БП, то содержание хлорофилла – уменьшалось. Другими словами – у долей листа с большими геометрическими размерами наблюдалась меньшая концентрация хлорофилла.

При дальнейшей математической обработке данные по четвертой доли листа были исключены в силу их большого статистического разброса на участке под синей пленкой, вызванного, как мы предполагаем, ее не полной сформированностью на листе к моменту измерений. В силу близости для синей и белой пленки значения показателей объединены и представлены средними (табл. 4).

Таблица 4

Средние значения признаков

Признак	Тип пленки		Δ, %
	Ср. B и W	R	
Площадь листа, см^2	164,9	130,0	-22
Сод. хлорофилла, отн.ед.	19,3	20,9	+9

Частоты встречаемости асимметричных признаков у листьев картофеля, взятых с растений, выращенных под пленками различного цвета показаны в таблице 5.

Данный вид анализа свидетельствует, что у выбранных признаков наблюдается асимметрия различной степени выраженности.

Таблица 5

Частота встречаемости асимметричных признаков %,

Тип пленки	Номер доли листа		
	1	2	3
БП	0,73	0,64	0,78
W	0,63	0,59	0,84
B	0,55	0,65	0,83
R	0,72	0,62	0,82

Значения индексов ФА, вычисленных по отдельным билатеральным признакам, показаны на рисунке 9. Физиологическим признаком здесь является содержание хлорофилла, морфологическим – среднее значения ФА для длин и ширин долей листа.

Известно, что различные билатеральные признаки листа демонстрируют различную чувствительность к изменению экологической ситуации по индексу ФА [22].

В нашем случае, независимо от признака, на котором базируется расчет ФА, ее величина качественно следует закономерности: наибольшее значение наблюдается на контрольной делянке, без применения пленочного укрытия; при белой и синей пленках (имеющих практически одинаковую спектральную пропускательную способность) ее величина уменьшается; при красной пленке снова увеличивается, однако имеет меньшее значение, чем в контрольном варианте.

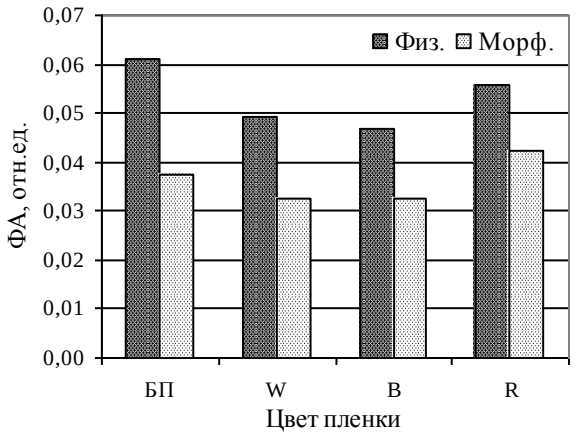

Рис. 9. Значения показателя ФА по различным признакам для растений, выращенных под различным типом пленки

Таким образом, результаты проведенного исследования показали, что ФА (а значит, и характеризуемая ей стабильность развития растения), вычисленная как по физиологическому (содержанию хлорофилла в листьях) так и по морфологическому (размеры долей листьев) зависит от спектрального состава излучения, под которым выращивали растения картофеля. При этом степень влияния типа пленки (т.е. спектра) различна.

Наименьшая стабильность развития (наибольшие значения ФА) наблюдается для контрольных растений, выращиваемых без укрывной пленки. На наш взгляд, применение близких по оптическим свойствам белой и синей пленок обеспечило повышение стабильности за счет создания эффекта укрытия. Несмотря на то, что были предприняты усилия по обеспечению воздушного и влажностного режима под пленками, идентичного контрольному участку, все же само наличие укрытия не могло не оказать влияние на растения. Причем, применение красной пленки повысило величину ФА по сравнению с синей и белой пленками.

По видимому, ответ на этот вопрос следует искать в том, что именно в синей зоне ФАР (400…500 нм) свойства пленок отличаются: красная пленка больше поглощает свет в этом диапазоне, то есть к растениям поступает поток, обедненный синим излучением. Здесь же лежат максимумы поглощения хлорофиллов листа, основная функция которых как важнейших пигментом заключается в способствовании преобразованию световой энергии в накопленную химическую. Содержание хлорофилла непосредственно определяет потенциал фотосинтеза и первичное производство. Также содержание хлорофилла дает косвенную оценку состояния питательных веществ, поскольку большая часть листового азота включена в хлорофилл. Содержание хлорофилла листьев так же тесно связано с растительным стрессом и старением, варьируется в зависимости от генетики растений, содержания минеральных элементов, факторов внешней среды и т.д. [23].

Многочисленными исследованиями доказана важная роль концентрации фотосинтетических пигментов в формировании урожая и накоплении биоэнергии растений в агроэкосистемах. Поглощение и трансформация солнечной энергии в процессе фотосинтеза обеспечивается за счет фотосинтетических пигментов растений. Количество и соотношение отдельных пигментов в растении зависят от многих факторов. Метаболические процессы, протекающие в растении в условиях действия неблагоприятных факторов, обеспечивают адаптацию за счет фотохимической активности, которая зависит от концентрации пигментов в фотосинтетических мембранах [24]. При этом происходит изменение не только его общего содержания, но и соотношение отдельных форм [25]. Неблагоприятные условия окружающей среды могут вызвать снижение концентрации хлорофилла и уменьшение интенсивности фотосинтеза [26].

Равновесие фотосинтетического аппарата растений при средовом стрессе поддерживается за счет изменения структуры листа, влияющей на изменения фотоактивной поверхности. При этом изменяется как количество хлоропластов, так и концентрация пигментов в фотосинтетических мембранах.

Стабильность развития растений является одной из наиболее общих характеристик состояния развивающегося организма, являющегося результатом взаимодействия случайных событий в организме растения и их способности точно следовать программе, заложенной в генотипе, сопротивляясь воздействиям окружающей среды во время развития для формирования оптимального фенотипа.

Высокая продуктивность растений обеспечивается при сбалансированности процессов роста и фотосинтеза. При неблагоприятных световых условиях у растений включаются компенсаторные механизмы, восполняющие недостаток одного параметра другим. Так, высокая интенсивность света приводит к меньшей площади листовой поверхности и повышенной скорости ассимиляции углекислого газа. При низкой интенсивности света низкая скорость фотосинтеза частично компенсируется увеличением площади листьев [27].

В работе исследовано явление флуктуации асимметрии билатеральных признаков листа картофеля, произрастающей в естественных условиях на делянках, где варьируемым фактором является спектральный состав излучения. Контролем является делянка с естественным солнечным светом,

экспериментальными – делянки, накрытые разноцветными пленками, корректирующими спектр проходящего излучения. Билатеральные признаки представлены двумя группами: морфологические признаки, определяющие форму листа (длины центральных жилок и ширины отдельных листочков) и физиологический признак (концентрация хлорофилла в листочках).

Сопоставление характеристик использованных в эксперименте пленок и свойств отдельных форм хлорофилла поглощать излучение отдельных длин волн свидетельствует, что для растений, выращиваемых под красной пленкой следует ожидать значимых отклонений в их реакции. Именно у этой пленки наблюдается минимум в пропускании излучения в синей области спектра, которое в максимальной степени воспринимается хлорофиллами.

Результаты эксперимента подтвердили это предположение. При менее благоприятных условиях, на участке без укрытия, наблюдаются наименьшие значения содержания хлорофилла в листьях. Как компенсация наблюдается увеличение геометрических размеров листа. В этих условиях наблюдается так же наименьшая стабильность развития (максимум величины ФА по обоим типам БП). Изменение спектра (уменьшение излучения в синей доли, необходимого для реакции хлорофилла) отрицательно сказывается на стабильности развития растений.

Выявленные эффекты достаточно тонкие и не проявились в урожайности культуры по клубням. Это соответствует другим исследованиям, где отмечается отсутствие общей закономерности в изменении коэффициента ФА и урожайности картофеля [28].

Заключение

Выявлено значимое влияние спектрального состава на размер листьев и содержание в них хлорофилла у растений картофеля, выращиваемых под прозрачными пленками с различной спектральной пропускательной способностью.

Применение красной пленки, частично поглощающей синее излучение, привело к снижению площади поверхности листа на 22% и увеличения содержания в них хлорофилла на 9 %.

Цвет укрывной пленки по разному сказался на стабильности развития растений. Величина ФА, вычисленная по морфологическим и физиологическому признаку в среднем по сравнению с белой и синей пленкой, была выше на 21% под красной.

Выявленные эффекты влияния степени благоприятности условий окружающей среды на рост растений картофеля и стабильность их развития расширяют базу известных фактов, сформированную для искусственных условий (светокультуры).

На примере растений картофеля экспериментально доказано, что показатели ФА могут быть использованы для оценки влияния агротехнических приемов на рост и развитие растений. Проведенное исследование может служить методической основой таких исследований.

Выявленные нами закономерности дают возможность лучше понять механизмы приспособления растений в регулируемых условиях произрастания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ракутько С.А. Концептуальные основы энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. № 6. С. 38-44.

2. Ракутько С.А., Маркова А.Е., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н. Энергоэкология светокультуры - новое междисциплинарное научное направление // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2016. № 90. С. 14-28.

3. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Оценка энергоэффективности источников оптического излучения для растений с позиций прикладной теории энергосбережения // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.* 2015. № 39. С. 359-366.

4. Palmer A. R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of non-normal distributions and power of statistical tests. *Acta Zool. Fenn*. 1992. Vol. 191, pp. 57-72.

5. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Маркова А.Е., Мишанов А.П., Курбанов С. Флуктуирующая асимметрия билатеральных признаков как критерий оценки качества облучения в светокультуре // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2017. № 91. С. 45-55.

6. Ракутько С.А., Мишанов А.П., Маркова А.Е., Ракутько Е.Н. Влияние соотношения энергии в коротко- и длинноволновом диапазоне ФАР на стабильность развития ювенильных растений томата (*Solanum Lycopersicum L.*) // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 95. С. 112-123.

7. Rakutko S., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. *Engineering for Rural Development.* Proc. 17th Int. Sc. Conf., Jelgava, Latvia: LLU, 2018, pp. 186-191.

8. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Avotins A., Berzina K. Irradiation level affects fluctuating asymmetry value of bilateral traits of cucumber in juvenile phase. *Agronomy Research*. 2018, vol. 16, No. 3, pp. 854-861.

9. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Kaposhko D.A., Vaskin A.N., Tranchuk A.S. Influence of light quality on fluctuating asymmetry of bilateral traits of forced parsley leaves. *Engineering for Rural Development.* Proc. 16th Int. Sc. Conf., Jelgava, Latvia: LLU, 2017. pp. 42-47.

10. Субботин Е. П., Гафицкая И. В., Наконечная О. В., Журавлев Ю. Н., Кульчин Ю. Н. Влияние искусственного солнечного света на рост и развитие растений-регенерантов *Solanum tuberosum. Turczaninowia*, 2018, № 21 (2). С. 32-39 DOI:10.14258/turczaninowia.21.2.4

11. Wilson D.A., Weigel R.C., Wheeler R.M., Sager J.C. Light spectral quality effects on the growth of potato (*Solanum tuberosum L.*) nodal cuttings in vitro. *In Vitro Cell Dev Biol Plant*. 1993, vol. 29, pp. 5-8.

12. Karmakar S., Zaman R., Nasiruddin M., Hossain M.M. Effect of different illumination types on in vitro microplants of potato. *European Journal of Biotechnology and Bioscience*. 2018. No. 6(6), pp. 76-80.

13. Головацкая И. Ф., Дорофеев В. Ю., Медведева Ю. В., Никифоров П. Е., Карначук Р. А. Оптимизация условий освещения при культивировании микроклонов *Solanum tuberosum* L. сорта Луговской *in vitro* // *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология*, 2013. Т. 4(24). С. 133-144.

14. Chen Li-li, Zhang Kai, Gong Xiao-chen, Wang Hao-ying, Gao You-hui, Wang Xi-quan, Zeng Zhao-hai, Hu Yue-gao. Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets in vitro and minituber production after transplanting in the greenhouse. *Journal of Integrative Agriculture.* 2020, No. 19(1), pp. 108-119 DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62633-X

15. Martirosyan Yu.Ts., Polyakova M.N., Dilovarova T.A., Kosobryukhov A.A. Photosynthesis and productivity of potato plants in the conditions of different spectral irradiation. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya* [*Agricultural Biology*]. 2013. No. 1, pp. 107-112.

16. Воскресенская Н.П., Дроздова И.С., Аксенова Н.П. Влияние света и фитогормонов на фотосинтез, рост и развитие картофеля сорта Миранда. В сб.: *Регуляция роста и развития картофеля*. М.: Наука, 1990. С. 20-29

17. Чайлахян М.Х. Механизмы клубнеобразования у растений. В сб.: *Регуляция роста и развития картофеля*. М.: Наука, 1990, С. 48-62.

18. Мартиросян Ю.Ц., Мартиросян Л.Ю., Кособрюхов А.А. Динамика фотосинтетических процессов в условиях переменного спектрального облучения растений // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 1. С. 130-139

19. Устюжанина О.А., Соколова Л.А., Стрельцов А.Б. Стабильность развития разных сортов картофеля как показатель направленного антропогенного воздействия. *Проблемы региональной экологии*. 2012. № 6. С. 110-112.

20. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Методика измерения оптической плотности листьев растений с применением денситометра ДП-1М // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 94. С.23-35.

21. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Васькин А.Н., Горбатенко Н.А., Забодаев Д.П., Яковенко Н.И. Применение измерителя ССМ-200 для оперативного определения содержания хлорофилла в листьях растений светокультуры // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2017. № 92. С. 18-25.

22. Иванов В.П., Иванов Ю.В., Марченко С.И., Кузнецов Вл.В. Использование индексов флуктуирующей асимметрии листа березы повислой для диагностики состояния фитоценозов в условиях техногенного загрязнения // *Физиология растений*. 2015. Т.62. № 3. С. 368-377.

23. Haboudane D., John R., Millera J.R., Tremblay N., Zarco Tejada P.J., Dextraze, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment.* 2002. No. 81, pp. 416-426.

24. Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А. Хлорофилл и продуктивность растений. М.: Наука, 2000. 135 с.

25. Воронина О.Е., Ефимцев Е.И., Татаринова Т.А. Пигментный аппарат растений в условиях антропогенного воздействия // *Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник*. 1999. № 2. С. 82.

26. Неверова О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // *Биосфера*. 2009. Т. 1. № 1. С. 82-92.

27. Протасова Н. Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // *Физиология растений*, 1987. Т. 34, № 4. С. 812-822.

28. Устюжанина О.А., Соколова Л.А. Изменение коэффициента флуктуирующей асимметрии растений картофеля при применении агротехнических приемов, не нарушающих стабильность развития культуры. *Проблемы региональной экологии*. 2014. № 5. С. 136-139.

REFERENCES

1. Rakutko S.A. Konceptual'nye osnovy energoekologii svetokul'tury [Conceptual framework of energy-and-ecology of indoor plant lighting]. *Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. No 6: 38-44. (In Russian)

2. Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Energoekologiya svetokul'tury - novoe mezhdisciplinarnoe nauchnoe napravlenie [Energy and ecological efficiency of indoor plant lighting as a new interdisciplinary research area]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva.* 2016. No. 90: 14-28. (In Russian)

3. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Ocenka energoeffektivnosti istochnikov opticheskogo izlucheniya dlya rastenij s pozicij prikladnoj teorii energosberezheniya [The evaluation of energy effectiveness of light sources for plants according to applied theory of power saving]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. No. 39: 359-366. (In Russian)

4. Palmer A. R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of non-normal distributions and power of statistical tests. *Acta Zool. Fenn.* 1992. Vol.191: 57-72.

5. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Markova A.E., Mishanov A.P., Kurbanov S. Fluktuiruyushchaya asimmetriya bilateral'nyh priznakov kak kriterij ocenki kachestva oblucheniya v svetokul'ture [Fluctuating asymmetry of bilateral traits as an indicator of irradiation quality in indoor plant lighting]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2017. No. 91: 45-55. (In Russian)

6. Rakutko S.A., Mishanov A.P., Markova A.E., Rakutko E.N. Vliyanie sootnosheniya energii v korotko- i dlinnovolnovom diapazone FAR na stabil'nost' razvitiya yuvenil'nyh rastenij tomata (*Solanum Lycopersicum L.)* [Effect of ratio of energy in short and long-wave range of PAR on developmental stability of juvenile plants of tomato (*Solanum Lycopersicum L.*)]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. No. 95: 112-123. (In Russian)

7. Rakutko S., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. *Engineering for Rural Development.* Proc. 17th Int. Sc. Conf., Jelgava, Latvia: LLU, 2018: 186-191. (In English)

8. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Avotins A., Berzina K. Irradiation level affects fluctuating asymmetry value of bilateral traits of cucumber in juvenile phase. *Agronomy Research.* 2018. Vol. 16. No. 3: 854-861. (In English)

9. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Kaposhko D.A., Vaskin A.N., Tranchuk A.S. Influence of light quality on fluctuating asymmetry of bilateral traits of forced parsley leaves. *Engineering for Rural Development.* Proc. 16th Int. Sc. Conf., Jelgava, Latvia: LLU, 2017. pp. 42-47. (In English)

10. Subbotin E. P., Gafickaya I. V., Nakonechnaya O. V., Zhuravlev YU. N., Kul'chin YU. N. Vliyanie iskusstvennogo solnechnogo sveta na rost i razvitie rastenij-regenerantov *Solanum tuberosum* [The influence of artificial sunlight and its intensity on the growth and development of *Solanum tuberosum* regenerants]. *Turczaninowia.* 2018. No. 21 (2): 32-39 (In Russian) DOI: 10.14258/turczaninowia.21.2.4

11. Wilson D.A., Weigel R.C., Wheeler R.M., Sager J.C. Light spectral quality effects on the growth of potato (*Solanum tuberosum L.)* nodal cuttings in vitro. *In Vitro Cell Dev Biol Plant.* 1993. No. 29: 5-8.

12. Karmakar S., Zaman R., Nasiruddin M., Hossain M.M. Effect of different illumination types on in vitro microplants of potato. *European Journal of Biotechnology and Bioscience*. 2018. No. 6(6): 76-80.

13. Golovackaya I. F., Dorofeev V. YU., Medvedeva YU. V., Nikiforov P. E., Karnachuk R. A. Optimizaciya uslovij osveshcheniya pri kul'tivirovanii mikroklonov *Solanum tuberosum L.* sorta Lugovskoj in vitro [Optimization of illumination conditions in cultivation process of *Solanum Tuberosum L.* cv. Lugovskoy microcuttings in vitro]. *Vestnik of Tomskij State University. Biology*, 2013. No. 4(24): 133-144. (In Russian)

14. Chen Li-li, Zhang Kai, Gong Xiao-chen, Wang Hao-ying, Gao You-hui, Wang Xi-quan, Zeng Zhao-hai, Hu Yue-gao. Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets in vitro and minituber production after transplanting in the greenhouse. *Journal of Integrative Agriculture.* 2020, No. 19(1): 108-119 DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62633-X

15. Martirosyan Yu.Ts., Polyakova M.N., Dilovarova T.A., Kosobryukhov A.A. Photosynthesis and productivity of potato plants in the conditions of different spectral irradiation // *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2013. No. 1: 107-112. (In English)

16. Voskresenskaya N.P., Drozdova I.S., Aksenova N.P. Vliyanie sveta i fitogormonov na fotosintez, rost i razvitie kartofelya sorta Miranda [Influence of light and phytohormones on photosynthesis, growth and development of the Miranda variety potato. In: *Regulyaciya rosta i razvitiya kartofelya* [Regulation of potato growth and development]. Moscow: Nauka, 1990: 20-29 (In Russian)

17. Chajlahyan M.H. Mekhanizmy klubneobrazovaniya u rastenij [Mechanisms of tuberization in plants]. In: *Regulyaciya rosta i razvitiya kartofelya* [Regulation of potato growth and development]. Moscow: Nauka. 1990: 48-62. (In Russian)

18. Martirosyan YU.C., Martirosyan L.YU., Kosobryuhov A.A. Dinamika fotosinteticheskih processov v usloviyah peremennogo spektral'nogo oblucheniya rastenij [Dynamic regulation of photosynthetic processes under variable spectral LED irradiation of plants]. *Sel'skohozyajstvennaya biologia.* 2019. Vol. 54. No. 1: 130-139 (In Russian)

19. Ustyuzhanina O.A., Sokolova L.A., Strel'cov A.B. Stabil'nost' razvitiya raznyh sortov kartofelya kak pokazatel' napravlennogo antropogennogo vozdejstviya [Stability of development of various kinds of potato plant as a determinant of the intended anthropogenic exposure]. *Problemy regional'noj ekologii.* 2012. No. 6: 110-112. (In Russian)

20. Rakutko E.N., Rakutko S.A. Metodika izmereniya opticheskoj plotnosti list'ev rastenij s primeneniem densitometra DP-1M [Measurement technique of plant leave optical density with DP-1M densitometer]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva.* 2018. No. 94: 23-35. (In Russian)

21. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Vaskin A.N., Gorbatenko N.A., Zabodaev D.P., Yakovenko N.I. Primenenie izmeritelya SSM-200 dlya operativnogo opredeleniya soderzhaniya hlorofilla v list'yah rastenij svetokul'tury [Rapid estimation of leaf chlorophyll content in indoor plant lighting by portable CCM-200 meter]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2017. No. 92: 18-25. (In Russian)

22. Ivanov V.P., Ivanov YU.V., Marchenko S.I., Kuznecov Vl.V. Ispol'zovanie indeksov fluktuiruyushchej asimmetrii lista berezy povisloj dlya diagnostiki sostoyaniya fitocenozov v usloviyah tekhnogennogo zagryazneniya [Application of fluctuating asymmetry indexes of silver birch leaves for diagnostics of plant communities under technogenic pollution]. *Fiziologiya rastenij*. 2015. Vol. 62. No. 3: 368-377 (In Russian)

23. Haboudane D., John R., Millera J.R., Tremblay N., Zarco Tejada P.J., Dextraze L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment.* 2002. No. 81: 416-426.

24. Andrianova Yu.E., Tarchevskij I.A. Hlorofill i produktivnost' rastenij [Chlorophyll and plant productivity]. Moscow: Nauka, 2000: 135 (In Russian)

25. Voronina O.E., Efimcev E.I., Tatarinova T.A. Pigmentnyj apparat rastenij v usloviyah antropogennogo vozdejstviya [Pigment apparatus of plants under anthropogenic impact]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoj vestnik.* 1999. No. 2: 82 (In Russian)

26. Neverova O.A. Primenenie fitoindikacii v ocenke zagryazneniya okruzhayushchej sredy [Phytoindication in assessing of environmental pollution]. *Biosfera.* 2009. Vol. 1. No. 1: 82-92. (In Russian)

27. Protasova N. N. Svetokul'tura kak sposob vyyavleniya potencial'noj produktivnosti rastenij [Plant growing under artificial lighting as a way to identify the potential productivity of plants]. *Fiziologiya rasteni.,* 1987. Vol. 34, No. 4: 812-822. (In Russian)

28. Ustyuzhanina O.A., Sokolova L.A. Izmenenie koefficienta fluktuiruyushchej asimmetrii rastenij kartofelya pri primenenii agrotekhnicheskih priemov, ne narushayushchih stabil'nost' razvitiya kul'tury [Changes in fluctuating asymmetry coefficient of potato plants caused by applying agrotechnical methods not affecting the crop's stability of development]. *Problemy regional'noj ekologii.* 2014. No. 5: 136-139. (In Russian)

УДК 631.17:631.95 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-39-50

ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Добринов А.В., канд. техн. наук Сухопаров А.И., канд. техн. наук
Джабборов Н.И., д-р техн. наук

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт- Петербург, Россия

В статье представлен обзор существующих методов оценки технологий и технических средств производства продукции растениеводства. В качестве критериев оценки рассматривались экономические, энергетические и экологические показатели, а также учитывалось качество производимой продукции. Анализ технологий и технических средств и обобщение критериев их оценки позволило сформировать номенклатуру (систему) показателей эффективности и экологической безопасности технологий и машин для производства продукции растениеводства. Представленные в статье показатели служат основой для создания (формализации) общего алгоритма расчета и разработки методики формирования машинных технологий органического производства продукции растениеводства.

Ключевые слова: критерий, оценка, экологическая безопасность, растениеводство, агроэкосистема.

Для цитирования: Добринов А.В., Джабборов Н.И., Сухопаров А.И. Показатели оценки эффективности и экологической безопасности технологий и технических средств производства продукции растениеводства // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3 (112). С.39-50

INDICATORS FOR ASSESSING THE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF TECHNOLOGIES, MACHINES AND EQUIPMENT FOR CROP PRODUCTION

A.V. Dobrinov, Cand. Sc. (Engineering), N.I. Dzhabborov, DSc (Engineering), A.I. Sukhoparov, Cand. Sc (Engineering)

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

The article presents an overview of existing assessment methods of technologies, machines and equipment for crop production. The assessment criteria were economic, energy, and environmental indicators as well as the product quality. An analysis of technologies and technical means and a generalization of their assessment criteria allowed forming a nomenclature (system) of indicators, which would prove the efficiency and environmental safety of crop cultivation technologies and machines. These indicators are the basis for the creation (formalization) of a general algorithm for calculating and developing a methodology for the formation of machine technologies for organic crop production.

Key words: criterion, assessment, environmental safety, crop production, agroecosystem

For citation: Dobrinov A.V., Dzhabborov N.I., Sukhoparov A.I. Indicators for assessing the efficiency and environmental safety of technologies, machines and equipment for crop production. AgroEkoInzheneriya. 2022. No. 3(112): 39-49 (In Russian)

Введение

Как известно, современные агротехнологии подразумевают повышение общей стабильности и результативности в аграрном секторе экономики при существующих разнообразных эколого-

экономических условиях, что в свою очередь должно обеспечить полную безопасность продовольственного рынка нашей страны.

При изучении вопросов совершенствования сельскохозяйственных технологий, не уделяется достаточного вниманиям вопросам, связанным с задачами эффективного использования имеющихся природных и антропогенных ресурсов, а также сохранения и воспроизводства почвенного плодородия.

Конечной целью улучшения агротехнологий является общее снижение совокупных затрат при производстве сельскохозяйственной продукции с заданными качественными характеристиками с обязательным обеспечением сохранения почвенного плодородия и минимизации негативных последствий на окружающую среду.

Все внедряемые машинные агротехнологии должны отвечать четким требованиям:

1) сохранение почвенного плодородия, снижение негативного воздействия на окружающую среду;

2) ведение научно-обоснованных севооборотов, их биологизация;

3) применение современных высокоурожайных сортов и гибридов;

4) снижение энергоемкости технологических операций при возделывании сельскохозяйственной культуры, оптимизация их количества;

5) использование энергоэффективных и многофункциональных МТА;

6) использование ресурсосберегающих приемов (обработка почвы посев, уход, уборка, транспортировка и хранение) при производстве сельскохозяйственной продукции;

7) эффективное и безопасное применение химических средств защиты растений, диференцированное применение удобрений и мелиорантов;

Формирование машинных технологий производства продукции растениеводства для конкретных условий возделывания сельскохозяйственных культур должно базироваться принципах, представляющих собой наиболее общие и фундаментальные положения теории и практики разработки перспективных технологий производства сельскохозяйственной продукции в различных зонах земледелия.

Основываясь на системе критериев оценки эффективности, качества и экологической безопасности существующих технологий производства сельскохозяйственной продукции, создание новых машинных технологий производства продукции растениеводства следует вести исходя из сформулированных научных принципов [1]:

принцип обеспечения экологической безопасности отражает экологический баланс машинных технологий органического производства продукции растениеводства в конкретной агроэкосистеме и предусматривает наименьшее отрицательное воздействие на окружающую среду;

принцип обеспечения энерго-экономической эффективности отражает экономию производственных затрат и энергии как в технологических процессах, так и всей технологии производства органической продукции и повышение коэффициента полезного действия применяемых технических средств и технологических материалов;

принцип обеспечения качества производимой продукции отражает совокупность основных свойств производимой продукции (безопасность,

экологичность, сохраняемость, эргономичность, эстетические свойства);

принцип обеспечения рационального управления полевым севооборотом с использованием цифровых технологий - отражает рациональное управление технологическим процессом в полевом севообороте на основе цифровизации, при использовании которой различные взаимосвязанные блоки электронной системы, должны обеспечить непрерывный контроль, анализ управляющих воздействий на технологический процесс, и соответственно качество проводимых операций.

Исходя из рассмотренных принципов при оценке технологии целесообразно применить сравнительно эталонный метод или метод аналогий, который подразумевает изучение, а затем сравнение двух (разных) технологий, так как в ряде сельскохозяйственных предприятий может использоваться несколько технологий возделывания сельскохозяйственной культуры с различной степенью ресурсосбережения.

Также общеизвестным методом является системный метод [2]. Проектирование и управление технологией представляет собой научно обоснованное предвидение большого и взаимно увязанного комплекса технологических, технических, организационных мероприятий и их экономически наиболее выгодное осуществление. При этом на этапах возделывания и уборки сельскохозяйственных культур важно изначально выбрать сорт, технологию возделывания, определить наилучшие сроки выполнения каждой технологической операции, обеспечить оптимальные условия роста и развития растений, минимальные затраты труда, средств и энергии. Метод позволяет провести оптимизацию процессов при стимулировании полезных и уменьшении вредных эффектов.

Кроме того, нельзя обойти вниманием методы прогнозирования, так как неверный прогноз может привести к тяжелым последствиям в перспективе, не ощущаемым в начальный период. Из популярных можно выделить метод «Дельфи» [3], суть которого в том, что с помощью серии последовательных действий (опросов, интервью, мозговых штурмов) можно получить необходимый консенсус при нахождении верного решения.

При анализе методов оценки технологий и технических средств производства продукции растениеводства заслуживает внимание методика оценки ресурсосбережения в технологиях возделывания зерновых культур [4]. В методике рассчитываются затраты материальных ресурсов: на обработку почвы и уход за посевами, удобрения, пестициды, семена и т.п.

Расчет по ресурсосбережению проводится с помощью энергетической оценки, которая, в сравнении с экономической, более объективна из-за отсутствия негативного влияния механизма ценообразования, связанного с постоянно меняющимися курсами валют, стоимостью ГСМ, машин и оборудования и техники, СЗР, семян, удобрений.

В качестве критерия оценки энергетической эффективности технологий возделывания сельскохозяйственных культур исследователями [4, 5] предлагается использовать коэффициент энергетической эффективности K_e, который определяется, как отношение энергосодержания урожая к энергетическим затратам на его производство:

$$К_е = \frac{Е_у}{Е_с}, \quad (1)$$

где E_y - энергетическая ценность урожая, МДж;

E_c - суммарные энергетические затраты, МДж.

В свою очередь, энергетическая ценность урожая Еу рассчитывается следующим образом [6]:

$$Е_у = У\ К_у, \quad (2)$$

где У – урожайность сельскохозяйственной культуры, ц/га;

$К_у$ – энергетический эквивалент 1 ц основной продукции, МДж.

В работе [7] экономическую оценку технологий и технологических комплексов возделывания сельскохозяйственных культур проводят поэтапно: формируют модель технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур, с вариантами реализации типовых технологий и их выбором; определяют состав рациональных комплексов машин для реализации типовых технологий применительно к конкретным условиям и формам хозяйствования; рассчитывают показатели экономической эффективности механизированных технологий возделывания культур и выбирают наиболее эффективные варианты ее реализации.

В качестве обобщенного экономического показателя эффективности технологий рассматривается критерий, отражающий уровень относительной урожайности культуры при осуществлении технологии, приведенный к ее относительной удельной затратности:

$$B_n = \frac{У_n}{З_m} \quad (3)$$

где B_n – выход продукции, т/тыс. руб;

$У_n$ – урожайность, т/га;

$З_m$ – затраты на технологию, тыс. руб/га.

Данный показатель позволяет оценить количество получаемой продукции на каждый вложенный рубль в технологию ее производства.

Экологичность технологии, ее влияние на деградацию или восстановление продуктивности пашни, может быть описана частными критериями, в основе которых заложены показатели уровня водной и ветровой эрозии, засоления, кислотности, переуплотнения, дегумификации, загрязнения почв токсичными веществами как следствие экстенсивного хозяйствования и техногенеза и т.д.

Межгосударственным стандартом[1] предусмотрена следующая номенклатура показателей экономической оценки сельскохозяйственной техники, к которой относят:

- экономические показатели на выполнение единицы i-го вида работы включая затраты труда, прямые эксплуатационные затраты и совокупные затраты денежных средств;
- показатели ресурсосбережения включая совокупные затраты денежных средств на годовой фактический объем работы новой j -й техники, выполняемый на i-м виде работы, на выполнение годового условного объема i-го вида работы;
- показатели сравнительной экономической эффективности включая годовую экономию совокупных затрат денежных средств в сравнении с аналогом, снижение себестоимости i-го вида работы,

[1]ГОСТ 34393-2018 Межгосударственный стандарт «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки». Дата введения 2019.09.01

срок окупаемости капиталовложений, снижение потребности в обслуживающем персонале и в моторном топливе (электроэнергии, газе).

В работе [8] для выбора наилучшей технологии производства сельскохозяйственной культуры из числа альтернативных, предложена методика, в которой на первой стадии производится выбор технологий с использованием метода бинарных решающих матриц, затем сравниваются выбранные технологии на основе многокритериальной экономико-математической модели, после чего дается анализ и выбор экономически эффективной технологии с использованием матричной модели.

Целевой функцией является нахождение наибольшей суммы бинарных показателей технологии $a_{i,j}$.

$$D_j = \sum a_{ij} \longrightarrow \max , \quad (4)$$

где i – критерий оценки;

a_j – рассматриваемая технология.

Достоинство этой системы выбора в том, что матрицы решений охватывают большую часть встречающихся на практике технологий и критериев выбора. Модель может быть воплощена в виде базы данных.

В работе [9] даны результаты исследований по уточнению системы показателей оценки эффективности освоения технологий производства продукции по отдельным подотраслям и в целом по отрасли растениеводства. Предложен интегральный (обобщенный) показатель эффективности, позволяющий получить комплексную наглядную сопоставимую оценку применения технологии по уровню интенсивности с использованием единичных показателей

$$Z = \sum_1^n W_i q_i, \quad (5)$$

где W_i - значения весовых коэффициентов соответствующих нормализованным единичным показателям q_i;

q_i - нормализованные значения соответствующих единичных показателей (затраты труда, расход топлива, урожайность и др.).

Межгосударственным стандартом[2] установлена номенклатура экологических показателей и методов их определения при испытании машинных технологий производства продукции растениеводства.

Экологическими показателями оценки машинных технологий, являются: разрушение почвенного слоя рабочими органами машин; загрязнение окружающей среды выбросами вредных веществ двигателями; содержание в почве органического вещества; пестицидов; удобрений, неравномерность их распределения.

Существуют частные показатели, которые также являются значимыми при экологической оценке технологий [10, 11]: буксование движителей энергетического средства, истирание металла рабочих органов о почву за срок амортизации орудия.

В исследовании [12] поэтапно описана методика экологической оценки сельскохозяйственных технологий и техники: проводится анализ технологического процесса технологии или технического средства, затем определяются места вероятного взаимодействия с компонентами окружающей среды, составляется перечень всех потенциальных

[2]ГОСТ 34363-2017 Межгосударственный стандарт «Машинные технологии производства продукции растениеводства. Методы экологической оценки». Дата введения 2019.06.01.

видов негативного воздействия на почву, атмосферный воздух; обосновываются нормативные допустимые показатели для каждого вида негативного воздействия, характерные разрабатываемой технологии или техническому средству на окружающую среду.

Затем рассчитываются относительные показатели видов негативного воздействия для технологии или технического средства, в соответствии с выражением:

$$q_i = {}^{P_i}/_{P_{iбаз}}, \quad (6)$$

где P_i - величина i-го единичного фактического показателя анализируемой технологии или технического средства;

$P_{iбаз}$ - величина i-го единичного показателя нормативного или показателя базовой технологии или технического средства.

Комплексный экологический показатель технологии или технического средства находят с помощью частных обобщенных экологических показателей по видам воздействий и их коэффициентов весомости:

$$Kиз=\sum_{j=1}^{m} kj\ bj, \quad (7)$$

где kj - частный обобщенный экологический показатель по j-му виду оценки;

bj – коэффициент весомости частного обобщенного экологического показателя по j-му виду оценки;

m – количество видов оценок.

Для определения уровня качества получаемой сельскохозяйственной продукции кроме экологической безопасности используют в качестве показателей эффективности технологии признаки, определяемые органолептическими методами, например: вкус, форма, цвет, запах и др. Также для оценки качества используются количественные параметры, составляющие основу показателей качества. Показатель качества – это количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции. Основные показатели качества сельхозпродукции (например, картофель[3], сено и сенаж[4], свекла[5]) представлены соответствующими нормативными материалами.

Материалы и методы

При проведении исследований применялись аналитические методы и обобщения результатов, полученные различными авторами, посвященных проблеме разработки технологий возделывания сельскохозяйственных культур, оценке и прогнозирования экологической их безопасности.

Целью исследований является анализ и выявление наиболее значимых показателей оценки эффективности и экологической безопасности технологий и технических средств для производства продукции растениеводства.

Объектами настоящих исследований являлись методы и показатели,

[3] ГОСТ 7176-2017 Межгосударственный стандарт. Картофель продовольственный. Технические условия. Дата введения 2017.07.01.

[4] ГОСТ Р 55452-2021 Национальный стандарт РФ. Сено и сенаж. Общие технические условия Дата введения 2022.01.01.

[5] ГОСТ 32285-2013 Межгосударственный стандарт. Свекла столовая свежая, реализуемая в розничной торговой сети. Технические условия. Дата введения 2015.01.01.

обеспечивающие оценку эффективности и экологической безопасности машинных технологий и техники производства продукции растениеводства.

Результаты и обсуждение

В результате обобщения научных публикаций оценки технологий и технических средств по различным критериям в соответствии с разработанными научными принципами формирования машинных технологий органического производства продукции растениеводства сформирована номенклатура показателей эффективности и экологической безопасности технологий и машин производства продукции растениеводства в агроэкосистемах с целью разработки алгоритма расчета показателей оценки эффективности и экологической безопасности технологий (таблица 1)

Таблица 1

Номенклатура показателей оценки эффективности и экологической безопасности технологий и технических средств производства продукции растениеводства

п/п	Принципы формирования машинных технологий производства продукции растениеводства	Показатели оценки эффективности и экологической безопасности технологий и технических средств производства продукции растениеводства
1	Принцип обеспечения энерго-экономической эффективности	1 Совокупные затраты денежных средств, НДЕ/ед. наработки, в том числе: затраты на оплату труда, затраты на ГСМ (электроэнергию, газ), затраты на ремонт, техническое обслуживание техники, амортизационные отчисления, затраты на вспомогательные материалы. 2 Затраты труда, чел.-ч/ед. наработки. 3 Суммарные энергетические затраты, МДж. 4 Энергетическая ценность урожая продукции, МДж.
2	Принцип обеспечения качества производимой продукции	1 Для зерновых культур: внешний вид, цвет и запах, вкусовые качества; влажность продукции, %; содержание сорных примесей, %; зараженность вредителями. 2 Для картофеля и овощей: внешний вид (сортовая чистота, %), цвет и запах, вкусовые качества; размер; внутреннее строение; наличие механических повреждений, посторонней примеси, зараженности болезнями. 3 Для травяных кормов: состояние, цвет, запах, консистенция; содержание вредных и ядовитых растений, %; наличие посторонних примесей; содержание сырого протеина, клетчатки, золы, г/кг сухого вещества (СВ), аммиачного азота, %; содержание сухого вещества, г/кг; содержание обменной энергии, МДж/кг СВ. 4 Содержание основных химических загрязнителей в

		продукции растениеводства, мг/кг (СанПиН).
3	Принцип обеспечения экологической безопасности	1 Разрушение почвенного слоя рабочими органами машин: изменение содержания эрозионно опасных частиц, %; уплотнение почвы, г/см^3; максимальное давление движителей на почву, МПа; буксование движителей энергетического средства, %. 2 Истирание металла рабочих органов о почву за срок амортизации орудия, % от первоначальной массы. 3 Загрязнение окружающей среды выбросами вредных веществ двигателями тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин: экологический ущерб, руб. 4 Содержание в почве пестицидов, мг/кг почвы. 5 Содержание в почве удобрений (макрохимические, микрохимические), мг/кг. 6 Неравномерность распределения в почве (на поверхности) удобрений, %;. 7 Содержание органического вещества в почве, %. 8 Содержание в почве N_2O, %.
4	Принцип обеспечения рационального управления полевым севооборотом на основе использования цифровых технологий	1 Комплексный показатель оценки экологической безопасности технологии. *Отдельные показатели, характеризующие устойчивость технологии*: - динамика изменения уплотнения почвы (оценка роли севооборота в улучшении почвы); - изменение содержания эрозионно-опасных частиц (оценка эрозионной устойчивости почвы); - степень засоренности посевов сорняками, вредителями и зараженности болезнями (фитосанитарная эффективность севооборота).

Выводы

Большинство используемых в отечественном земледелии агротехнологий обладают повышенной энергоемкостью, и оказывают негативное воздействие на окружающую среду. В условиях высоких цен на горюче-смазочные материалы, сельскохозяйственную технику и запасные части, удобрения и пестициды, необходимо переходить на ресурсосберегающие экологически эффективные технологии, основанные на наибольшем использовании почвенно-климатического потенциала местности, научно обоснованном использовании севооборотов, одновременном выполнении нескольких технологических операций, внесении оптимальных доз минеральных удобрений, мелиорантов и средств защиты растений.

Анализ современных методов оценки технологий и технических средств производства продукции растениеводства в существующих агроэкосистемах на основе рассмотренных научно обоснованных подходов применения агротехнологических приемов, снижения себестоимости производимой продукции, энергосбережения, а также минимизации

негативных последствий на окружающую среду, представленных в статье, позволил установить номенклатуру основных показателей оценки эффективности и экологической безопасности технологий и технических средств, которые будут способствовать экономии используемых ресурсов, наиболее эффективному использованию имеющегося природного потенциала, материальных и денежных ресурсов сельхозтоваропроизводителей, экологической безопасности произведенной продукции.

Использование предлагаемых показателей в качестве критериев оценки в дальнейшем позволит формализовать общий алгоритм расчета и разработать методику формирования машинных технологий органического производства продукции растениеводства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джабборов Н.И., Максимов Д.А., Добринов А.В. Научные принципы формирования машинных технологий производства продукции растениеводства // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. № 1(110). С.102-120.
2. Скороходов А.Н. Системный подход к моделированию технологических и производственных процессов в растениеводстве // *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ*. 2010. № 2(41). С. 44-47.
3. Метод Дельфи [электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_Дельфи (дата обращения 27.09.2022)
4. Гостев А.В., Пыхтин И.Г., Нитченко Л.Б., Плотников В.А., Гапонова Н.П. Теоретические основы эффективного применения современных ресурсосберегающих технологий возделывания зерновых культур. Курск: ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2016. 87 с.
5. Методика энергетического анализа технологических процессов в сельском хозяйстве. М.: ВИМ.1995. 95 с.
6. Методология и методика энергетической оценки агротехнологий в агроландшафтах. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. 2007. 21 с.
7. Несмиян А.Ю., Черемисин Ю.М. Технологии и средства механизации сельскохозяйственного производства: учебное пособие. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт, ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. 185 с.
8. Ткаченко В.В., Ткаченко Н.А., Сафьянова В.В. Методика многокритериальной комплексной оценки и выбора технологии возделывания сельскохозяйственных культур // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2016. №123. С. 1639-1657 DOI: 10.21515/1990-4665-123-112
9. Морозов Ю.Л. Уточненная система показателей (индикаторов) оценки эффективности технологий производства продукции растениеводства // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2015. №. 86. С. 6-19.
10. Черников О.Н., Быченин А.П. Влияние режимов буксования колесного движителя энергетического средства МТА на физические свойства почвы // *Известия Самарской гос. с.-х. академии*. 2018. № 4. С. 44-49.

11. Джабборов Н.И., Семенова Г.А. Классификация критериев оценки экологической безопасности технических средств в растениеводстве // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. № 1 (110). С. 84-102.

12. Афанасьев, В.Н., Максимов Д.А., Афанасьев А.В. Основные положения методики экологической оценки сельскохозяйственных технологий и техники // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2009. №. 81. С. 20-25.

REFERENCES

1. Dzhabborov N.I., Maksimov D.A., Dobrinov A.V. Nauchnye printsipy formirovaniya mashinnykh tekhnologii proizvodstva produktsii rastenievodstva [Science concepts for designing machine technologies of crop production]. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 1(110):102-120 (In Russian)

2. Skorokhodov A.N. Sistemnyi podkhod k modelirovaniyu tekhnologicheskikh i proizvodstvennykh protsessov v rastenievodstve [The system approach to modelling of the technological and flow processes in plant growing]. *Vestnik FGOU VPO MGAU*. 2010. No.2 (41): 44-47 (In Russian)

3. Metod Del'fi [Delfi method]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Metod_Del'fi (assecces 27.09.2022) (In Russian)

4. Gostev A.V., Pykhtin I.G., Nitchenko L.B., Plotnikov V.A., Gaponova N.P. Teoreticheskie osnovy effektivnogo primeneniya sovremennykh resursosberegayushchikh tekhnologii vozdelyvaniya zernovykh kul'tur [Theoretical foundations for the effective application of modern resource-saving technologies for the cultivation of grain crops]. Kursk: FGBNU VNIIZiZPE, 2016. 87 p. (In Russian)

5. Metodika energeticheskogo analiza tekhnologicheskikh protsessov v sel'skom khozyaistve [Methodology for energy analysis of technological processes in agriculture]. Moscow: VIM.1995. 95 p. (In Russian)

6. Metodologiya i metodika energeticheskoi otsenki agrotekhnologii v agrolandshaftakh [Methodology and methods for the energy assessment of agricultural technologies in agricultural landscapes]. Moscow: RGAU-MSKhA named after K.A. Timiryazev. 2007. 21 p. (In Russian)

7. Nesmiyan A.Yu., Cheremisin Yu.M. Tekhnologii i sredstva mekhanizatsii sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva: uchebnoe posobie [Technologies and means of mechanization of agricultural production: textbook]. Zernograd: Azovo-Chernomorskii Engineering Institute, FGBOU VO Donskoi SAU, 2017. 185 p. (In Russian)

8. Tkachenko V.V., Tkachenko N.A., Saf'yanova V.V. Metodika mnogokriterial'noi kompleksnoi otsenki i vybora tekhnologii vozdelyvaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur [Methods of multicriterial comprehensive assessment and selection of the technology for growing crops]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. No.123: 1639-1657 (In Russian) DOI: 10.21515/1990-4665-123-112

9. Morozov Yu.L. Utochnennaya sistema pokazatelei (indikatorov) otsenki effektivnosti tekhnologii proizvodstva produktsii rastenievodstva [Upgraded system of indicators to assess the performance of crop production technologies]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva.* 2015. No. 86: 6-19 (In Russian)

10. Chernikov O.N., Bychenin A.P. Vliyanie rezhimov buksovaniya kolesnogo dvizhitelya energeticheskogo sredstva MTA na fizicheskie svoistva pochvy [Influence of slipping modes of the wheeled running gear of MTU power means onto physical properties of the soil]. *Izvestiya Samarskoi Gosudarstvennoi Selskokhoziajsvennoj Academii.* 2018. No. 4: 44-49 (In Russian)
11. Dzhabborov N.I., Semenova G.A. Klassifikatsiya kriteriev otsenki ekologicheskoi bezopasnosti tekhnicheskikh sredstv v rastenievodstve [Classification of criteria for assessing the environmental friendliness of machines and equipment in crop production]. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 1 (110): 84-102 (In Russian)
12. Afanasiev, V.N., Maksimov D.A., Afanasiev A.V. Osnovnye polozheniya metodiki ekologicheskoi otsenki sel'skokhozyaistvennykh tekhnologii i tekhniki [Main provisions of the methodology for the environmental assessment of agricultural technologies and equipment]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2009. No. 81: 20-25 (In Russian)

УДК 634.11.073 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-50-61

DESIGN AND SIMULATION ANALYSIS OF CRAWLER DOUBLE BOOM ORCHARD FLOWER THINNER[6]

Hu Caiqi, Wang Dongwei, Wang Jiasheng, Shang Shuqi, Liu Huanwei, Liang Qiaojun, Chi Junkang, Li Yao

College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao, China

Flower thinning is one of the most important operations in orchard management. Removing too many flowers in time can avoid excessive nutrient consumption of the apple trees, and improve fruit quality of apples and ensure effective fruit setting rate. Mechanical flower thinning can reduce hand and chemical thinning and to prevent or overcome alternate bearing, which promotes protecting the environment of organic orchards and improving the quality of organic orchards. On the basis of discussing the present research situation at home and abroad, according to the agronomic requirements of flower thinning in orchards (taking apple orchard as an example), the technical requirements of flower thinning operation and the existing problems of mechanical flower thinning equipment, the crawler double boom orchard flower thinner for orchards is put forward. The flower thinning machine carries out flower thinning operations of different tree-shaped fruit trees through two flower thinning arms with adjustable working angles. Through the design and analysis of the whole machine structure and its key components, the length of the electric push rod is calculated as 300 mm and the diameter of the flower thinning shaft is 20 mm. Through the simulation analysis for the flower thinning mechanism by the Adams software, the acting force reasonable range of the

[6] Текст статьи публикуется в авторской редакции - The text of the published article is the authors' English version

flower thinning executive mechanism is obtained, and according to the simulation results, the component structures of flower thinning machine are further improved to meet the agronomic requirements of flower thinning operation.

Key words: apple orchard; mechanical flower thinning; fruit quality; simulation analysis

For citation: Hu Caiqi, Wang Dongwei, Wang Jiasheng, Shang Shuqi, Liu Huanwei, Liang Qiaojun, Chi Junkang, Li Yao. Design and simulation analysis of crawler double boom orchard flower thinner. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 3(112): 50-61

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИМИТАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРОРЕЖИВАТЕЛЯ ЗАВЯЗИ НА ГУСЕНИЧНОМ ХОДУ ДЛЯ ПЛОДОВЫХ САДОВ

Ху Цайци, Ван Дунвэй, Ван Цзяшэн, Шан Шукси, Лю Хуаньвэй, Лян Цяоцзюнь, Чи Джункан, Ли Яо

Колледж механики и электротехники, Сельскохозяйственный университет Циндао, г. Циндао, Китай

Прореживание завязи – одна из самых важных операций в садоводстве. Своевременным удалением достаточно большого количества цветков можно избежать избыточного потребления яблонями питательных веществ, повысить качество плодов и обеспечить эффективную скорость их завязывания. Механическое прореживание завязи может сократить применение ручного и химического методов, а также предотвратить или решить проблему периодичности плодоношения, что способствует защите окружающей среды в органических садах и улучшению их состояния. По результатам рассмотрения современных исследований в стране и за рубежом, с учетом агрономических и технических требований к прореживанию завязи в садах (на примере яблоневого сада) и существующих проблем с необходимым механическим оборудованием, был предложен гусеничный прореживатель завязи для плодовых садов, состоящий из двух основных частей. Данная машина выполняет прореживание завязи у различных сформированных плодовых деревьев с помощью двух устройств с регулируемыми рабочими углами. По результатам проектирования и анализа всей конструкции машины и ее ключевых узлов рассчитанная длина толкателя с электроприводом составила 300 мм, а диаметр вала для прореживания завязи – 20 мм. Благодаря анализу модели механизма прореживания завязи с помощью компьютерной программы Adams получен разумный диапазон действующей силы исполнительного механизма прореживания. По результатам моделирования узлы машины для прореживания были дополнительно усовершенствованы согласно агрономическим требованиям к данной операции.

Ключевые слова: яблоневый сад; механическое прореживание завязи; качество плодов; имитационный анализ.

Для цитирования: Ху Цайци, Ван Дунвэй, Ван Цзяшэн, Шан Шукси, Лю Хуаньвэй, Лян Цяоцзюнь, Чи Джункан, Ли Яо. Проектирование и имитационный анализ

прореживателя завязи на гусеничном ходу для плодовых садов // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3 (112). С.50-61

1. Introduction

Blossom thinning is an important link in the process of fruit tree planting and management. Flower thinning can not only improve fruit quality [1-2], but also effectively avoid the yield reduction due to heavy burden on fruit trees when there are too many fruit sets [3-4]. Manual flower thinning is labor-intensive and of low-efficiency. Chemical blossom thinning has the problems of pesticide residues and is easily affected by factors such as environment and fruit varieties [5-8]. Mechanical flower thinning, as an environmentally friendly flower thinning method, can effectively improve the evenness of fruit setting in the fruiting ear and promote healthy and sustainable development of organic orchards [9-10]. But there are also problems of poor adaptability to fruit trees and high damage rate [11-13].Therefore, the research and development of an orchard thinning machine suitable for the actual planting and growth of fruit trees is of great significance for the organic orchard development.

There are a few researches on a flower thinning machine in China. Most of them focus on the development of an airborne mechanism, but the whole machine development is less. A hanging electric flexible thinning machine was proposed by Li Jun. They designed the profile control system and carried out field experiments to analyze the control effect of the system. A mechanical blossom thinning device, which was applied to the orchards with low rootstock and closely planting in North China, was developed by Hebei Agricultural University. The three arms tractor-mounted flower thinning machine, which is based on the profile structure, was designed by Lei Xiaohui of Jiangsu Academy of Agricultural Sciences [14-16]. There are some researches on flower thinning machine abroad. Michael Glenn and other researchers studied the operation effect of the mechanical device of the pointed barrel vibrating screen, and analyzed its function in the flower thinning device. Alberto Assirelli and other researchers studied a large-scale flower thinning machine and conducted flower thinning experiments in apricot and peach orchards in northeast Italy, which can obtain better flower thinning effect after artificial secondary flower thinning management. Although domestic and foreign scholars had made some achievements in the research of flower thinning machine, the developed flower thinning device cannot thin flower smoothly on the fruit tree with undulating shape and cannot flexibly adjust the flower thinning posture according to the shape and size of the fruit tree crown. The most of them was airborne flower thinning machine, but the whole machine development was less at present. According to the above problems, in this paper a crawler-type double-boom orchard thinning machine is proposed; the structure and working principle of machine are analyzed; the key parameters are calculated, and the theoretical derivation and simulation analysis are carried out.

2. Structure of the whole machine

2.1 Apple orchard planting pattern

At present, there are mainly the apple orchards with close planting on low rootstocks in China. It can make the apple tree trunk low, and convenient for standardized management, good light transmission between branches, so as to improve the output and save labor. The plant row spacing and line spacing of apple trees also have different requirements due to different varieties of fruit trees [14]. Generally, the plant row spacing is 2 m, and the line spacing is 4 m. The apple orchards of low rootstocks and close planting have various tree shapes, such as high spindle shape, slender spindle shape, super spindle shape, small crown open center shape, etc. It is generally believed that the high spindle

tree shape is more suitable for apple trees with low rootstocks and close planting. Usually the total height of this type apple tree is about 3-3.2 m, the trunk height is about 0.8-1 m, and the main branch angle is 110 °. Taking the high spindle apple tree as an example, the basic growth status of the apple tree shape with the low rootstocks and close planting is shown in Table1

Table 1. Growth parameters of high-spindle apple trees
Таблица 1. Параметры роста высоких колоновидных яблонь

Parameter / Параметр	Value / Значение
Row spacing, m / Расстояние между рядами, м	2
Line spacing, m / Расстояние между деревьями, м	4
Height of tree, m / Высота дерева, м	3~3.2
The angle of branch, degree / Угол ветвления, град	110
Crown diameter, m / Диаметр кроны, м	0.8~1.2
Bough group spacing, m / Расстояние между группами ветвей, м	>0.6

2.2 Structure of the whole machine

The flower thinning machine is driven by electricity, and the chassis is controlled by remote control. The crawler chassis can achieve in-situ steering by the forward and reverse rotation of the motor. The structure of the whole machine is composed of profiling flower thinning mechanism, vertical lifting frame and crawler chassis. The profiling flower thinning mechanism is divided into the upper arm flower thinning mechanism and the lower arm flower thinning mechanism. The upper arm flower thinning mechanism is composed of key components of flower thinning, electric push rod, linear guide rail, motor, the profiling flower thinning frame, movable joint and other components. The lower arm flower thinning mechanism is composed of flower thinning frame, the profiling fixed bracket, key components of flower thinning, motor and other components. The structure of crawler-type double-section boom orchard thinning machine is shown in Figure 1.

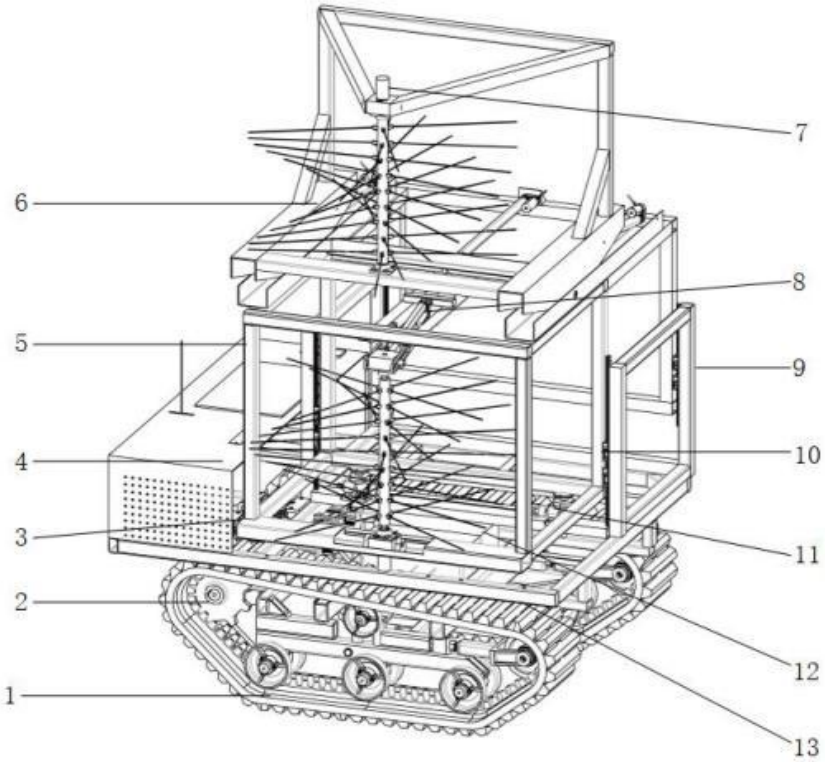

Fig. 1. Structure diagram of tracked double boom orchard thinning machine

1 – track; 2 – crawler gear train; 3 – drive motor reducer combination; 4 – remote control module; 5 – lower arm flower thinning mechanism; 6 – upper arm flower thinning mechanism; 7 – upper thinning gear motor; 8 – fixed mechanism; 9 – lifting table connection frame; 10 – lifting table linear guide; 11 – lift; 12 – battery; 13 – chassis frame.

Рис. 1. Схема гусеничной машины для прореживания завязи для плодовых садов

1 – гусеница; 2 – ведущее колесо гусеницы; 3 –редуктор с приводным двигателем; 4 – модуль дистанционного управления; 5 – нижнее устройство прореживания завязи; 6 – верхнее устройство прореживания завязи; 7 – двигатель верхнего устройства прореживания завязи; 8 – стопорное устройство; 9 – соединительная рама подъемной платформы; 10 – линейная направляющая подъемной платформы; 11 – подъемник; 12 – аккумулятор; 13 – рама шасси.

2.3 Working principle

During flower thinning, according to the fruit tree shape, the electric push rod is adjusted to make the upper arm flower thinning mechanism fit the tree shape, so that the upper arm flower thinning mechanism and the lower arm flower thinning mechanism are suitable for the current fruit tree. Then the flower thinning axis is driven and the flower thinning elements to rotate. After reaching the specified speed, the horizontal electric push rod is controlled to make the flower thinning elements enter the apple tree crown and thin flowers away.

3 Key component design

3.1 Design of profiling and thinning flower mechanism

The profiling flower thinning mechanism is composed of two section arm parts, an upper section arm and a lower section arm. Each section arm has a sparse flower axis, and the flower thinning strips are fixed and spirally arranged on the flower thinning axis by a single-head screw. The structure of the profiling flower thinning mechanism is shown in Figure 2. At the bottom of the flower thinning mechanism of the upper arm, a linear guide rail and an electric push rod are mounted, so that the entire flower thinning mechanism can be telescopically moved relative to the controller. At the bottom of the entire flower thinning mechanism, a lifting platform composed of a lift connects the flower thinning mechanism to the chassis frame, so that the entire flower thinning mechanism can be lifted and lowered. The entire flower thinning system is driven by the chassis to meet the adjustment requirement of each flower thinning angle.

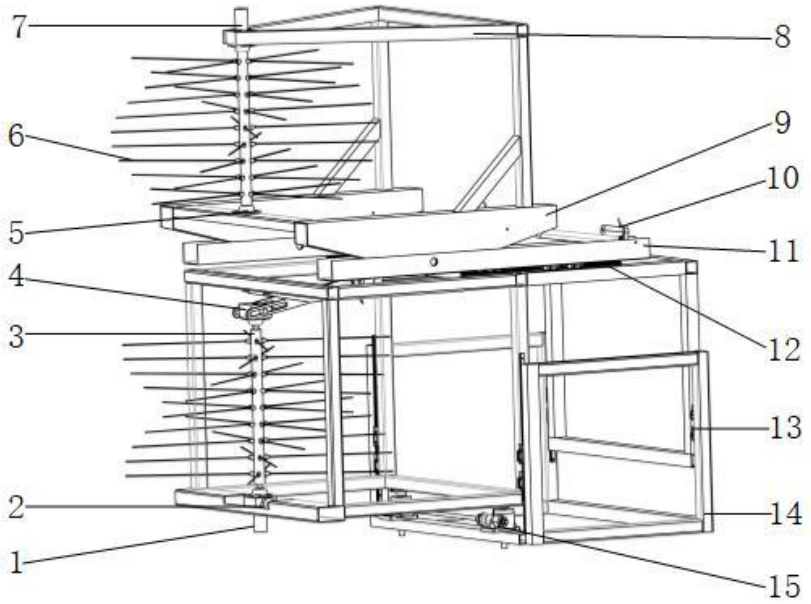

Fig. 2. Structure diagram of the profiling and thinning mechanism

1– lower arm flower thinning motor; 2 – fixed lifting lugs; 3 – flower thinning axis; 4 – fixed mechanism; 5 – pillow block bearing; 6 – flower thinning strip; 7 – upper arm flower thinning motor; 8 – upper arm triangle bracket; 9 – ring seat; 10 – electric putter; 11 – upper arm flower thinning mechanism base; 12 – upper arm telescopic linear guide; 13 – lifting table linear guide; 14 – lifting table bracket; 15 – lifting motor.

Рис. 2. Схема профилирующего и прореживающего устройства

1– двигатель нижнего устройства прореживания завязи; 2 – неподвижные подъемные проушины; 3 – ось прореживания завязи; 4 – стопорное устройство; 5 – трансмиссионный подшипник; 6 – пластинка для прореживания завязи; 7 – двигатель верхнего устройства прореживания завязи; 8 – треугольный кронштейн верхнего устройства прореживания; 9 – седло с уплотнительным кольцом; 10 – толкатель с электроприводом; 11 – основание верхнего устройства прореживания завязие; 12 – телескопическая линейная направляющая

верхнего устройства прореживания завязи; 13 – линейная направляющая подъемной платформы; 14 – кронштейн подъемной платформы; 15 – двигатель подъемника.

3.2 Size parameter analysis of electric push rod

There is a schematic diagram of the movement of the lower arm mechanism as shown in figure 3. Among them, AC is the limit position of the angle when the flower thinning axis is adjusted to the outside of the vehicle body. At this point, the length of the push rod is the longest. BC is the limit position of the adjustment angle of the flower thinning axis inside the vehicle body, and the length of the push rod is the shortest at this point. According to the adjustment requirements of the flower thinning angle and to ensure the stability of the flower thinning work, the swing angle θ of the flower thinning shaft should be greater than 20°, L_1 is the length of the push rod after it is fully extended, L_2 is the length of the push rod when it is not extended, and FE is the vertical distance between the hinge point at the rear end of the push rod and the hinge point at the near-ground end of the sparse shaft, BC is the horizontal distance from the hinge point of the tail end of the push rod to the hinge point of the near-ground end of the flower thinning shaft. According to the design geometric dimensions, FE=890mm, BC=580mm, AC=BC=800mm.

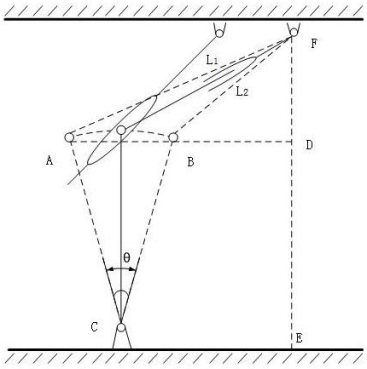

Fig. 3. Schematic diagram of the movement of the lower arm mechanism

Рис. 3. Схема перемещения нижнего устройства прореживания

From the geometric relation, the following is the relational expression:

$$\begin{cases} AB = 2AC \cdot \cos\left(\dfrac{\pi-\theta}{2}\right) \\ BD = CE - BC \cdot \cos\left(\dfrac{\pi-\theta}{2}\right) \\ FD = FE - BC \cdot \sin\left(\dfrac{\pi-\theta}{2}\right) \end{cases}$$

From the above formula, L_1 and L_2 can be expressed as:

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{(AB+BD)^2 + FD^2} \\ L_2 = \sqrt{BD^2 + FD^2} \end{cases}$$

The size parameters of each electric push rod are shown in Table 2.

Table 2. Parameters of push rods of various sizes

Таблица 2. Параметры толкателей различного размера

推杆行程/ход толкателя（S/mm）	收缩状态 /длина невыдвинутого толкателя (L_2/mm)	伸出总长/ длина полностью выдвинутого толкателя (L_1/mm)
100	235	335
200	335	535
300	435	735
400	535	935

4 Simulation analysis

During the analysis of virtual prototype, the flexible components will have a great impact on the dynamic characteristics of the mechanical system. Under the condition that the deformation of components needs to be considered, the model cannot be treated as a rigid system, and some components need to be treated as flexibly parts. The ADAMS software includes flexible body module, and during analysis flexible body is used to replace rigid body, which can more truly represent the dynamic changes of components and realize the simulation analysis of flexible components.

Then the flexible components simulation analysis is carried out in ADAMS software. Firstly, the model is imported into ADAMS, the name and material properties of the model components are set, and the material of the thinning element is set as PVC rod, the material of the hit test bench component is set as apple tree branch, and the material of the other non-deformation components is set as steel. The material parameters of the components in this simulation are shown in Table 3.

Table 3. Simulation material parameter settings

Таблица 3. Установочные параметры имитационного материала

Material Science /материал	Elastic modulus / модуль упругости ($N \cdot mm^{-2}$)	Density / плотность ($g \cdot cm^{-3}$)	Poisson's ratio / коэффициент Пуассона
PVC rod / пластинка	3×10^3	1.4	0.38

из ПВХ			
Branch /ветка	1.1×10^{4}	4.4×10^{-7}	0.33
Steel products /стальные изделия	2.1×10^{5}	7.8×10^{-6}	0.29

In mechanical thinning the flowers, since the operation process of the flower thinning element is repeated and the motion state is the same, in order to simplify the flexible operation and simulation operation, one of the flower thinning elements is taken for flexible analysis. According to the actual motion state of the flower thinning mechanism, The constrains and drive of the model are applied: the base and the earth are set with translation pair constraints, the flower thinning element and the flower thinning axis are fixed constraints, the flower thinning axis and the connecting moving block are rotation pair constraints, and the other parts are fixed constraints. The rotation speed of the rotation pair of the flower thinning axis is set at 240r / min. Since the shape of the flower thinning element in this simulation is not complex, the geometric shape method in ADAMS / flex module is used to create the flexible body. In the View Flex interface, select the flexible parts, set the material as PVC rod, and select the geometric shape for the flexible body type, set the grid cell type as solid, set the grid size as 3mm, set the minimum cell size as 1mm, set the growth rate as 1.5, and set other settings as default. After grid division and automatic selection of defined connection points, the generated flexible body will automatically replace the rigid body, and the construction of the flexible body is completed.

Then the contact force parameters between the flower thinning element and the struck branch need to be defined. The selection of the stiffness coefficient is related to the material properties and geometric characteristics. The force index represents the nonlinear characteristics of the material, and reflects the index of the contribution value of the stiffness term of the material. The damping property is usually 0.1 ~ 1% of the stiffness value, and the penetration depth is greater than zero. This simulation parameter is based on the existing experience and its own material properties. The parameters are set as: stiffness coefficient k=71 N/mm, damping coefficient C=0.71 Ns/mm, force index e=2.2, penetration depth d=0.1mm. According to the existing simulation reference experience, the static friction speed is 0.1 mm/s and the static friction coefficient is 0.7. The dynamic friction speed is 10 mm/S, and the dynamic friction coefficient is 0.55, the recovery coefficient is 0.8.

After the parts are set as flexible body and the contact settings are completed, the rigid flexible coupling model components are completed, and the simulation time and step size are set in the simulation setting interface. The stress and deformation state of the branch struck hit by the thinning element during simulation is shown in Figure 4.

The simulation process is that the flower thinning element is driven by the flower thinning axis to rotate until the flexible flower thinning element contacts and collides with the branch. The flower thinning element is deformed and scrapes the branch. Due to the inertia and elasticity of the thinning element, the flower thinning element will swing after it scrapes the branch and continue to rotate under the driving of the flower thinning axis. The time variation of the force at the moment of contact and collision between the flower thinning element and the tree branch is shown as Figure 5 and Figure 6.

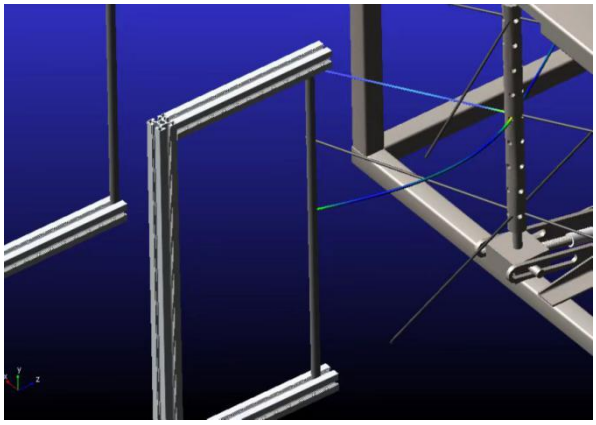

Fig. 4. Deformation of the thinning element
Рис. 4. Деформация прореживающего элемента

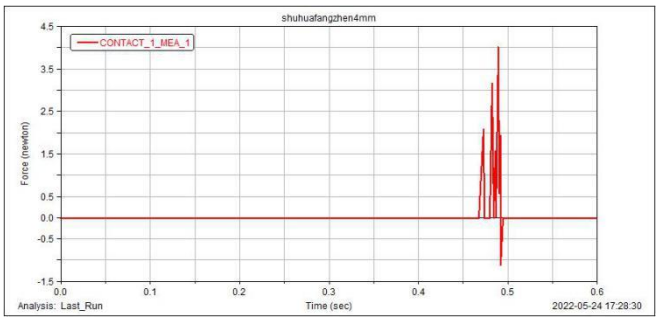

Fig. 5. Contact force curve of the thinning element at a rotational speed of 240 r/min
Рис. 5. Кривая контактного усилия прореживающего элемента при частоте вращения 240 об/мин

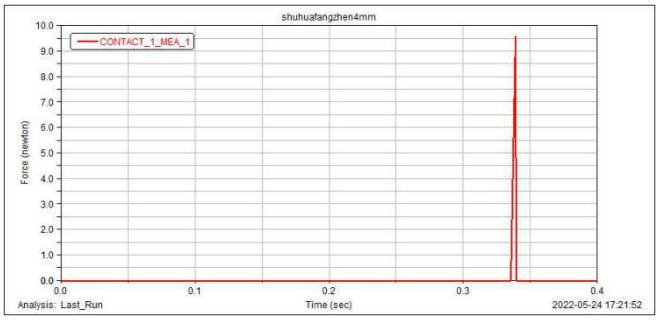

Fig. 6. Contact force curve of the thinning element at a rotational speed of 300 r/min
Рис. 6. Кривая контактного усилия прореживающего элемента при частоте вращения 300 об/мин

The simulation results show that when the rotation speed is 240 r / min, the force on the branch is always zero when the flower thinning element is not in contact with the branch. At 0.49 s, the flower thinning element contacts with the branch, and the impact force quickly reaches the peak of 4.02 N. After the flower thinning element rubs the branch, the interaction force decreases to 0. When the rotation speed is 300 r / min, the flower thinning element contacts the tree branch and the force is 9.57 N at 0.34 s. During flower thinning, the value of impact force is greater than 3.5 N, and the value of optimal impact force is greater than or equal to 4.49 N. The simulation results show that when the rotation speed of the flower thinning axis is 300 r / min, the force between the flower thinning

element and the branch is 9.57 N, which can meet the impact force requirements of flower thinning and finish flower thinning.

5 Conclusions

In order to achieve mechanical flower thinning in apple orchard, a double-section boom profiling flower thinning machine is proposed. During flower thinning the machine can adjust the working angle of the arms according to different property requirements, so that the flower thinning operation can be carried out under the working conditions of the optimal. In this paper, the structure of the whole machine is introduced; the key structure is analyzed by the mechanism theory and simulated by the ADAMS software. Through the ADAMS/Flex module, the impact force of the flower thinning mechanism is simulated. The simulation results show that the flower thinning mechanism designed in this paper can meet the impact force requirements of the flower thinning work.

Acknowledgments

The project is funded by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31971801), Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2020ME250, No. ZR2020ME252).

REFERENCES

1. Hehnen D., Hanrahan I., Lewis K., McFerson J., Blanke M. Mechanical flower thinning improves fruit quality of apples and promotes consistent bearing. *Scientia Horticulturae* 2012. Vol. 134, pp. 241-244.

2.Liu Limin, Nie Lin, Zhao Hongliang, Cao Yijing, Sun Ang. Study on the technology of apple flower and fruit thinning. *Shanxi Journal of Agricultural Sciences* 2018. Vol. 64(11), pp. 88-91.

3.Pan Yunfei, Zhou Yan, He Lei, Wang Qiang, Song Long. Research progress of flower and fruit thinning in orchard management. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization* 2021. Vol. 42(11), pp. 198-204.

4.Robinson, T.L., Lakso, A.N. Predicting chemical thinner response with a carbohydrate model. *Acta Horticulturae* 2011. Vol.903, pp. 743-750

5.Hua Min, Guo Lijun, Deng Huidong, Feng Xuejie, Chen Liming. ‘Guifeimang’ Study on mechanical flower thinning and chemical fruit thinning. *China Tropical Agriculture* 2020. Vol. 04, pp. 74-78.

6.Lu Mengmeng, Jiang Shan, Zhang Guohao, Zou Yangjun. Research progress on chemical flower and fruit thinning technology of apple. *China Fruits* 2021. Vol.04, pp. 4-7+22.

7.Lei Xiaohui, LV Xiaolan, Zhang Meina, Ma Zhengbai, Chang Youhong, Andreas Herbst. Test and research on electric rotating rope blossom thinner in “Cuiguan” pear orchard. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization* 2020. Vol. 41(09), pp. 47-52.

8.Li Jun, Xu Yan, Xu Jitong, Yang Zhou, Lu Huazhong. Design and experiment of control system for suspended electric flexible thinner. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineerin*, 2016. Vol. 32(18), pp. 61-66.

9.Wang Qiang. Design and research of mechanical blossom thinning device for the dwarf dense fruit trees. Hebei Agricultural University, 2018.

10.Lei Xiaohun,Lv Xiaolan,Zhang Meina,Lixue,Chang Youhong,Andreas.Herbst.Development and test of three arms tractor-mounted flower thinner.*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2019. Vol. 35(24), pp. 31-38.

11.Assirelli A., Giovannini D., Cacchi M., Sirri S., Baruzzi G., Caracciolo G. Evaluation of a new machine for flower and fruit thinning in stone fruits. *Sustainability* 2018. Vol. 10(11), 4088 DOI: 10.3390/su10114088

12.Zhang Qingbo, Zhouyan, Qin Tingting, Zhaowei, Li Shengduo, Hu Caiqi. Design of multifunctional machine for red jujube harvest, fruit tree spraying and whiting. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020. Vol 42(07), pp. 150-154.

13.Zhou Qian, Liu Jing, Zhou Yanmin, Qiu Changpeng, Zhang Xinzhong. High-spindle shaping technology of dwarfed intermediate stock apples. *Deciduous Fruits* 2020 Vol. 52(04), pp. 52-54.

14.Yuan Changwei. Design and performance test of peach blossom thinning machine. Agricultural University of Hebei,2021.

15.Hu Caiqi, Sun Chuanhai, Xu Yan. Experiment and Analysis of Mechanical Properties for Branches_pedicel Node and Receptacles_corolla Node of Apple Tree. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)* 2015. Vol. 32(03), pp. 211-214.

16.Sun Chuanhai, Hu Caiqi, Hou Qingsong, Pan Zhiguo. Simulation of mechanical thinning flower actuator based on ADAMS .*Journal of Agricultural Mechanization Research* 2015. Vol. 37(12), pp. 70-73.

УДК 631.171:55 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-61-70

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ НАКОПИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ ПЕРЕД ХРАНИЛИЩЕМ ПРИ ЗАГОТОВКЕ СИЛОСА

А.М. Валге, д-р. техн. наук А.И. Сухопаров, канд. техн. наук

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия.

В статье представлен способ определения размеров накопительной площадки, которая необходима для организации поточного технологического процесса закладки на хранение сочных кормов из трав (силос, сенаж). Нарушение агротехнических сроков заполнения силосной траншеи более чем на 4 дня приводит к снижению качества корма. Основные качественные потери силоса происходят в траншее – 33% от общих потерь, т.е. неравномерное распределение зелёной массы по траншее и недостаточное её уплотнение вызывают порчу корма. Поэтому определяющей технологической операцией для получения высококачественного силоса является равномерное распределение его по траншее. Одно из

условий эффективной работы уплотняющего агрегата в траншее – непрерывное поступление в нее зелёной массы. Этого можно достичь рациональными параметрами накопительной площадки перед траншеей. Малые размеры площадки ведут к простою транспортных средств и неэффективной работе трамбовщика, большие размеры – к нагреву корма и снижению его качества. Поступление транспортных средств с силосуемой массой и её уплотнение происходит по случайному закону. Их взаимодействие описывается моделью одноканальной системы массового обслуживания с ограниченной очередью. Вероятности простоя трамбовщика и отказа в обслуживании очередной привезённой порции травы должны быть минимальны. При рассмотрении работы транспортных средств и трамбовщика как системы, возникает оптимизационная задача – определить необходимое количество мест для порций травы от транспортного средства на площадке перед траншеей. Выявлено, что накопительная площадка перед силосной траншеей минимального размера должна иметь параметры для размещения не менее 3 порций зелёной массы, перевозимых автомобилем грузоподъёмностью 3 т. При ёмкости траншеи 1500 тонн и работе одного трамбовщика оптимальный размер накопительной площадки составит 6 порций. Это обеспечит непрерывную работу трамбовщика с вероятностью простоя 0,92 и с вероятностью отказа в обслуживании очередной порции травы 0,17. Применение рассмотренного подхода при определении оптимального размера накопительной площадки перед хранилищем будет способствовать решению задачи по формированию рационального уборочно-транспортного комплекса для заготовки кормов из подвяленных трав с учётом имеющихся технических ресурсов, объёмов хранилищ и логистики доставки кормов с полей до хранилищ.

Ключевые слова: силос, заготовка кормов, силосная траншея, накопительная площадка, оптимизация, теория массового обслуживания

Для цитирования: Валге А.М.,Сухопаров А.И. Определение размеров накопительной площадки перед хранилищем при заготовке силоса // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3 (112). С.61-70

DETERMINING THE CAPACITY OF A GRASS ACCUMULATION SITE IN FRONT OF THE TRENCH SILO

A.M. Valge, DSc (Engineering); A.I. Sukhoparov, Cand. Sc. (Engineering)

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

The article presents a method for determining the capacity of a grass accumulation site required to maintain a streaming technological process of laying succulent grass fodder (silage, haylage) for storage.

Violation of agrotechnical time-limits for filling the trench silo for more than 4 days results in a poorer fodder quality. The main loss of silage quality occurs in the trench - 33% of the total loss, i.e. uneven distribution of the green mass along the trench and its insufficient compaction cause the silage spoilage. Thus, the defining technological operation in preparing the best quality silage is its uniform distribution over the trench. One of the conditions for the efficient operation of the packing

unit is the continuous flow of ensiled mass into the trench. This can be achieved by the rational parameters of a grass accumulation site in front of the trench. A small site capacity leads to downtime of trucks and an inefficient performance of a silo packer; a large volume leads to fodder heating and its poor quality. The arrival of trucks with grass and the compaction of the silage mass are governed by a random law. Their interaction is described by the model of a single-channel queuing system with a limited queue. The probability of downtime of the packer and denial to handle the next load of grass brought in should be minimal. When considering the operation of trucks and a packer as a system, an optimization problem is to determine the required number of places on the site for the loads of grass brought by trucks. It was found that the minimal accumulation site in front of the silo trench should accommodate at least 3 loads of grass transported by a truck with a carrying capacity of 3 tons. With a trench capacity of 1500 tons and the operation of one packer, the optimal accumulation area will be 6 loads of grass. This will ensure the continuous operation of the packer with a downtime probability of 0.92 and a denial probability to handle the next grass load of 0.17. The proposed approach to determining the optimal volume of the grass accumulation site in front of the silo trench will contribute to solving the problem of creating a rational harvesting and transport complex for making fodder from air-cured grass, taking into account the available technical resources, storage volume and the logistics of fodder delivery from the field to the storage.

Key words: silage, fodder making, silage trench, accumulation pad, optimisation, queueing theory

For citation: Valge A.M., Sukhoparov A.I. Determining the capacity of a grass accumulation site in front of the trench silo. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 3(112): 61-70 (In Russian)

Введение

Силос является основным видом корма в рационе сельскохозяйственных животных [1, 2]. В технологии производства кормов из подвяленных трав наиболее ответственной операцией является загрузка травы в траншею и трамбовка её до плотности 500 кг/м^3 с целью вытеснения из травы воздуха и обеспечения протекания процесса консервации травы [3]. Заполнение траншеи зелёной массой ограничено временным сроком, до 3-4 дней [4, 5]. Нарушение агротехнических требований относительно сроков загрузки силосных траншей является следствием принятия ошибочных решений в логистике транспортировки кормов и нарушения принципа поточности в технологическом процессе заготовки кормов. Частично задача обеспечения поточности поступления зелёной (провяленной) травяной массы с поля к хранилищу была решена уже в ряде работ [6, 7, 8]. Однако в процессе уплотнения не обеспечивается равномерность распределения массы по площади траншеи и по толщине силосуемого слоя. Что способствует достижению качественных потерь силоса в траншее до 33 % от общих потерь [9].

Исходя из этого, повысить эффективность кормозаготовительного процесса в производственных условиях возможно при обеспечении поточного технологического процесса с равномерным цикличным поступлением силосуемой массы из провяленных трав с поля в траншею. Этому будет способствовать организация перед траншей разгрузочной площадка, на которую выгружается транспортными средствами поступающая

от кормоуборочного комбайнов провяленная зелёная масса. Далее эта масса трамбовщиком перемещается в траншею, распределяется слоем 30-40 см по всей площади и трамбуется. Размер разгрузочной площадки должен быть таким, чтобы обеспечивалась непрерывная работа трамбовщика, и было бы ещё место для выгрузки порций зелёной массы доставляемых транспортными средствами от кормоуборочного комбайна с поля. Решение подобной задачи было осуществлено применительно технологического процесса закладки зерносенажа в полиэтиленовый рукав [10].

Согласованность действий кормозаготовительного комплекса машин – косилка - грабли - кормоуборочный комбайн - транспортное средство - трамбовщик обеспечат заготовку качественного силоса, что будет способствовать разработке модели управления комплекса машин для заготовки силоса и обеспечит их сбалансированную работу [11].

Цель работы – определить размер накопительной площадки перед местом хранения провяленных кормов из трав (силосной траншеей) исходя из минимального времени простоя трамбовщика и транспортных средств.

Материалы и методы

Поступление транспортных средств с травой происходит по случайному закону, разгрузочная площадка перед силосной траншеей имеет ограничение по вместимости, а перемещение с поля к хранилищу и последующая закладка на хранение (трамбование) зелёной массы осуществляется техническими средствами, производительность которых также изменяется случайно в зависимости от условий работы. Поэтому, исходя из особенностей данной технологии, рассмотрим модель одноканальной системы массового обслуживания (СМО) с ограниченной очередью [12].

СМО такого вида имеет граф состояний, приведенный на Рисунке 1.

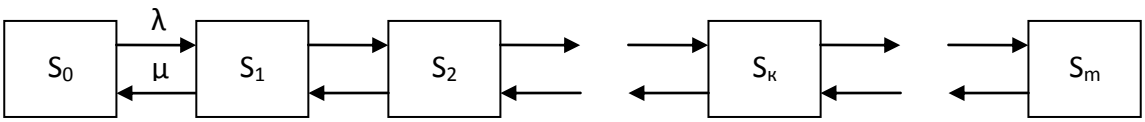

Рис. 1. Граф возможных состояний одноканальной СМО:
S_o – трамбовщик не работает (простаивает); S_1 – трамбовщик работает, но на площадке запаса зелёной массы нет; S_2 – трамбовщик работает, на площадке одна порция зелёной массы; $S_к$ – трамбовщик работает, на площадке к-1 порций зелёной массы; S_m – трамбовщик работает, на площадке m-порций зелёной массы; λ – интенсивность поступления зелёной массы от кормоуборочных комбайнов к хранилищу, т/ч; μ – интенсивность обработки зелёной массы трамбовщиком, т/ч

Одноканальная система массового обслуживания имеет следующие значения предельных вероятностей [12]:

$$P_0 = (1 + \alpha + \alpha^2 + \cdots + \alpha^{m+1})^{-1},$$

$$P_1 = \alpha \cdot P_0;\ P_2 = \alpha^2 \cdot P_0;\ \ldots..;\ P_{m+1} = \alpha^{m+1} \cdot P_0, \quad (1)$$

где $\alpha = \lambda / \mu$;

P_0 – вероятность простоя трамбовщика;

P_1 – вероятность наличия на площадке одной порции травы, которую обрабатывает трамбовщик;

P_{m+1} – вероятность, что на площадке находится m-порций зелёной массы, с которыми трамбовщик работает;

m – размер накопительной площадки, измеряемый через количество порций зелёной массы доставленной одним транспортным средством с поля

В равенстве 1 сумма отношений интенсивностей поступления силосной массы с поля к хранилищу и её обработки в неё представлена в виде геометрической прогрессии, которую можно преобразовать и записать в ином виде:

$$P_o = \frac{1}{(1-\alpha^{m+2})/(1-\alpha)} = \frac{1-\alpha}{(1-\alpha^{m+2})}. \quad (2)$$

При заполнении накопительной площадки m-порциями зелёной массы, очередным прибывшим с порцией транспортным средствам отказывается в обслуживании и они встают в очередь или вынуждены отправиться к другой площадке.

Вероятность отказа в обслуживании очередной порции зелёной массы определяется значением P_{m+1}:

$$P_{отк} = P_{m+1} = \frac{\alpha^{m+1}(1-\alpha)}{1-\alpha^{m+2}}. \quad (3)$$

Относительная пропускная способность СМО определяется соотношением:

$$q = 1 - P_{отк}. \quad (4)$$

Абсолютная пропускная способность:

$$A = \lambda \cdot q. \quad (5)$$

Среднее количество порций травы на площадке определяется соотношением [12]:

$$\bar{n} = \frac{\alpha^2[1-\alpha^m(m+1-m\cdot\alpha)]}{(1-\alpha^{m+2})(1-\alpha)}. \quad (6)$$

На накопительной площадке каждая порция зелёной массы находится некоторое время до момента начала закладки на хранение. Время пребывания на площадке не должно быть очень большим во избежание начала процессов самосогревания и потери питательной ценности заготавливаемого корма. Среднее время ожидания обслуживания порции зелёной массы определяется выражением [11]:

$$T_{ож} = \lambda^{-1}\left[\frac{\alpha^2[1-\alpha^m(m+1-m\cdot\alpha)]}{(1-\alpha^{m+2})(1-\alpha)}\right] + \mu^{-1}\left[1-\frac{\alpha^{m+1}(1-\alpha)}{1-\alpha^{m+2}}\right]. \quad (7)$$

Показатели системы P_0, $P_{отк}$, $\bar{n}$, $T_{ож}$ в основном зависят от значений λ, μ, m. Поэтому определённое соотношения этих показателей влияет на формирование выходных показателей системы, описывающей технологический процесс заготовки силоса.

Наиболее элементарный случай возникает при $\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = 1{,}0$.

При α=1 выражение (2) превращается в неопределенность типа ∞, поэтому P_0 легче определить по соотношению (1). Т.е. при $\alpha = 1$ $P_0 = \frac{1}{m+2}$, $P_{отк}\frac{1}{m+2}$.

Отсюда возможная емкость площадки при $\lambda = \mu$ λ: $m = \frac{1}{P_0} - 2$.

Среднее время ожидания транспортных средств с поля с порцией провяленной зелёной массы определяется выражением: $T_{ож(\alpha=1)} = \frac{m+1}{2 \cdot \mu}$.

Результаты исследований

Для обеспечения стабильной работы системы технологического процесса заготовки силоса параметры уборочно-транспортного комплекса и технических средств закладки на хранение должны быть согласованы и увязаны между собой, удовлетворяя следующим основным требованиям:

- минимальное время простоя кормоуборочного комбайна;
- минимальное время простоя транспортных средств в очереди;
- время нахождения порций зелёной массы на площадке не должно превышать допустимого времени по технологическим нормам во избежание порчи корма (3-5 минут).

Рассмотренные выше соотношения для определения вероятностей состояний системы массового обслуживания применительно к технологическому процессу заготовки кормов позволяют сформулировать компромиссную задачу математического программирования, учитывающую изложенные требования.

Размер накопительной площадки перед траншеей напрямую зависят от финансовых вложений для её обустройства и в последующем эффективного функционирования, поэтому с целью снижения себестоимости заготовки кормов целесообразно, что бы размеры её были рациональными, т.е. стремились к минимальным $m \to \min$, при этом не допуская простоя технических средств кормозаготовительного звена.

Таким образом, вероятность простоя трамбовщика и отказа в обслуживании должны быть минимальными:

$$P_{\text{о}} \to \min;\ P_{\text{отк}} \to \min.$$

Значение показателей поступления травы λ и её переработки могут изменяться в некоторых интервалах:

$$\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max};\ \mu_{\min} < \mu < \mu_{\max}$$

С учетом приведенных ограничений возникает оптимизационная задача – определить минимально необходимое число мест для порций травы на площадке:

$$m \to \min.$$

При следующих ограничениях:

$$P_0 = \frac{1-\alpha}{1-\alpha^{m+2}} \le P_{0доп};\ P_{отк} = \frac{(1-\alpha)\cdot\alpha^{m+1}}{1-\alpha^{m+2}} \le P_{отк.доп};$$

$$T_{ож} = \lambda^{-1}\left[\frac{\alpha^2[1-\alpha^m(m+1-m\cdot\alpha)]}{(1-\alpha^{m+2})(1-\alpha)}\right] + \mu^{-1}\left[1-\frac{\alpha^{m+1}(1-\alpha)}{1-\alpha^{m+2}}\right] \le T_{ож.доп}; \quad (8)$$

$$\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max};\ \mu_{\min} < \mu < \mu_{\max}$$

Система (8) представляет собой задачу нелинейного программирования, для решения

которой необходимо использовать соответствующее программное обеспечение.

Показатели λ и μ являются параметрами экспоненциального распределения, математическое ожидание которого определяется соотношением [12]:

$$m_t = \lambda \cdot \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \alpha t \,. \qquad (9)$$

После интегрирования получим:

$$m_t = 1/\lambda \,. \qquad (10)$$

Отсюда параметр λ можно определить, зная среднее поступление заявок в единицу времени:

$$\lambda = 1/m_t \,, \qquad (11)$$

где m_t – среднее количество поступления порций травы в единицу времени.

На основе таких же рассуждений параметр μ приближенно определяется по соотношению:

$$\mu = 1/m_{абс} \,, \qquad (12)$$

где $m_{абс}$ – среднее время обработки трамбовщиком одной порции зелёной массы.

Предварительный анализ уравнений (8)-(12) показал, что при малых значениях допустимой вероятности $P_о$ и $P_{отк} \le 0{,}1$, она не имеет решения (допустимых значений переменных). Для определения допустимых изменений переменных исследование системы (8) было выполнено методом пошагового изменения значений λ и μ в пределах от 0,1 до 1,5 с некоторым шагом. Из полученных значений методом фильтрации отбирались значения по двум показателям:

$P_о = P_{о.\min}$ и $P_{отк} = P_{отк.\min}$

Минимальные значения отбирались с шагом изменения 0,01 начиная с $P_{\min} = 0{,}05$.

В программном приложении Microsoft Office Excel 2003 был выполнен расчёт относительно работы одного трамбовщика на базе трактора К-701 при закладке силоса на хранение в траншею объёмом 1500 т и 3 транспортных средств на базе автомобиля ГАЗ-САЗ-3507 с плечём перевозки зелёной массы с поля к хранилищу равным 8 км. Результаты расчетов зависимости простоев трамбовщика ($P_о$) и транспортных средств ($P_{отк}$) от размеров накопительной площадки при силосной траншее в графическом виде представлены на Рисунке 2.

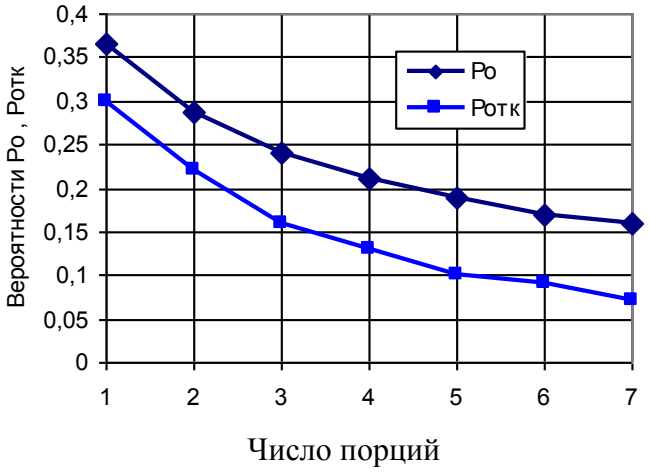

Рис. 2. Зависимость вероятностей $P_о$ и $P_{отк}$ от емкости накопительной площадки

Выводы

1. Анализ полученных зависимостей представленных на Рисунке 2 показывает, что резкое снижение вероятностей простоя трамбовщика и отказа в обслуживании транспортного средства им (m) происходит при следующем размещении количества порций травы на разгрузочной площадке в диапазоне $1 < m \leq 4$.

2. При m>4 снижение значения вероятностей происходит медленно с ростом числа порций зелёной массы на накопительной площадке. Площадка минимального размера должна обладать параметрами для размещения не менее трёх порций зелёной массы, что обеспечит работу технических средств без существенных простоев.

3. При размере накопительной площадки способной разместить более пяти порций зелёной массы рассматриваемые вероятности $P_{о}$ и $P_{отк}$ составляют 0,08 и 0,17, что уже обеспечивает поточное выполнение технологического процесса заготовки силоса с качественным уплотнением зелёной массы в траншее.

4. Применение рассмотренного подхода при определении оптимального размера накопительной площадки перед хранилищем будет способствовать решению задачи по формированию рационального уборочно-транспортного комплекса для заготовки кормов из подвяленных трав с учётом имеющихся технических ресурсов, объём хранилищ и логистики доставки зелёной массы с полей к месту хранения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов А. Ф., Стекольников А. А., Алемайкин И. Д. и др. Крупный рогатый скот: содержание, кормление, болезни: диагностика и лечение: учебное пособие для вузов / под ред. А. Ф. Кузнецова. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 752 с.

2. Ярышкин А.А. Кормление дойных коров // *Вестник биотехнологии*. 2017. №2(12). С. 18

3 Мееровский А.С., Пастушок Р.Т., Бирюкович А.Л., Михайлова О.С. Технологический регламент по производству зелёного корма и сырья для заготовки кормов на улучшенных сенокосах // *Мелиорация*. 2021. №1. С. 31-37.

4. Лесбекова С.Ж., Ибраимова Ж.К., Шоинбаева К.Б., Баймирзаева Ж.Н., Калдыбекова Г.М. Исследование основных фаз процесса силосования трав и причины потери питательных веществ в силосе / *Actual Scientific Research*. Материалы XXXVII Международной научно-практической конференции. Москва, 27 апреля 2018. Астрахань: Научный центр «Олимп». 2018. С. 103-104.

5. Busato, P., Sopegno, A., Pampuro, N., Sartori, L., Berruto, R. Optimisation tool for logistics operations in silage production. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 180, pp. 146-160.

6. Valge A., Sukhoparov A., Papushin E. Grass forage transportation process modeling. *Engineering for Rural Development*. Proc. 19th Int. Sci. Conf., 20-22 May 2020, Jelgava, Latvia. Jelgava: LLU. 2020, pp. 1201-1207.

7. Valge A.I, Sukhoparov A., Perekopsky A.N. Optimization of transport support for forage harvesters. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 941(1), 012021.

8. Валге А.М., Сухопаров А.И. Выбор грузоподъёмности транспортных средств при заготовке кормов из подвяленных трав // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. №2(111). С. 107-116.
9. Региональная целевая комплексная программа интенсификации кормопроизводства «Корма» Ленинградской области на 2000 - 2005 гг. СПб.: СЗНИИМЭСХ. 2000. 133 с.
10. Валге А.М., Перекопский А.Н., Баранов Л.Н. Оптимизация параметров накопительной площадки для производства плющёного зерна с набивкой в полиэтиленовый рукав // *Технологии и технические средства механизированного производства растениеводства и животноводства*. 2005. № 77. С. 97-103.
11. Соколов Б.В., Сухопаров А.И., Гайдидей С.В. Модель управления технологическим процессом заготовки силоса // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. №1(110). С. 133-142.
12. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио. 1972. 532 с.

REFERENCES

1. Kuznetsov A. F., Stekolnikov A. A., Alemaikin I. D. et al. Krupnyi rogatyi skot: soderzhanie, kormlenie, bolezni: diagnostika i lechenie: uchebnoe posobie dlya vuzov [Cattle: maintenance, feeding, diseases: diagnosis and treatment: textbook for universities. A. F. Kuznetsov (ed.)]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2021. 752 p. (In Russian)
2. Yaryshkin A.A. Kormlenie doinykh korov [Feeding of lactating cows]. *Vestnik biotekhnologii*. 2017. No.2(12): 18 (In Russian)
3 Meerovskii A.S., Pastushok R.T., Biryukovich A.L., Mikhailova O.S. Tekhnologicheskii reglament po proizvodstvu zelenogo korma i syr'ya dlya zagotovki kormov na uluchshennykh senokosakh [Technological regulations for the production of green feed and raw materials for forage harvesting on improved hayfields]. *Melioratsiya*. 2021. No.1: 31-37 (In Russian)
4. Lesbekova S.Zh., Ibraimova Zh.K., Shoinbaeva K.B., Baimirzaeva Zh.N., Kaldybekova G.M. Issledovanie osnovnykh faz protsessa silosovaniya trav i prichiny poteri pitatel'-nykh veshchestv v silose [Investigation of the main phases of the grass ensiling process and the causes of nutrient loss in the silage]. In: *Actual Scientific Research*. Proc. XXXVII Int. Sci. Prac. Conf., Moscow, 27 April 2018. Astrakhan': Scientific Centre “Olimp”. 2018: 103-104 (In Russian)
5. Busato, P., Sopegno, A., Pampuro, N., Sartori, L., Berruto, R. Optimisation tool for logistics operations in silage production. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 180: 146-160. doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.01.008
6. Valge A., Sukhoparov A., Papushin E. Grass forage transportation process modeling. *Engineering for Rural Development*. Proc. 19th Int. Sci. Conf., 20-22 May 2020, Jelgava, Latvia. Jelgava: LLU. 2020, pp. 1201-1207 (In English)
7. Valge A.I, Sukhoparov A., Perekopsky A.N. Optimization of transport support for forage harvesters. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 941(1), 012021 (In English)
8. Valge A.M., Sukhoparov A.I. Vybor gruzopod"emnosti transportnykh sredstv pri zago-tovke kormov iz podvyalennykh trav [Choice of load capacity of vehicles involved in making fodder from air-cured grass]. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 2(111): 107-116 (In Russian)
9. Regional'naya tselevaya kompleksnaya programma intensifikatsii kormoproizvodstva "Korma" Leningradskoi oblasti na 2000-2005 [Regional target complex program of intensification of forage

production “Korma” of Leningrad Region for the years 2000-2005]. Saint Petersburg: SZNIIMESH. 2000. 133 p. (In Russian)
10. Valge A.M., Perekopskii A.N., Baranov L.N. Optimizatsiya parametrov nakopitel'noi ploshchadki dlya proizvodstva plyushchenogo zerna s nabivkoi v polietilenovyi rukav [Optimization of the parameters of the accumulation site for the production of rolled grain by packing it in a plastic bag]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2005. No. 77: 97-103 (In Russian)
11. Sokolov B.V., Sukhoparov A.I., Gaididei S.V. Model' upravleniya tekhnologicheskim protsessom zagotovki silosa [Control model for a technological process of silage making]. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 1(110): 133-142 (In Russian)
12. Venttsel E.S. Issledovanie operatsii [Operations’ research]. Moscow: Sovetskoe Radio, 1972. 532 p. (In Russian)

УДК 631.879.4:631.559 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-70-81

ВЛИЯНИЕ КОМПОСТОВ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОТХОДОВ НА ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Никифоренко Ю. Ю., канд. биол. наук

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина», Краснодар, Россия

Для сохранения плодородия пахотных почв необходимо компенсировать потери питательных элементов, выносимых с урожаем сельскохозяйственных культур. Одним из эффективных способов восстановления продуктивности почв и культур является компостирование отходов различных производств, из которых наибольшей удобрительной ценностью обладают органические отходы животноводства. При использовании навоза КРС в качестве сырья для удобрения необходимо соблюдение целого ряда приёмов и норм, чтобы избежать загрязнения окружающей среды, в первую очередь почв. Другим важным требованием при компостировании является максимальное сохранение питательных для растений веществ и элементов и гомогенность структуры смеси. С этой целью рекомендуется использовать в составе компостов фосфогипс – крупнотоннажный отход химического производства. Он обогащает компост кальцием, серой, фосфором, снижает плотность почвы, оптимизирует pH и способствует экономному расходованию соединений азота. Полевые опыты по изучению эффективности компоста проводились в условиях агроландшафта степной зоны Краснодарского края. Внесение в почву зрелого компоста на основе навоза, растительных остатков и фосфогипса в соотношении 7:1:1 в дозе 40–60 т/га привело к оптимизации почвенной структуры – снижению плотности почвы на 13 % и увеличению общей пористости на 8 %, а также к повышению водоудерживающей

способности – увеличению полной влагоемкости на 23 %. Внесение компоста способствовало улучшению агрохимических и физико-химических показателей чернозема обыкновенного. Повышение содержания общего азота в среднем составило 14 %, органического вещества – 12 %, подвижного фосфора – 15 %, общего кальция и серы – в 2 раза. Применение компоста статистически значимо повышало продуктивность сельскохозяйственных культур, причем как в год внесения, так и в последействии: урожайность сахарной свеклы повысилась в среднем на 40 т/га, озимой пшеницы – на 7 ц/га, кукурузы – на 6 ц/га. На основании экспериментальных данных показана ценность органосодержащих отходов, их роль в экологизации земледелия и оздоровлении агроландшафтов.

***Ключевые слова*:** производственные отходы, компост, агроландшафт, навоз крупного рогатого скота, фосфогипс.

Для цитирования: Никифоренко Ю.Ю. Влияние компостов на основе производственных отходов на плодородие почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3 (112). С.70-82

INFLUENCE OF COMPOSTS BASED ON PRODUCTION WASTE ON SOIL FERTILITY AND CROP PRODUCTIVITY

Yu. Yu. Nikiforenko, Cand. Sc. (Biology)

Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia

To maintain the arable soil fertility, it is necessary to recover the nutrients removed with the crop yields. Composting of various industrial wastes is an effective way to restore the productivity of soils and crops. The organic animal waste is of the greatest fertilizing value in this respect. Yet, several practices and standards should be followed in using the cattle manure as a raw material for fertilizer production to avoid the pollution of environment, the soil, in the first place. Another important requirement to composting is the greatest saving of nutrients and elements needed by plants and ensuring the mixture homogeneity. The use of phosphogypsum, a large-tonnage waste of chemical production, in the composition of composts is recommended for this purpose. It enriches the compost with calcium, sulfur, phosphorus, reduces soil density, optimizes pH, and contributes to the economical consumption of nitrogen compounds. Field experiments on the compost effectiveness were carried out in the conditions of the agricultural landscape of the steppe zone in the Krasnodar Territory. The soil introduction of mature compost from manure, plant residues and phosphogypsum in a ratio of 7:1:1 at a dose of 40 to 60 t/ha optimized the soil structure and provided a 13% decrease in soil density, an 8% increase in total porosity, and a 23% increase in water-holding capacity. The application of composts helped to enhance nutritional and physicochemical properties of ordinary chernozem. An increase in the total nitrogen content was 14% average, organic matter – 12%, mobile phosphorus – 15%, and total calcium and sulfur – 2 times. It also showed a statistically significant increase in the productivity of agricultural crops, both in the year of application as well as an aftereffect: the yield of sugar beet rose by 40 t/ha average, winter wheat – by 700 kg/ha, corn – by 600 kg/ha. The experimental data demonstrated the

value of organic waste and its importance in greening the agriculture and promoting the agricultural landscapes' health.

Key words: industrial waste, compost, agricultural landscape, cattle manure, phosphogypsum.

For citation: Nikiforenko Yu. Yu. Influence of composts based on production waste on soil fertility and crop productivity. *AgroEcoEngineeriya*. 2022. No. 3(112): 70- 82 (In Russian)

Введение

Важнейшими экологическими, экономическими и социальными задачами современного мира являются разработки, связанные с технологиями переработки и вторичного использования многотоннажных производственных отходов и в первую очередь отходов животноводства.

В России ежегодно в процессе производства образуются сотни миллионов тонн продуктов жизнедеятельности животных. Отходы птице- и животноводства являются, безусловно, ценным органическим удобрением, применение которого оказывает комплексное положительное действие на почву и растительную продукцию. Однако современные формы органических удобрений, получаемые на животноводческих комплексах, являются источником повышенной экологической опасности, так как могут загрязнять почву, водные объекты и атмосферный воздух [3].

Несоблюдение сроков карантинизации, норм и технологий внесения навоза в почву, вывоз на поля некомпостированного навоза зачастую сопровождается перенасыщением агроэкосистемы биогенными элементами, содержащимися в составе отходов тяжелыми металлами, патогенной микрофлорой и семенами сорных растений, загрязнение грунтовых вод навозными стоками, наличие в составе отходов и другими негативными последствиями. Необходимость грамотного использования органосодержащих отходов в качестве органических удобрений является обязательным условием [4, 7].

Разрабатываемые технологии в земледелии должны быть направлены на приостановление деградации плодородных земель и восстановление их природных функций. В настоящее время органические удобрения вносятся в количестве 0,9 т/га, что компенсирует только часть элементов питания, выносимых растениями [8]. Компостирование различных по происхождению отходов и получение органического удобрения является одним из эффективных способов защиты плодородия почв. Компостирование позволяет не только получить питательное удобрение, но и вторично использовать различные по происхождению отходы. Такой подход к утилизации многих отходов является одним из перспективных и широко распространенных в последнее время, что позволяет одновременно решить вопросы экологизации сельского хозяйства и сохранения плодородия почв.

Однако в настоящее время система сбора, оценки удобрительной ценности и экологической безопасности отходов животноводства и возможностей их размещения в агроэкосистеме ставит много вопросов, которые требуют решения [6].

Для продуктов жизнедеятельности животных очень важно предусмотреть отдельное регулирование, предусматривающее их полезное использование. При этом следует учитывать, что в случае нанесения ущерба окружающей

среде при неграмотном обращении с отходами предусматривается ответственность согласно ФЗ № 7 «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 г.

В настоящее время существует достаточно большое количество документов, регламентирующих работу с органосодержащими отходами животноводства [13].

Комплекс приемов хранения и подготовки к использованию навоза и помета должен гарантировать надежное обеззараживание их от патогенных микроорганизмов, жизнеспособных яиц гельминтов, а также обеспечить производство однородных, гомогенизированных органических удобрений, соответствующих условиям качественного и равномерного их внесения в почву. При этом важно максимально сохранить в навозе питательные вещества. Также одним из основных требований эффективного, экологически безопасного использования органических удобрений является организация систематического контроля их качества, особенно перед внесением [5, 11].

Целью работы явилась оценка возможности использования компоста на основе производственных отходов для повышения плодородия почвы и продуктивности сельскохозяйственных растений. Такая необходимость возникла в связи с необходимостью решения экологических проблем складирования отходов, сдерживания и приостановления деградационных процессов почвенного покрова и восстановления его экологических функций.

Материалы и методы

Сотрудниками кафедры ботаники и общей экологии Кубанского ГАУ имени И. Т. Трубилина были проведены исследования по созданию компоста на основе производственных отходов и его использованию в условиях агроландшафта.

Полевой опыт был заложен весной 2018 г. на черноземе обыкновенном степной зоны Краснодарского края. В севообороте культуры чередовались следующим образом: сахарная свекла (2018 г.) – озимая пшеница (2018-2019 гг.) – кукуруза на зерно (2020 г.). Опыт включал следующие варианты:1) Контроль ($N_{0,5}P_{0,4}$); 2) навоз крупного рогатого скота (навоз КРС) (5,0 кг/м^2) + $N_{0,5}P_{0,4}$; 3) компост (6,5 кг/м^2) + $N_{0,5}P_{0,4}$. Доза NP приведена из расчета на опытную делянку. Площадь делянок составила по 50 м^2 в пятикратной повторности, расположение рендомизированное. Чередование культур определялось технологией их выращивания. Компост и навоз КРС вносились перед посевом сахарной свеклы в первый год проведения исследования (т.е. один раз за весь период проведения опыта).

Для создания компоста с высокой удобрительной ценностью использовался навоз КРС, фосфогипс и растительные остатки в соотношении 7 : 1 : 1. При таком сочетании компонентов сроки созревания компоста уменьшаются и составляют 5 месяцев. Добавление в состав компоста фосфогипса обусловлено необходимостью уменьшения потерь азота и органических соединений.

Статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью компьютерной программы Microsoft Excel 2007. Достоверность полученных данных определялась с помощью критерия Стьюдента (t-критерия) на 5% уровне значимости (p=0,05).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что в готовом компосте уровень агрегированности увеличился на 15 % по сравнению с навозом КРС. Так же увеличилась аэрация и

увлажненность среды до 40 %. Отмечались более высокие показатели содержания основных питательных элементов (таблица 1).

Таблица 1

Агрохимические свойства компоста и навоза КРС

Вариант	Орг. вещ-во, %	N, %	NH_4^+, %	$P_{общ,}$ %	CaO, %	SO_4^{2-}, %	pH
Навоз КРС	19,63 ± 0,59	0,64 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,35 ± 0,02	0,05 ± 0,01	8,08
Компост	22,86 ± 0,95	0,69 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,32 ± 0,02	0,44 ± 0,02	0,12 ± 0,01	6,89

При сочетании навоза КРС и фосфогипса происходит снижение потерь органического вещества в среднем до 20 %, что обусловлено снижением скорости его минерализации. При созревании компоста в его составе повышается концентрация аммонийного азота при одновременном снижении процессов денитрификации.

В навозе КРС потери азота составляют до двух третьих и больше от первоначального его содержания. Чередование слоев навоза КРС, фосфогипса и остальных сельскохозяйственных отходов способствует поглощению аммиака при обмене катионов фосфогипса на ионы аммония. Высокие показатели емкости катионного обмена минеральных (фосфогипс) и органических (сельскохозяйственные отходы) компонентов компоста способствуют поглощению большей части аммония и его закреплению в гранулах. При компостировании 100 т навоза сохраняется до 500 кг азота [1, 10].

Фосфогипс в составе компоста способствует его обогащению кальцием, серой, фосфором. За счет кислой реакции среды фосфогипса (pH 4,5–5,0) происходит нейтрализация навоза КРС, в результате чего pH компоста становится нейтральной.

Анализ компонентов компоста на содержание тяжелых металлов показал, что навоз КРС по сравнению с фосфогипсом содержит на порядок больше Hg, Pb, Cu, Ni и Mn. Так, в навозе КРС массовая концентрация ртути составляла 1,67 мг/кг, а в фосфогипсе – 0,28 мг/кг. В фосфогипсе свинец обнаружен в минимальных следовых количествах, тогда как в навозе КРС его концентрация оказалась в 5 раз выше и составила 5,84 мг/кг. Аналогичная тенденция выявлена и для таких элементов, как медь (Cu), никель (Ni) и марганец (Mn). При этом массовая концентрация тяжелых металлов в навозе КРС не превышала ПДК (таблица 2).

Таблица 2

Массовая концентрация тяжелых металлов в навозе, фосфогипсе и компосте

Образец	Массовая концентрация, мг/кг					
	Hg	Pb	Cd	Cu	Ni	Mn
Навоз КРС	1,67	5,84	< 0,1	12,22	21,22	37,33
Фосфогипс	0,28	< 0,2	< 0,1	< 1,0	< 2,0	< 20,0
Компост	1,57	6,43	< 0,1	6,01	19,44	72,45
ПДК (валовое содержание)	2,1	32,0	2,0	55,0	85,0	1500,0

При определении массовой концентрации тяжелых металлов в полученном компосте превышений ПДК выявлено не было.

В полевых опытах при внесении компоста под посев сельскохозяйственных культур были определены основные физические свойства почвы. Отмечено увеличение общей пористости и снижение плотности почвы, которая в варианте с использованием компоста в среднем составила 1,09 ± 0,03 г/см^3, тогда как на участке с навозом КРС – 1,21 ± 0,03 г/см^3, а на контроле – 1,26 ± 0,04 (таблица 3).

Таблица 3

Физические свойства почвы в условиях полевого опыта

Показатель	Варианты опыта		
	Контроль	Навоз КРС	Компост
Плотность почвы, г/см³	1,26 ± 0,04	1,21 ± 0,03	1,09 ± 0,03
Общая пористость, %	47,19 ± 1,72	47,88 ± 1,74	51,22 ± 1,78
Полевая влажность, %	29,47 ± 0,45	30,12 ± 0,54	33,18 ± 0,51
Полная влагоемкость, %	37,79 ± 1,25	40,11 ± 1,32	46,31 ± 1,75

Снижение плотности почвы в вариантах с компостом способствовало повышению ее общей пористости (до 51,22 ± 1,78 %). Это обусловлено стукрурообразующим действием фосфогипса. Сочетание в компосте органической части с минеральной (фосфогипс) способствует улучшению аэрации субстрата, обогащению почвы кислородом, активному поглощению и более экономному расходованию влаги.

Агрохимические показатели почвы при внесении в почву компоста отличаются от варианта с использованием навоза КРС (таблица 4).

Таблица 4

Агрохимические свойства почвы в условиях полевого опыта

Показатель	Варианты опыта		
	Контроль	Навоз КРС	Компост
Орг. вещ-во, %	3,63 ± 0,05	3,66 ± 0,06	4,07 ± 0,07
$N_{общ}$, %	0,20 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,31 ± 0,01
NH_4^+, мг/кг	2,24 ± 0,05	2,65 ± 0,05	2,83 ± 0,06
NO_3^-, мг/кг	6,40 ± 0,14	7,60 ± 0,19	10,15 ± 0,23
P_2O_5, мг/кг	28,50 ± 1,68	29,64 ± 1,74	32,40 ± 0,40
CaO, %	0,15 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,32 ± 0,01
SO_4^{2-}, %	0,08 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,15 ± 0,01
pH	7,43 ± 0,16	7,68 ± 0,15	6,86 ± 0,14

В результате исследований было установлено, что при использовании компоста в почве увеличилось содержание органического вещества – 4,07 ± 0,07 %, тогда как при внесении в почву навоза КРС данный показатель составил 3,66 ± 0,06 %, а на контроле – 3,63 ± 0,05 %.

Снижение трансформации органического вещества при внесении в почву компоста сопровождалось увеличением содержания общего азота до 30 %. При этом отмечается возрастание в 1,4 раза количества аммонийного азота, который в отличие от нитратного способен удерживаться почвенным поглощающим комплексом. Содержание нитратного азота на контроле и в варианте с навозом КРС оказалось ниже, чем в варианте с компостом (в среднем 10,15 мг/кг).

Таким образом, при совместном использовании в составе компоста навоза КРС и фосфогипса происходит консервация азота в аммонийной форме и за счет снижения процессов денитрификации и инфильтрации снижаются его потери.

При внесении сложного компоста в почву содержание кальция увеличилось в среднем на 50 % по сравнению с контрольным вариантом. Содержание сульфатов в варианте с компостом оказалось в среднем на 30 % выше, чем в контрольном и на 20 % выше, чем на участке с навозом КРС.

Положительное влияние сложного компоста на содержание в почве подвижной серы, доступной растениям, возможно, связано с особенностями входящего в его состав фосфогипса. Баланс запасов подвижной серы между контрольным вариантом и вариантом с компостом, показал, что в среднем разница между ними составляет 0,03 %, или 0,75 т/га. С фосфогипсом, входящим в состав сложного компоста, в верхний слой почвы (0–20 см) попадает 1,5 т/га подвижной серы (из расчета поступления в почву фосфогипса в норме 7 т/га и при содержании серы в фосфогипсе до 30 %). Данная ситуация может быть вызвана сорбцией, выщелачиванием и выносом с урожаем данного элемента из почвы, изменением температуры и влажности [2, 9, 14].

При внесении в почву компоста отмечается изменение реакции ее среды в сторону нейтральной pH. Полученные результаты представляют важность ввиду того, что при pH 6,5–7,5 создаются благоприятные физические условия, активизируется микробиологическая деятельность, формируются оптимальные условия минерального питания растений.

В полевых опытах было установлено влияние компоста в первый год его внесения на рост и развитие сахарной свеклы, а в последействии на озимую пшеницу и кукурузу.

Оценка влияния сложного компоста на развитие растений сахарной свеклы и формирование её корнеплодов проводилась в летний период (середина июля) (таблица 5).

Таблица 5

Влияние компоста на продуктивность растений сахарной свеклы (гибрид «Победа»)

Варианты опыта	Общая масса растения, г	Масса корнеплода, г	Масса ботвы, г	Количество листьев, шт.
Контроль	784,5 ± 31,2	381,5 ± 4,9	403,0 ± 3,1	17,5 ± 0,7
Навоз КРС	884,2 ± 34,5	425,3 ± 8,6	458,9 ± 5,8	17,9 ± 0,7
Компост	1070,0 ± 42,5	563,5 ± 12,1	506,5 ± 7,4	19,8 ± 0,8

Обращает на себя внимание тот факт, что на контроле и в варианте с навозом КРС масса листьев отдельных растений сахарной свеклы превышает и весьма существенно массу корнеплода, тогда как в варианте с

компостом масса корнеплодов, наоборот, заметно превышает массу ботвы.

Средняя масса одного корнеплода на участке с использованием компоста оказалась на 182 г выше, чем на контроле, что сказалось и на продуктивности данной культуры.

Компост, увеличивая агрегирование пахотного слоя почвы, повышает его аэрацию, что способствует нормальному развитию корнеплодов сахарной свеклы и лучшему их товарному виду (таблица 6).

Таблица 6

Влияние компоста на урожайность сахарной свеклы (гибрид «Победа»)

Вариант опыта	Урожайность корнеплодов, т/га	Доля нестандартных корнеплодов, %
Контроль	410,2 ± 15,3	17,1 ± 0,72
Навоз КРС	428,5 ± 17,9	15,3 ± 0,61
Компост	450,5 ± 21,7	5,2 ± 0,17

При внесении компоста доля корнеплодов свеклы нетоварного вида составила всего 5,2 ± 0,17 %, а на контроле до 17,1 ± 0,72 %. Снижение доли нестандартных корнеплодов является важным показателем, который позволяет облегчить уборку урожая и сократить его потери.

Положительное влияние компоста на развитие корнеплодов сахарной свеклы и листовой поверхности сказалось и на урожайности этой культуры. Урожай на участках с использованием сложного компоста составил 450,5±21,7 т/га, существенно превысив контроль и вариант с навозом КРС (таблица 6). Внесение сложного компоста обеспечило повышение урожая корнеплодов в среднем на 10–15 %, что в масштабе хозяйства является очень хорошим показателем [12].

При изучении влияния компоста на рост и развитие озимой пшеницы было установлено, что в варианте с использованием компоста количество побегов в расчете на единицу площади значительно превышало контрольный вариант и составило соответственно 586 и 389 на 1 м^2 (таблица 7).

Таблица 7

Влияние компоста на развитие растений озимой пшеницы (сорт «Фортуна»)

Показатель	Варианты		
	Контроль	Навоз КРС	Компост
Количество побегов/м^2	389 ± 24,12	453 ± 25,75	586 ± 27,85
Колосков в колосе, шт.	18,8 ± 0,33	18,10 ± 0,34	18,15 ± 0,34
Число колосьев/м^2	376 ± 14,15	434 ± 15,54	534 ± 27,67
Масса 1000 семян, г	40,9 ± 0,13	41,23 ± 0,14	42,3 ± 0,16
Продуктивность, г/м^2	578,5 ± 20,34	598,4 ± 21,32	633,0 ± 21,56
Урожайность, ц/га	58,96 ± 2,01	59,87 ± 2,14	65,97 ± 2,89

Масса колосьев также оказалась больше в варианте с компостом и составила 633 г/м^2, а в контрольном – 578,5 г/м^2 (таблица 7). Было отмечено увеличение

массы 1000 зерен в варианте с компостом, что в свою очередь отразилось и на урожайности озимой пшеницы. Так, на контроле урожайность составила 58,96, на участке с навозом КРС – 59,87, а на участке с компостом – 65,97 ц/га. Таким образом, использование сложного компоста под посев озимой пшеницы способствует ее активному кущению и побегообразованию, что выражается в увеличении количества продуктивных побегов на единицу площади и позволяет сократить норму высева семян озимой пшеницы.

В результате проведенных исследований было установлено положительное влияние компоста на рост и развитие кукурузы. При оценке биологической продуктивности кукурузы в варианте с компостом заметно возросли такие показатели, как диаметр початка, его масса и длина, масса зерна в початке (таблица 8).

Таблица 8

Влияние компоста на биологическую продуктивность растений кукурузы (гибрид «Жюксен»)

Вариант опыта	Длина початка, см	Диаметр початка, см	Масса початка, г	Масса зерна в початке, г	Масса 1000 зерен, га	Урожайность, ц/га
Контроль	0,9 ± 0,78	,0 ± 0,21	09,5 ± 7,84	0,4 ± 5,8	17,2 ± 7,3	5,90 ± 3,38
Навоз КРС	1,3 ± 0,78	,1 ± 0,19	23,9 ± 8,67	6,2 ± 6,7	20,4 ± 8,3	8,76 ± 3,87
Компост	3,9 ± 0,76	,5 ± 0,05	70,7 ± 9,75	15,4 ± 8,7	28,3 ± 18,8	2,25 ± 4,03

Изучение влияния сложного компоста на развитие кукурузы и её урожайность показали, что объективно все изученные нами параметры заметно отличаются от контрольного варианта. В опытном варианте доля растений, образовавших два початка, составила всего 9,8 %, а на контроле этот показатель снизился до 1,2 %. Указанные различия в продуктивности сказались на урожайности зерна с гектара: на контрольном участке урожайность кукурузы составила 65,9, а с внесением компоста – 72,25 ц/га.

Заключение

На основании полученных экспериментальных данных для сельскохозяйственных предприятий целесообразно вторичное использование отходов животноводства (навоза КРС) и фосфогипса в виде компоста. Полученный компост рекомендуется вносить в осенний период под основную обработку почвы в дозе 40–60 т/га в зависимости от уровня обеспеченности почвы питательными элементами.

Внесение в почву представленного компоста приводит к снижению плотности до 1,09 г/см^3, увеличению общей пористости на 8 %, повышению водоудерживающей способности (увеличение полной влагоемкости на 23 %). Использование компоста способствует улучшению агрохимических и физико-химических показателей чернозема обыкновенного (повышение содержания общего азота в среднем до 0,31 %, органического вещества до 4,07 %, подвижного фосфора до 32,4 мг/кг, общего кальция до 0,32 %, серы до 0,15 %, нейтрализация pH), под влиянием компоста снижаются процессы денитрификации. При внесении компоста в почву статистически значимо повышается продуктивность и качество сельскохозяйственных растений. Так,

урожайность сахарной свеклы (гибрид «Победа») в первый год внесения компоста увеличилась на 40 т/га. В последействии на участках с внесением компоста отмечено повышение урожайности озимой пшеницы (сорт «Фортуна») на 7 ц/га и кукурузы (гибрид «Жюксен») на 6 ц/га.

При правильном подходе, который в первую очередь должен заключаться в применении эффективных технологий переработки отходов животноводства, они являются ценнейшим сырьем для производства удобрений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антоненко Д. А., Никифоренко Ю. Ю., Мельник О. А. Особенности формирования сложного компоста на основе полуперепревшего навоза КРС и фосфогипса // *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2019. Т. 15. № 4. С. 37-42.

2. Мельник О. А. Содержание органического вещества в черноземе обыкновенном и роль сложного компоста в его поддержании // *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2012. Т. 8. № 3. С. 60-66.

3. Григулецкий В. Г., Ширяев О. В., Ивакин Р. А. Оценка эффективности применения фосфогипса в земледелии // *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2021. Т. 17. № 4. С. 20-28.

4. Семинченко Е. В. Воспроизводство почвенного плодородия - биологизированные севообороты и органические удобрения // *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2019. Т. 15. № 2. С. 10-13.

5. Антоненко Д. А., Никифоренко Ю. Ю., Мельник О. А. Оценка воздействия компоста на экологические свойства чернозема выщелоченного при переходе на органическое земледелие // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2021. № 8. С. 7-12. DOI 10.37882/2223-2966.2021.08.02.

6. Лицкевич А. Н., Гулькович М. В., Чирук Л. И. Производство компостов из осадков сточных вод и других отходов промышленности // *Отходы, причины их образования и перспективы использования*: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / сост. Л. С. Новопольцева; под ред. И. С. Белюченко. Краснодар: КубГАУ, 2019. С. 626-628.

7. Ковалев И. В., Ковалева Н. О. Экологические функции почв и вызовы современности // *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2020. Т. 16. № 2. С. 4-16.

8. Монгуш С. П. Загрязнение окружающей среды (на примере отходов производства и потребления) // *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2019. Т. 15. № 3. С. 31-36.

9. Антоненко Д. А., Никифоренко Ю. Ю., Мельник О. А. Использование сложных компостов на основе отходов в системе органического земледелия // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2019. № 11. С. 7-11.

10. Никифоренко Ю. Ю., Мельник О. А. Использование отходов производства и потребления для создания сложных компостов // *Современные решения в развитии сельскохозяйственной науки и производства*: Международный саммит молодых учёных, Краснодар, 26-30 июля 2016 г. Казань: ИП Синяев Д.Н. 2016. С. 133-136.

11. Теучеж А. А., Никифоренко Ю. Ю. Содержание фосфора в различных сельскохозяйственных культурах // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2017. № 64. С. 139-147. DOI 10.21515/1999-1703-64-139-147.

12. Антоненко Д. А., Мельник О. А., Никифоренко Ю. Ю. Оценка воздействия органоминерального компоста на биопродуктивность агроландшафта // *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2021. Т. 17. № 2. С. 22-27.

13. Титова В. И. О возможности использования в земледелии органосодержащих отходов животноводства с соблюдением экологических и агрономических требований нормативных актов России (обзорная статья) // *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2022. Т. 18. № 3. С. 36-45.

14. Antonenko D. A., Nikiforenko Y. Y., Melnik O. A. et al. Organomineral compost and its effects for the content of heavy metals in the top layer leached chernozem. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022. Vol. 1010, 012028. DOI 10.1088/1755-1315/1010/1/012028.

REFERENCES

1. Antonenko D. A., Nikiforenko Yu. Yu., Melnik O. A. Osobennosti formirovaniya slozhnogo komposta na osnove polupereprevshego navoza KRS i fosfogipsa [Peculiarities of forming complex compost on the basis of half-baked cattle manure and phosphogypsum]. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*. 2019. Vol. 15. No. 4: 37-42 (In Russian)

2. Melnik O. A. Soderzhanie organicheskogo veshchestva v chernozeme obyknovennom i rol' slozhnogo komposta v ego podderzhanii [Content of organic matter in typical chernozem soil and the role of compost complex in its maintenance]. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*. 2012. Vol. 8. No. 3: 60-66 (In Russian)

3. Griguletsky V. G., Shiryaev O. V., Ivakin R. A. Otsenka effektivnosti primeneniya fosfogipsa v zemledelii [Efficiency assessment methodology applications of phosphogypse in agriculture]. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*. 2021. Vol.17. No. 4: 20-28 (In Russian)

4. Seminchenko E. V. Vosproizvodstvo pochvennogo plodorodiya - biologizirovannye sevooboroty i organicheskie udobreniya [Reproduction of soil fertility - biological crop rotation and organic fertilizers]. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*. 2019. Vol. 15. No. 2: 10-13 (In Russian)

5. Antonenko D. A., Nikiforenko Yu. Yu., Mel'nik O. A. Otsenka vozdeistviya komposta na ekologicheskie svoistva chernozema vyshchelochennogo pri perekhode na organicheskoe zemledelie [Assessment of impact of compost on ecological properties of chernozem leached during transition to organic agriculture]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Este-stvennye i tekhnicheskie nauki.* 2021. No. 8: 7-12 (In Russian) DOI 10.37882/2223-2966.2021.08.02.

6. Litskevich A. N., Gulkovich M. V., Chiruk L. I. Proizvodstvo kompostov iz osadkov stochnykh vod i drugikh otkhodov promyshlennosti [Compost production from sewage sludge and other industrial wastes]. *Otkhody, prichiny ikh obrazovaniya i perspektivy ispol'zovaniya* [Waste, causes of their formation and prospects for use]. L. S. Novopoltseva (compiler), I. S. Belyuchenko (ed.). Proc. Int. Ecol. Conf. Krasnodar: KubGAU, 2019: 626-628 (In Russian)

7. Kovalev I. V., Kovaleva N. O. Ekologicheskie funktsii pochv i vyzovy sovremennosti [Ecological functions of soils and new challenges]. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*. 2020. Vol. 16. No. 2: 4-16 (In Russian)

8. Mongush S. P. Zagryaznenie okruzhayushchei sredy (na primere otkhodov proizvodstva i potrebleniya) [Environmental pollution (for example, waste production and consumption)]. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*. 2019. Vol. 15. № 3: 31-36 (In Russian)

9. Antonenko D. A., Nikiforenko Yu. Yu., Mel'nik O. A. Ispol'zovanie slozhnykh kompostov na osnove otkhodov v sisteme organicheskogo zemledeliya [Use of complex compost on the basis of wastes in the system of organic farming]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2019. No. 11: 7-11 (In Russian)

10. Nikiforenko Yu. Yu., Melnik O. A. Ispol'zovanie otkhodov proizvodstva i po-trebleniya dlya sozdaniya slozhnykh kompostov [Using production and consumption waste to create complex composts]. *Sovremennye resheniya v razvitii sel'skokhozyaistvennoi nauki i proizvodstva*: Mezhdunarodnyi sammit molodykh uchenykh [Modern solutions in the development of agricultural science and production: Int. Summit of Young Scientists, Krasnodar, 26-30 July 2016. Kazan: Individual Entrepreneur D. N. Sinyaev. 2016: 133-136 (In Russian)

11. Teuchezh A. A., Nikiforenko Yu. Yu. Soderzhanie fosfora v razlichnykh sel'skokho-zyaistvennykh kul'turakh [Phosphorus content in different crops]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. No. 64: 139-147 (In Russian) DOI 10.21515/1999-1703-64-139-147.

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА

УДК 636.2 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-82-96

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СВИНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

Васильев Э.В. [1], канд. техн. наук Шалавина Е.В. [1], канд. техн. наук

Спесивцев А.В.[2], докт. техн. наук Спесивцев В.А.[1]

[1] Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия.

[2] Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации (СПИИРАН) СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия.

Экологическая устойчивость свиноводческого комплекса – важная составляющая стабильного развития сельской территории. Цель исследования – разработка методики оценивания этого показателя при различном сочетании применяемых технологий и технических средств. Методика была разработана на основе нечетко-возможностного метода как обобщение профессиональных явных и неявных знаний экспертов. Для этого был выполнен анализ системы организации процессов утилизации навоза и соответствующих технологий и выбрано факторное пространство из количественных и качественных переменных, в рамках которого эксперт оценивал эффективность свиноводческих комплексов с точки зрения их воздействия на окружающую среду. Факторное пространство состояло из семи независимых лингвистических переменных: X_1 – поголовье животных, гол; X_2 – степень эффективности технологии переработки навоза, % сохранности питательных веществ от их содержания в исходном навозе; X_3 – степень эффективности использования воды при навозоудалении и уборке помещений, % от нормативного показателя; X_4 – степень эффективности технологии внесения удобрения в почву, % сохранности питательных веществ от их содержания во внесенном удобрении; X_5 – удаленность земельных угодий от свиноводческого комплекса, км; X_6 – уровень технической оснащенности, % от необходимого уровня с учетом расстояний и агротехнических сроков внесения удобрений; X_7 – уровень организации и контроля технологических процессов, б/р. Выходная переменная (Y) – обобщенный показатель экологической устойчивости свиноводческого комплекса в указанном факторном пространстве. Была подготовлена вербально-числовая таблица с описательной характеристикой каждой моды выходной переменной. С использованием нечетко-возможностного метода была синтезирована нечетко-возможностная модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов в количественном выражении, которая позволяет выполнять обоснованное сравнение состояния предприятий в исследуемый момент времени. Полученная модель может быть использована в практических целях для поддержки принятия решений планирования, прогнозирования и выбора сценариев модернизации конкретных сельхозпредприятий. Проведенный анализ показал, что наиболее значимыми факторами в части экологической устойчивости свиноводческих

комплексов являются степень эффективности технологии переработки навоза и степень эффективности технологии внесения удобрения в почву.

Ключевые слова: свиноводческий комплекс, технология, экологическая устойчивость, факторное пространство, нечетко-возможностная модель, явные и неявные экспертные знания.

Для цитирования: Васильев Э.В., Спесивцев А.В., Шалавина Е.В., Спесивцев В.А. Математическая модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов на основе экспертных знаний // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3 (112). С.82 -97

MATHEMATICAL MODEL FOR ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF PIG-REARING COMPLEXES BASED ON EXPERT KNOWLEDGE

E.V. Vasilev[1], Cand. Sc. (Engineering), A.V. Spesivtsev[2], DSc (Engineering), E.V. Shalavina[1], Cand. Sc. (Engineering), V. A. Spesivtsev[1]

[1]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia.

[2]St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences within St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

The environmental sustainability of pig-rearing complexes is a vital component of stable rural development. The study aimed to create a methodology for estimating this indicator under various combinations of applied technologies, machines and equipment. The basis was the fuzzy possibilistic method as a generalization of professional explicit and implicit knowledge of experts. With this aim in view, the study considered the system of organizing the manure disposal processes and related technologies and outlined a factor space with quantitative and qualitative variables, within which an expert assessed the efficiency of pig rearing complexes with regard to their impact on the environment. The factor space consisted of seven independent linguistic variables. Variable X_1 was the number of animals, head. Variable X_2 was the efficiency degree of a manure processing technology in % of nutrients saving from their content in the source manure. Variable X_3 was the degree of water use efficiency during manure removal and premises cleaning,% of the standard indicator. Variable X_4 was the efficiency degree of the fertiliser soil application technology, % of the nutrients saving from their content in the introduced fertilizer. Variable X_5 was the distance between the field and the pig-rearing complex, km. Variable X_6 was the availability level of equipment, % of the required level with due account for transportation distances and agro-technical time limits of fertilizer application. Variable X_7 was the level of organization and control of technological processes, dimensionless. The output variable (Y) was a generalized indicator of the environmental sustainability of the pig-rearing complex in the specified factor space. A verbal and numerical table was prepared with a descriptive characteristic of each mode of the output variable. A fuzzy possibilistic model for assessing the environmental sustainability of pig rearing complexes in quantitative terms was synthesized. It allowed performing a reasonable comparison of the state of agricultural enterprises at the studied point in time. The model can be used for practical purposes to support decision-making in planning, forecasting and choosing scenarios for modernization of

agricultural enterprises. The analysis showed that the most significant factors in terms of the environmental sustainability of pig rearing complexes were the efficiency degree of manure processing and soil fertilisation technologies.

Key words: pig-rearing complex, technology, environmental sustainability, factor space, fuzzy possibilistic model, explicit and implicit expert knowledge

For citation: Vasilev E. V., Spesivtsev A.V., Shalavina E.V., Spesivtsev V. A. Mathematical model for environmental sustainability assessment of pig-rearing complexes based on expert knowledge. *AgroEcoEngineeriya*. 2022. No. 3(112): 82- 97 (In Russian)

Введение

Экологическая устойчивость свиноводческого комплекса – важная составляющая устойчивого развития сельской территории. Под экологической устойчивостью в данном исследовании принимается способность экологической системы сохранять свои свойства и параметры режимов в условиях действующих внутренних и внешних возмущений, в данном случае от свиноводческого комплекса с площадками переработки навоза до земельных угодий для внесения удобрений [1].

Определение состояния экологической устойчивости свиноводческого комплекса невозможно без построения адекватной математической модели количественного влияния нагрузок на экосистему от технологий переработки навоза (атмосферный воздух, почва, водные ресурсы). Решение такой задачи позволит проводить мониторинг и прогнозировать фактические нагрузки на экологическую обстановку местности, превышение которой может привести к негативным последствиям и катастрофе [2-6]. Дополнительно при этом решаются проблемы экологического нормирования, основным содержанием которого является поиск нормы состояния природной экосистемы, нормы воздействия на нее и ответной реакции экосистемы на такие внешние воздействия.

Интенсификация технологий, задействованных в свиноводстве, приводит к возрастающей нагрузке на окружающую среду и возможным рискам загрязнения атмосферного воздуха, почвы и водных объектов [7-10]. Внедрение комплексах высокоэффективных технологий, соответствующих НДТ, позволяет снизить риски загрязнения окружающей среды при сохранении рентабельности комплексов [11-15].

Эксплуатация свиноводческих комплексов, как показывает отечественный и зарубежный опыт, определяется рядом факторов обеспечения благополучия экологической обстановки в районах их расположения, среди которых основные – эффективность применяемых технологий удаления, обработки, хранения и использования органических удобрений. При этом одной из основных задач охраны окружающей среды вблизи предприятий является количественная экологическая оценка воздействия применяемых технологий и техники.

Актуальность исследований заключается в том, что за счет обоснованного сочетания технологий и применяемых технических средств, сохраняется рентабельность предприятия при минимальных рисках загрязнения окружающей среды.

Экологическая устойчивость свиноводческого комплекса заключается, прежде всего, в изучении ее как явления в целом и адекватной количественной оценке этого явления, обобщающей воздействия применяемых технологий и техники. При

этом повышение экологической устойчивости приводит к снижению риска загрязнения окружающей среды.

Цель исследований – разработка на основе нечетко-возможностного метода методики оценивания состояния экологической устойчивости свиноводческого комплекса при различных сочетаниях технологий и технических средств.

Материал и методы

Для разработки методики оценивания экологической устойчивости свиноводческого комплекса применен нечетко-возможностный метод Спесивцева-Дроздова [16], основанный на формализации явных и неявных экспертных знаний в нечетких многомерных пространствах функционирования сложных систем, к которым относятся практически все сельскохозяйственные технологии. Метод достаточно хорошо апробирован, в том числе для решения агроэкологических проблем, а его подробное описание представлено в соответствующих публикациях [16-18].

Методика НВМ включает в себя следующие действия:

- определение факторного пространства (ФП) изучаемого явления. В нашем случае это выбор и обоснование наиболее значимых факторов, влияющих на экологическую устойчивость свиноводческого комплекса;
- определение диапазонов принимаемых значений по каждому фактору. В нашем случае для оценки факторов влияния на экологическую устойчивость принят интервал [-1;+1]. При этом «-1» соответствует низкому воздействию фактора, а «+1» –высокому воздействию переменной на экологическую устойчивость свиноводческого комплекса, как показано на рис.1;
- выбор целевой функции (Y), для которой планируется создать модель, раскрывающую её зависимость от факторных переменных;
- формирование (подготовка) матрицы опроса эксперта, включающей все значимые факторы, оказывающие воздействие на экологическую устойчивость;
- проведение планированного экспертного опроса по разработанной матрице, задающей набор значений всех входных лингвистических переменных и определяющей соответствующую оценку эксперта:
- перевод вербальных экспертных оценок в числовые с использованием соответствующей вербально-числовой таблицы значений шкалы Y и обработка числовой информации методами теории планирования экспериментов;
- оценка значимости коэффициентов в полученной модели;
- проверка адекватности расчетов по полученной модели по мнению эксперта и фактическому состоянию объекта.

Апробацию вышеописанного метода осуществляли на основании исходных данных свиноводческих комплексов Ленинградской области.

В качестве экспертов выступали высококвалифицированные специалисты, имеющие многолетний опыт участия в работе с технологиями в свиноводстве.

Результаты и обсуждение

В соответствии с выбранным методом нечетко-возможностного моделирования был определён целевой показатель Y – обобщенный показатель экологической устойчивости свиноводческого комплекса. В качестве факторного пространства, определяющего экологическую устойчивость свиноводческого комплекса, были выбраны следующие переменные:

X_1 – поголовье животных, гол;

X_2 – степень эффективности технологии переработки навоза, %

сохранности питательных веществ от начальной массы;

X_3 – степень эффективности использования воды при навозоудалении и чистке помещений, % от нормативного;

X_4 – степень эффективности технологии внесения удобрения в почву, % сохранности питательных веществ от начальной массы;

X_5 – удаленность земельных угодий от свиноводческого комплекса, км;

X_6 – уровень технической оснащенности, % от необходимого с учетом расстояний и агротехнических сроков;

X_7 – уровень организации и контроля технологических процессов, безразмерный;

Y – обобщенный показатель состояния экологической устойчивости свиноводческого комплекса.

Выбранное экспертами факторное пространство, как следует из описания переменных, системно учитывает все основные технологии, влияющие на экологическую устойчивость свиноводческих комплексов. Здесь следует отметить также, что каждая из переменных выступает как обобщенная, состоящая из переменных низшего уровня иерархии в расширенном факторном пространстве. Кроме того, при нечетко-возможностном подходе к формализации явных и неявных экспертных знаний количество переменных ограничивается величиной 7±2 по психофизическими возможностям человека [16].

При этом все факторное пространство представляется в виде нечетких лингвистических переменных, как показано на рисунке 1.

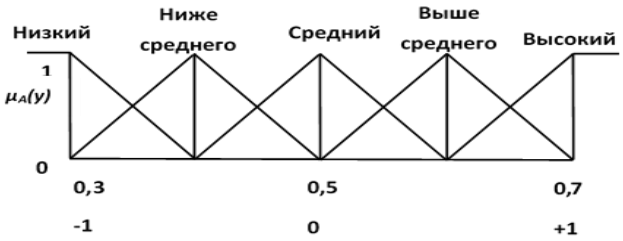

Рис. 1. Общий вид нечеткой лингвистической переменной

По оси абсцисс рисунка 1 размещены фактически три переходные шкалы: вверху – вербальная для удобства использования экспертом, т.к. эксперт думает словами, а не цифрами; внизу – количественные значения переменной (0,3….0,7) и стандартизованная для применения методов теории планирования экспериментов («-1»,…, «+1»); по оси ординат расположены функция принадлежности, в которой только модам вербальных оценок соответствует значение «1». Для унификации представления нечетких лингвистических переменных в таблицах 2-8 количественные шкалы представлены в пределах 0,3-0,7 и даны их числовые переходные характеристики в натуральных физических измерениях.

Лингвистическая форма переменной Y по оси абсцисс содержит только две шкалы, т.к. отсутствует необходимость перевода в стандартизованный масштаб, а в таблице 1 приведены вербальные характеристики Н, …, В состояния экологической устойчивости свиноводческого комплекса, по которым описания переводятся в числовые значения.

Таблица 1

Вербально-числовые отношения при оценивании переменной Y – обобщенный показатель состояния экологической устойчивости свиноводческого комплекса

Интервалы	Моды интервалов риска			Описательная характеристика
0,4 и ниже	Низкая	Н	0,3	Экологически неустойчивый свиноводческий комплекс с риском нанесения вреда окружающей среде более 80%
0,3-0,5	Ниже средней	НС	0,4	Экологически неустойчивый свиноводческий комплекс с риском нанесения вреда окружающей среде более 60%
0,4 – 0,6	Средняя	С	0,5	Свиноводческий комплекс средней экологической устойчивости с риском возникновения локальных случаев нанесения вреда окружающей среде менее 50%
0,5 – 0,7	Выше средней	ВС	0,6	Экологически устойчивый свиноводческий комплекс с минимальными рисками локального нанесения вреда окружающей среде
0,6 и выше	Высокая	В	0,7	Экологически устойчивый свиноводческий комплекс с отсутствием значимых рисков нанесения вреда окружающей среде

В целях обоснованности выбранного факторного пространства рассмотрим более детально каждую из переменных с заданием их описательных характеристик по возрастанию воздействия на обобщенный показатель экологической устойчивости свиноводческого комплекса.

Поголовье животных является одной из важнейших переменных ФП, поскольку ее количественные значения в обобщенном виде отражают и прибыль, и затраты предприятия в целом, в том числе и экологическую устойчивость свиноводческого комплекса.

X_1 – поголовье животных (таблица 2).

Таблица 2

Оценивание состояние свиноводческого комплекса по переменной X_1

Интервалы	Моды интервалов			Описательная характеристика
0,4 и ниже	Низкая	Н	0,3	Поголовье выше 50000 голов
0,3-0,5	Ниже средней	НС	0,4	Поголовье в диапазоне 30000 – 50000 голов
0,4 – 0,6	Средняя	С	0,5	Поголовье в 30000 голов
0,5 – 0,7	Выше средней	ВС	0,6	Поголовье в диапазоне 10000 – 30000 голов
0,6 и выше	Высокая	В	0,7	Поголовье ниже 10000 голов

X_2 – Степень эффективности технологии переработки навоза (таблица 3).

Таблица 3

Оценивание состояния свиноводческого комплекса по входной переменной X_2

Интервалы	Моды интервалов			Описательная характеристика
0,4 и ниже	Низкая	Н	0,3	Отсутствие интенсивных низкоэмиссионных технологий переработки (применяется только компостирование и/или длительное выдерживание). Вместимости хранилищ и площадок достаточно только для переработки навоза.
0,4 – 0,6	Средняя	С	0,5	Применение интенсивных низкоэмиссионных технологий переработки (ферментация в установках открытого и закрытого типа, закрытые хранилища). Вместимости хранилищ и площадок достаточно для переработки навоза и накопления конечных продуктов перед использованием.
0,6 и выше	Высокая	В	0,7	Применение интенсивных низкоэмиссионных технологий переработки (глубокая переработка, анаэробное сбраживание, ректификация). Вместимости хранилищ и площадок достаточно для переработки навоза и накопления конечных продуктов перед использованием.

X_3 – Степень эффективности использования воды при навозоудалении и чистке помещений (таблица 4).

Таблица 4

Оценивание состояния свиноводческого комплекса по входной переменной X_3

Интервалы	Моды интервалов			Описательная характеристика
0,4 и ниже	Низкая	Н	0,3	Использование чистой воды, отсутствие установок высокого давления.
0,4 – 0,6	Средняя	С	0,5	Использование чистой воды, использование установок высокого давления
0,6 и выше	Высокая	В	0,7	Повторное использование оборотной воды, полученной после глубокой переработки навоза, использование установок высокого давления.

X_4 – Степень эффективности технологии внесения удобрения в почву (таблица 5).

Таблица 5

Оценивание состояния свиноводческого комплекса по входной переменной X_4

Интервалы	Моды интервалов			Описательная характеристика
0,4 и ниже	Низкая	Н	0,3	Поверхностное внесение без заделки в почву
0,4 – 0,6	Средняя	С	0,5	Поверхностное внесение и заделка в течение 24 часов после внесения
0,6 и выше	Высокая	В	0,7	Внутрипочвенное внесение удобрения. Внесение и одновременная заделка удобрения

X_5 – Удаленность земельных угодий от свиноводческого комплекса (таблица 6).

Таблица 6 – Оценивание состояния свиноводческого комплекса по входной переменной X_5

Интервалы	Моды интервалов			Описательная характеристика
0,4 и ниже	Низкая	Н	0,3	Все земельные угодья расположены за пределами рентабельного радиуса транспортировки. Отсутствие рентабельности, затраты на транспортировку не покрываются прибылью предприятия
0,4 – 0,6	Средняя	С	0,5	Земельные угодья расположены как в рентабельном радиусе транспортировки, так и за его пределами. Нулевая рентабельность, затраты на транспортировку сопоставимы с прибылью предприятия
0,6 и выше	Высокая	В	0,7	Все земельные угодья расположены в пределах рентабельного радиуса транспортировки. Положительная рентабельность, затраты на транспортировку полностью покрываются прибылью предприятия

X_6 – Уровень технической оснащенности (таблица 7).

Таблица 7

Оценивание состояния свиноводческого комплекса по входной переменной X_6

Интервалы	Моды интервалов			Описательная характеристика
0,4 и ниже	Низкая	Н	0,3	Технические средства обеспечивают только своевременную транспортировку навоза к месту его переработки в удобрение, недостаточно технических средств для переработки всего навоза и внесения его в соответствии с агротехническими сроками
0,4 – 0,6	Средняя	С	0,5	Технические средства обеспечивают своевременную транспортировку навоза к месту его переработки в удобрение и частичную переработку навоза в ОУ. Недостаточно технических средств для внесения ОУ в соответствии с агротехническими сроками
0,6 и выше	Высокая	В	0,7	Полная обеспеченность техническими средствами для работ в установленные агротехнические и сроки

X_7 – Уровень организации и контроля технологических процессов (таблица 8).

Таблица 8

Оценивание состояния свиноводческого комплекса по входной переменной X_7

Интервалы	Моды интервалов			Описательная характеристика
0,4 и ниже	Низкая	Н	0,3	Отсутствие учета объемов образования, технологии переработки, накопления и внесения
0,4 – 0,6	Средняя	С	0,5	Учет объемов образования, технологии переработки, накопления и внесения без системы

				контрольно-измерительных и фиксирующих инструментов
0,6 и выше	Высокая	В	0,7	Учет объемов образования, технологии переработки, накопления и внесения с применением системы контрольно-измерительных и фиксирующих инструментов

Согласно разработанной методике создается опросная матрица (таблица 9), где каждая строка представляет ситуацию состояния экологической устойчивости свиноводческого комплекса для оценивания экспертом с учетом значений вербально-числовой таблицы 1.

Таблица 9

Фрагмент опросной матрицы с оценками эксперта и расчетными значениями по модели

	Поголовье животных	Степень эффективности технологии переработки навоза	Степень эффективности использования воды при навозоудалении и чистке помещений	Степень эффективности технологии внесения удобрения в почву	Удаленность земельных угодий от свиноводческого комплекса	Уровень технической оснащенности	Уровень организации и контроля технологических процессов	Обобщенный показатель экологической устойчивости свиноводческого комплекса		
№	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	$Y_э$	$Y_р$	Y
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	н	0,3	0,30
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	н-нс	0,35	0,33
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	нс-с	0,45	0,36
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	с	0,5	0,44
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
62	1	-1	1	1	1	1	-1	вс	0,6	0,60
63	-1	1	1	1	1	1	-1	вс-в	0,65	0,61
64	1	1	1	1	1	1	1	в	0,7	0,69

Все столбцы матрицы x_1-x_7 заполнены стандартизованными (кодированными) значениями «-1» и «+1», соответствующим минимальным и максимальным значениям факторных переменных [16-18]. Эксперты заполнили матрицу лингвистическими оценками $Y_э$, после чего они были переведены в численную форму $Y_р$ по таблице 1.

Обработка экспертной информации в количественном виде методами теории планирования экспериментов привело к модели:

$$Y = 0{,}51094 + 0{,}02813x1 + 0{,}05313x2 + 0{,}04063x3 + 0{,}04531x4 + 0{,}04063x5 + 0{,}01875x6 + 0{,}0125x7 - 0{,}01719x2x3 - 0{,}03125x4x5 + 0{,}01094x1x4x7 - 0{,}0125x2x3x5 - 0{,}01406x3x4x5 \quad 1)$$

Остаточное среднее квадратическое отклонение как ошибка вычисления

($s_{ост}$ = 0,03 < 0,05 = $s_Э$) ниже, чем исходная нечеткость оценки эксперта, т.е. точность вычисления по модели выше, чем исходная нечеткость экспертного оценивания в каждой ситуации (строке) матрицы 9.

Адекватность расчетов по модели экспертным оценкам была подтверждена с помощью коэффициента детерминации (R^2). Было установлено, что 96,6% общей вариабельности Y объясняется изменением факторов X_1-X_7. Это переводит модель (1) в разряд статистически значимых и позволяет использовать ее вместо экспертного мнения по данной тематике.

Анализ модели (1) позволяет с большой доверительной вероятностью утверждать, что наиболее значимыми факторами, в части экологической устойчивости свиноводческих комплексов, являются фактор X_2 – степень эффективности технологии переработки навоза, весовой коэффициент которого составляет 0,53, и X_4 – степень эффективности технологии внесения удобрения в почву, весовой коэффициент которого составляет 0,45.

Наличие адекватной модели позволяет провести численный эксперимент и получить дополнительную информацию об особенностях поведения переменных в различных состояниях функционирования свиноводческих комплексов. Так, определена значимость каждого из входных факторов при разных условиях (рис. 2 и 3).

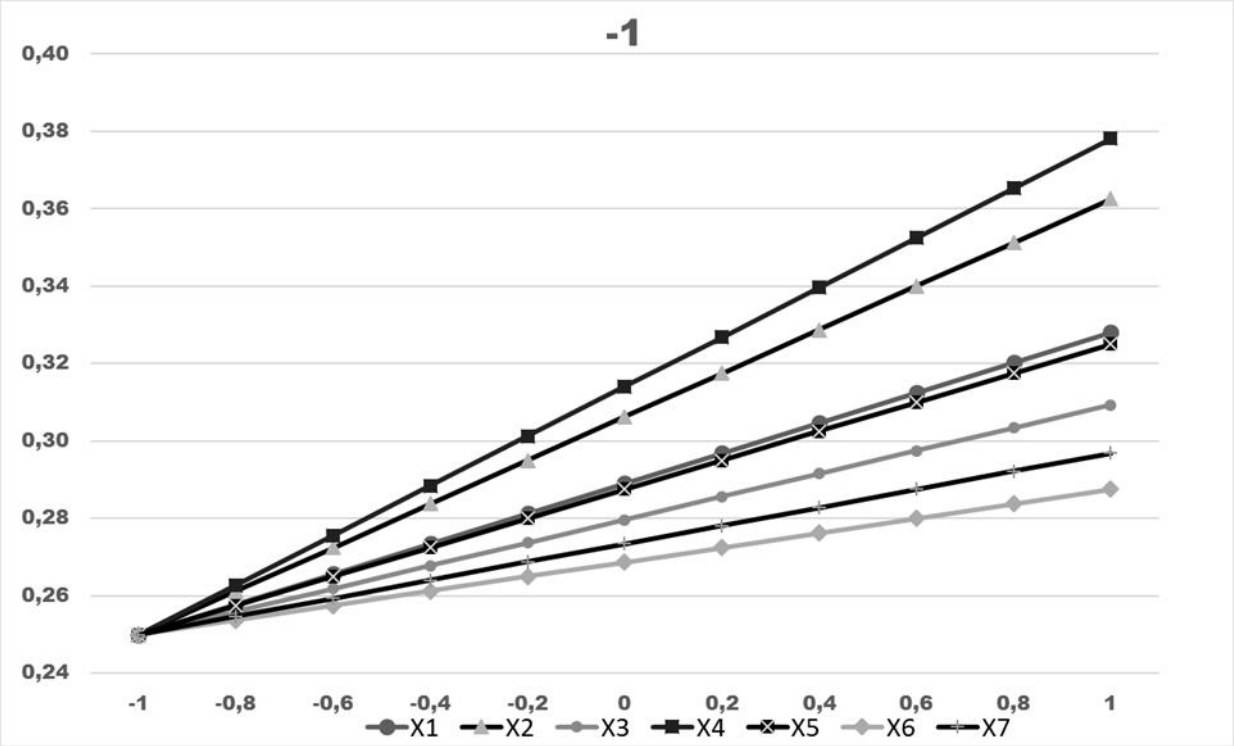

Рис. 2. Результаты численного эксперимента по оцениваемому состоянию свиноводческого комплекса, когда все переменные на низком «-1» уровне

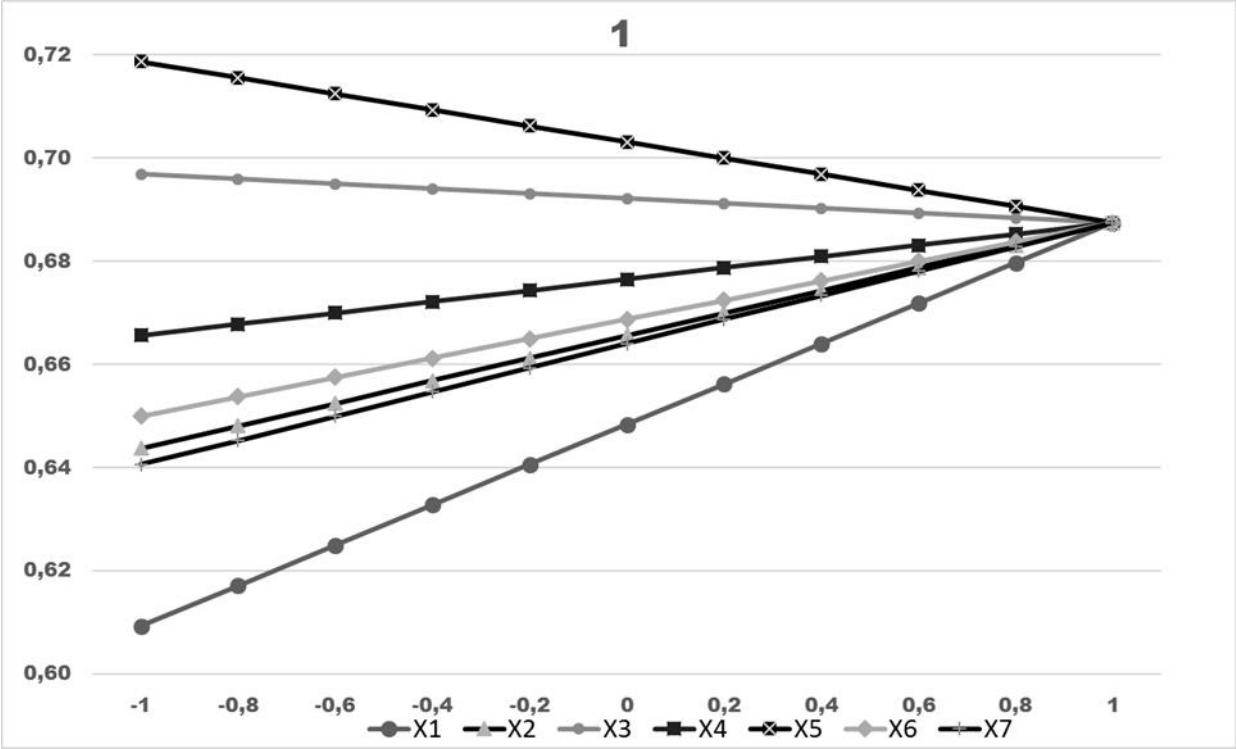

Рис. 3. Результаты численного эксперимента по оцениваемому состоянию свиноводческого комплекса, когда все переменные на высоком «+1» уровне

По углу наклона графиков можно судить о силе влияния исследуемого фактора на зависимую переменную в присутствии влияния остальных. Так из графиков (рисунок 2, рисунок 3) можно сделать вывод о значимости переменных в хозяйствах разных уровней. В хозяйстве с низкой экологической устойчивостью (рис.2) наиболее важными являются степень эффективности технологии внесения удобрения в почву (X_4), затем степень эффективности технологии переработки навоза (X_2). В хозяйстве с высокой экологической устойчивостью (рис.3) наиболее важным является поголовье животных (X_1).

Проведенный численный эксперимент представляет два крайних состояний функционирования свиноводческого комплекса:

– в неблагоприятном случае (рисунок 2), когда все значения переменных находятся на нижних уровнях, экологическая устойчивость оценивается как «низкая» и даже существенное уменьшение поголовья свиноводческого комплекса (x_1 = +1) способно повысить устойчивость только до значения 0,32, что по оценке шкалы таблицы 1 соответствует уровню моды «низкая». Другими словами, необходимо переводить технологию всего комплекса на более высокий уровень;

– в благоприятном случае (рисунок 3), когда уровень экологической устойчивости «высокий», даже существенное увеличение поголовья свиноводческого комплекса (x_1 = -1) при всех благоприятных значениях переменных способно понизить устойчивость с уровня «высокая» до «средняя – выше средней». В то же время повышение удаленности земельных угодий от свиноводческого комплекса (x_5 = -1) практически не изменяет уровень комплекса, т.к. наблюдаемое поведение графика этой переменной находится в пределах первоначальной нечеткости оценок эксперта.

На основании даже такого краткого анализа можно сделать вывод о существовании максимально поголовья животных, когда экологическая устойчивость свиноводческого комплекса находится в

допустимых границах. В таком случае определяющими, на наш взгляд, выступают уже экономические факторы и требуется применение методов эколого-экономического анализа, что выходит за рамки данного исследования.

Выводы

1. На базе нечетко-возможностного подхода разработана методика построения математической модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов в семифакторном пространстве лингвистических переменных на основе явных и неявных экспертных знаний. Особенностью методики является введение понятия «обобщенный показатель экологической устойчивости свиноводческого комплекса» как характеристики уровня экологической безопасности воздействия на природу. Принятый безразмерный масштаб этого показателя в интервале [0,3, …, 07] отражает величину субъективной вероятности состояния экологической устойчивости свиноводческих комплексов в условиях существенной неопределенности на основе знаний и опыта высококвалифицированных специалистов-экспертов в данной предметной отрасли.

2. На базе нечетко-возможностного подхода к формализации явных и неявных экспертных знаний о состоянии нечетких многомерных сложных системах, к которым относятся практически все сельскохозяйственные технологии и производства, разработана методика построения нелинейной нечетко-возможностной модели оценивания экологической устойчивости свиноводческих комплексов в семифакторном пространстве лингвистических переменных. С одной стороны, это подтверждает функционирование свиноводческого комплекса как сложной системы, а с другой, – свидетельствует о высокой квалификации привлекаемых экспертов к данному исследованию

3. При анализе технологий и систем организации процессов переработки навоза свиноводческого комплекса, а также построения модели количественной оценки его экологической устойчивости изучено действие семи основных переменных, системно представляющих изучаемое явление: поголовье животных, степень эффективности технологии переработки навоза, степень эффективности использования воды при навозоудалении и чистке помещений, степень эффективности технологии внесения удобрения в почву, удаленность земельных угодий от свиноводческого комплекса, уровень технической оснащенности, уровень организации и контроля технологических процессов.

4. На основе анализа синтезированной адекватной нечетко-возможностной модели показано, что наиболее значимыми из семифакторного пространства в части воздействия на экологическую устойчивость свиноводческих комплексов являются переменные, представляющие все основные технологии (весовые коэффициенты от 0,053 до 0,041). При этом следует отметить, что коэффициенты модели, в отличие от обычных статистических регрессий, отражают явные и неявные знания высококвалифицированных специалистов-экспертов.

5. Синтезированная нечетко-возможностная модель позволяет, таким образом: проводить мониторинг и оценивать текущую экологическую устойчивость свиноводческих комплексов в любой момент времени; прогнозировать сценарии экологической устойчивости свиноводческого комплекса в зависимости от изменения технологических и управленческих решений; выбирать более эффективные пути повышения экологической устойчивости путём манипулирования значениями наиболее

значимых факторов. Так, численными экспериментами по модели установлено, что влияние переменных в одном и том же факторном пространстве меняется в зависимости от уровня применяемых технологий свинокомплекса в целом и при «низком» общем уровне функционирования комплекса его экологическую устойчивость не удается повысить изменением одной даже самой существенной переменной – поголовьем животных.

6. Разработанная методика на основе нечетко-возможностного подхода обладает универсальностью и применима для других сельскохозяйственных процессов при соответствующем учете их специфических особенностей.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Брюханов А.Ю. Показатели экологической устойчивости сельских территорий при интенсивном производстве животноводческой продукции // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 2 (95). С. 159-167.
2. Иванов Ю.А., Миронов В.В. Экологические проблемы современного животноводства // *Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства.* 2015. № 8. С. 9-13.
3. Nguyen T., Hermansen J., Mogensen L. Fossil energy and GHG saving potentials of pig farming in the EU. *Energy Policy*. 2010, vol. 38, pp. 2561-2571 doi: 10.1016/j.enpol.2009.12.051
4. Younghoon Kwak, Hakjong Shin, Minho Kang, Sun-Hye Mun, Seng-Kyoun Jo, Se-Han Kim, Jung-Ho Huh. Energy modeling of pig houses: A South Korean feasibility study, *Energy Strateg Rev*, 2021, vol. 36, 100672, doi: 10.1016/j.esr.2021.100672.
5. Малахов В.М., Гриценко А.Г., Дружинин С.В. Инженерная экология: монография в 3-х томах. Том 3. Новосибирск: СГГА, 2012. 214 с.
6. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Уваров Р.А. Логистическая модель управления вторичными ресурсами в АПК // *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2017. № 4. С. 38-41.
7. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Уваров Р.А., Субботин И.А. Метод решения экологических проблем при обращении с навозом и помётом // *Молочнохозяйственный вестник*. 2017. № 3 (27). С. 84-96.
8. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Уваров Р.А. Методы решения экологических проблем в животноводстве и птицеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2019. Т. 13. № 4. С. 32-37.
9. Makara A., Kowalski Z., Lelek Ł., Kulczycka J. Comparative analyses of pig farming management systems using the Life Cycle Assessment method. *J. Cleaner Prod*. 2019, vol. 241, 118305. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118305
10. Won S., You B., Shim S., Ahmed N., Choi Y. Ra C. Nutrient variations from swine manure to agricultural land. *Anim Biosci*. 2018, vol. 31 (5), pp. 763-772. doi:10.5713/ajas.17.0634
11. Брюханов А.Ю., Трифанов А.В., Спесивцев А.В., Субботин И.А. Логико-лингвистическое моделирование для решения агроэкологических проблем / В сб.: *Доклады XIX*

Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2016). Санкт-Петербург, 2016. С. 236-239.
12. Калюга В.В., Найденко В.К., Трифанов А.В. Выбор эффективных технологических технологий при реконструкции и строительстве новых свиноферм различной мощности // *Научные труды ВИМ*. 2002. Т. 142. Часть 1. С. 148-156.
13. Трифанов А.В., Калюга В.В., Базыкин В.И. Состояние и тенденции развития производства свинины в Российской Федерации // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2016. № 90. С. 5-14.
14. Groenestein C.M., Valli L., Piñeiro Noguera C., Menzi H., Bonazzi G., Döhler H., Van der Hoek K., Aarnink A.J.A., Oenema O., Kozlova N., Kuczynski T., Klimont Z., Montalvo Bermejo G. Livestock housing. In: *Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen*. Edinburgh, UK: Centre for Ecology and Hydrology. 2014, pp. 14-25.
15. Hauschild M., Wenzel H. (eds.) Environmental Assessment of Products. London: Chapman & Hall, 1998. Vol. 2, 565 p.
16. Спесивцев А.В. Формализация и использование явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния сложных объектов. Дис … доктор техн.наук. СПб: СПИИРАН. 2019. 357 с.
17. Спесивцев А.В., Домшенко Н.Г. Эксперт как «интеллектуальная измерительно-диагностическая система» / В сб.: *Доклады XIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM)*, 23-25 июля 2010, Санкт-Петербург. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. Т.2. С.28-34.
18. Игнатьев М.Б., Марлей В.Е., Михайлов В.В., Спесивцев А.В. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний // СПб: ПОЛИТЕХ-ЭКСПРЕСС, 2018. 430 с.

REFERENCES

1. Vasilev E.V., Shalavina E.V., Briukhanov A.Yu. Pokazateli ekologicheskoi ustoichivosti sel'skikh territorii pri intensivnom proizvodstve zhivotnovodcheskoi produktsii [Indicators of ecological sustainability of rural areas with intensive livestock production]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. No. 2 (95): 159-167 (In Russian)
2. Ivanov Yu.A., Mironov V.V. Ekologicheskie problemy sovremennogo zhivotnovodstva [Ecological issues of modern animal agriculture]. *Problemy mekhanizatsii agrokhimicheskogo obsluzhivaniya sel'skogo khozyaistva*. 2015. No. 8: 9-13 (In Russian)
3. Nguyen T., Hermansen J., Mogensen L. Fossil energy and GHG saving potentials of pig farming in the EU. *Energy Policy*. 2010, 38: 2561–2571 doi: 10.1016/j.enpol.2009.12.051
4. Younghoon Kwak, Hakjong Shin, Minho Kang, Sun-Hye Mun, Seng-Kyoun Jo, Se-Han Kim, Jung-Ho Huh. Energy modeling of pig houses: A South Korean feasibility study, *Energy Strateg Rev*, 2021, 36: 100672, doi: 10.1016/j.esr.2021.100672.
5. Malakhov V.M., Gritsenko A.G., Druzhinin S.V. Inzhenernaya ekologiya: monografiya v 3-kh tomakh [Engineering ecology: monograph in 3 volumes]. Novosibirsk: SGGA, 2012. Vol. 3. 214 p. (In Russian)
6. Bryukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Uvarov R.A. Logisticheskaya model' upravleniya vtorichnymi resursami v APK [Logistics model of secondary resources management in agriculture

(on example of the Leningrad Region)]. *Ekonomika sel'skokhozyaistvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatii*. 2017. No. 4: 38-41 (In Russian)
7. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A., Subbotin I.A. Metod resheniya ekologicheskikh problem pri obrashchenii s navozom i pometom // Molochnokhozyaistvennyi vestnik. 2017. No. 3 (27): 84-96 (In Russian)
8. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A. Metody resheniya ekologicheskikh problem v zhivotnovodstve i ptitsevodstve // Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii. 2019. T. 13. No. 4: 32-37 (In Russian)
9. Makara A., Kowalski Z., Lelek Ł., Kulczycka J. Comparative analyses of pig farming management systems using the Life Cycle Assessment method. *J. Cleaner Prod*. 2019, vol. 241: 118305. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118305
10. Won S., You B., Shim S., Ahmed N., Choi Y. Ra C. Nutrient variations from swine manure to agricultural land. *Anim Biosci*. 2018, vol. 31 (5): 763-772. doi:10.5713/ajas.17.0634
11. Bryukhanov A.Yu., Trifanov A.V., Spesivtsev A.V., Subbotin I.A. Logiko-lingvisticheskoe modelirovanie dlya resheniya agroekologicheskikh problem [Logical-linguistic modelling for solving agroecological problems]. In: *Proc. XIX Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM-2016)*. Saint Petersburg, 2016: 236-239 (In Russian)
12. Kalyuga V.V., Naidenko V.K., Trifanov A.V. Vybor effektivnykh tekhnologicheskikh tekhnologii pri rekonstruktsii i stroitel'stve novykh svinoferm razlichnoi moshchnosti [The choice of effective technologies in the reconstruction and construction of new pig farms of various capacities]. Nauchnye trudy VIM. 2002. Vol. 142. Part 1: 148-156 (In Russian)
13. Trifanov A.V., Kalyuga V.V., Bazykin V.I. Sostoyanie i tendentsii razvitiya proizvodstva svininy v Rossiiskoi Federatsii [Current state and trends of pork production in the Russian Federation]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016. No. 90: 5-14 (In Russian)
14. Groenestein C.M., Valli L., Piñeiro Noguera C., Menzi H., Bonazzi G., Döhler H., Van der Hoek K., Aarnink A.J.A., Oenema O., Kozlova N., Kuczynski T., Klimont Z., Montalvo Bermejo G. Livestock housing. In: *Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen*. Edinburgh, UK: Centre for Ecology and Hydrology. 2014: 14-25.

15. Hauschild M., Wenzel H. (eds.) Environmental Assessment of Products. London: Chapman & Hall, 1998, vol. 2, 565 p.
16. Spesivtsev A.V. Formalizatsiya i ispol'zovanie yavnykh i neyavnykh ekspertnykh znanii dlya otsenivaniya sostoyaniya slozhnykh ob"ektov [Formalization and use of explicit and implicit expert knowledge for estimating the state of complex objects]. Dis … DSc (Engineering). Saint Petersburg: SPIIRAN. 2019. 357 p. (In Russian)
17. Spesivtsev A.V., Domshenko N.G. Ekspert kak “intellektual'naya izmeritel'no-diagnosticheskaya sistema” [An expert as an "intelligent measuring and diagnostic system"]. In: *Proc. XIII Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 23-25 July 2010, Saint Petersburg. Saint Petersburg: SPbGETU “LETI”, 2010. Vol. 2: 28-34 (In Russian)
18. Ignatev M.B., Marlei V.E., Mikhailov V.V., Spesivtsev A.V. Modelirovanie slabo formalizovannykh sistem na osnove yavnykh i neyavnykh ekspertnykh znanii [Modeling of weakly formalized systems based on explicit and implicit expert knowledge]. Saint Petersburg: POLITEKh-EKSPRESS, 2018. 430 p. (In Russian)

УДК 636.2 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-97-108

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ РЕЦИКЛИНГА ЖИДКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

Васильев Э.В., канд. техн. наук Шалавина Е.В., канд. техн. наук

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

Цель исследования – разработка методики формирования технологий переработки и рециклинга жидких органических отходов животноводства с учетом эколого-экономических критериев оценки. Объектом исследования были сочетания соответствующих технологических операций. При моделировании учитывались методы сбора исходных данных свиноводческого комплекса; методы расчета количественных и качественных характеристик навоза; методы анализа применимости технологий в зависимости от внешних условий; методы расчета отдельных технологических операций при работе с навозом; методы расчета количественных и качественных характеристик конечных продуктов; методы оценки возможности использования конечных продуктов; методы оценки состояния агроэкосистемы. Для комплексной оценки технологий применялись разработанные критерии: критерий W_w, выражающий более эффективное использование воды при функционировании свиноводческого комплекса; критерий E_m, выражающий количественный и стоимостной показатель эмиссий в атмосферный воздух в интенсивном свиноводстве; критерий K_{NP}, выражающий полученную массу питательных веществ в конечном продукте с учетом затрат на его переработку, транспортировку и внесение. Разработанная методика позволяет формировать технологии рециклинга с учетом производственных особенностей животноводческого комплекса. При этом отслеживаются количественные и качественные характеристики сырья на каждой технологической операции, повышается эффективность переработки навоза в конечные продукты и обеспечивается вторичное использование ресурсов (воды).

Ключевые слова: методика, формирование технологий, переработка навоза, рециклинг, ресурсосбережение, экология

Для цитирования: Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Методика формирования технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3 (112). С.97-109

APPROACH TO DEVELOPMENT OF RECYCLING TECHNOLOGIES FOR LIQUID ORGANIC WASTE GENERATED IN ANIMAL HUSBANDRY

E.V. Vasilev, Cand. Sc. (Engineering), E.V. Shalavina, Cand. Sc. (Engineering)

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia.

The study purpose was to develop a methodology for forming the processing and recycling technologies of liquid organic waste generated in animal husbandry. The study object was the combinations of relevant technological operations. The study took into account environmental and economic evaluation criteria. The modelling applied the methods for different work steps. These steps were to collect the initial data on a pig-rearing complex; to calculate the manure quantity and quality; to assess the applicability of technologies in different external conditions; to calculate the individual manure handling operations; to calculate the end product quantity and quality; to assess the applicability of end products; and to assess the status of the agroecosystem. The comprehensive assessment of technologies made use of the following developed criteria: W_w criterion of a more efficient use of water on the pig-rearing complex; E_m criterion of the quantitative and cost indicator of emissions into the atmospheric air in intensive pig farming; and K_{NP} criterion of the obtained nutrient mass in the end product with due account for processing, transportation and application costs. The designed methodology allows forming the recycling technologies taking into account the production features of the livestock complex. At the same time, it monitors the quantity and quality of source materials in each technological operation; improves the efficiency of manure processing into the end products; and ensures the secondary use of resources (water).

Key words: methods, technology development, manure processing, recycling, resources saving, ecology

For citation: Vasilev E. V., Shalavina E.V. Approach to development of recycling technologies for liquid organic waste generated in animal husbandry. *AgroEcoEngineeriya*. 2022. No. 3(112): 97-109 (In Russian)

Введение

Интенсификация отрасли свиноводства увеличивает прибыльность хозяйств, но также ведет к увеличению локальной нагрузки на окружающую среду.

Анализ показал, что почти все свиноводческие комплексы в России, особенно крупные и интенсивные, требуют оптимизации своей работы с точки зрения экономической рентабельности и минимального воздействия на окружающую среду [1, 2].

Питательные вещества в свином навозе (общий азот и фосфор) считаются, с одной стороны, основным источником загрязнения окружающей среды, а с другой стороны, они поддерживают плодородие почв. В настоящее время у 47% свиноводческих хозяйств страны нет ни земли для внесения всех произведенных органических удобрений, ни каких-либо договоренностей с растениеводческими хозяйствами о внесении удобрений на их земельные угодья сельскохозяйственного назначения. В этом контексте необходимо принимать решения о перераспределении органических удобрений между хозяйствами на районном или региональном уровне. Для достижения минимальных потерь питательных веществ, минимизации эмиссий в атмосферу, снижения диффузной нагрузки и достижения экономической эффективности предприятия в целом требуется разработка методики формирования технологий для наиболее эффективной переработки навоза.

Исследователи из разных стран предлагают свои решения проблемы, как сделать интенсивное свиноводство более экологически безопасным. Эти решения включают разные методы, среди прочего, систему управления питательными веществами навоза, основанную на методе баланса массы [3], энергосберегающие

подходы и интеллектуальные технологии, которые обеспечат автоматизированный мониторинг процессов, анализ данных, а также принятие технологических и управленческих решений [4]. Оценка жизненного цикла - инструмент, широко используемый для оценки экологических показателей таких интегрированных систем, как крупные свиноводческие комплексы.

Для точного учета питательных веществ применяются методы расчета количественных и качественных характеристик свиного навоза, органических удобрений на его основе и других побочных продуктов [5, 6, 7, 8].

Технологии по переработке свиного навоза выбираются исходя из технических и земельных ресурсов свиноводческого комплекса и исходных требований к конечной продукции.

Разрабатываемая методика формирования технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства будет включать:

- методы расчета количества и качества исходного навоза и конечных продуктов;
- вычислительный анализ различных технологических операций для преобразования навоза в конечные продукты;
- моделирование распределения массы и питательных веществ;
- моделирование вторичного использования очищенного навоза в качестве технической воды на комплексе;
- оценку соответствующих затрат при учете минимизации эмиссий и диффузной нагрузки[7].

Одним из способов оптимизации потока питательных веществ свиного навоза является разделение его на твердую и жидкую фракции [9, 10, 11] и дальнейшую их индивидуальную обработку для получения конечных продуктов, в том числе высококачественных органических удобрений. Исследователи отмечают, что методы первичного разделения свиного навоза на фракции сильно влияют на усвоение растениями питательных веществ, поступающих с органическими удобрениями [12].

Органические удобрения, полученные из свиного навоза, следует вносить в почву с наименьшими потерями [13], чтобы обеспечить повышение плодородия почвы и получение целевых урожаев.

Объектом исследования являются сочетания технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства.

Цель исследований – разработка методики формирования технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства с учетом эколого-экономических критериев оценки.

Разработанная методика позволяет формировать технологии при отслеживании количественных и качественных характеристик сырья на каждой технологической операции. Методика позволит повысить эффективность переработки навоза в конечные продукты, при этом обеспечив вторичное использование ресурсов (воды).

Материал и методы

Проанализированы технологии переработки жидкого навоза в конечные продукты [14]. На рисунке 1 приведены обобщенные технологические операции. Такие технологические операции, как транспортировка, загрузка, выгрузка и пр., входят в состав технологических операций, отраженных на рисунке 1. В результате

[7] Groenestein, C.M.; Valli, L.; Piñeiro Noguera, C.; Menzi, H.; Bonazzi, G.; Döhler, H.; van der Hoek, K.; Aarnink, A.J.A.; Oenema, O.; Kozlova, N.; Kuczynski, T.; Klimont, Z.; Montalvo Bermejo, G. Livestock housing. In: Bittman, S., Dedina, M., Howard C.M., Oenema, O., Sutton, M.A. (eds). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Centre for Ecology and Hydrology: Edinburgh, UK. 2014; pp. 14–25.

обосновано 17 технологических операций, сочетание которых позволяет сформировать 209 технологий переработки жидкого навоза животноводства.

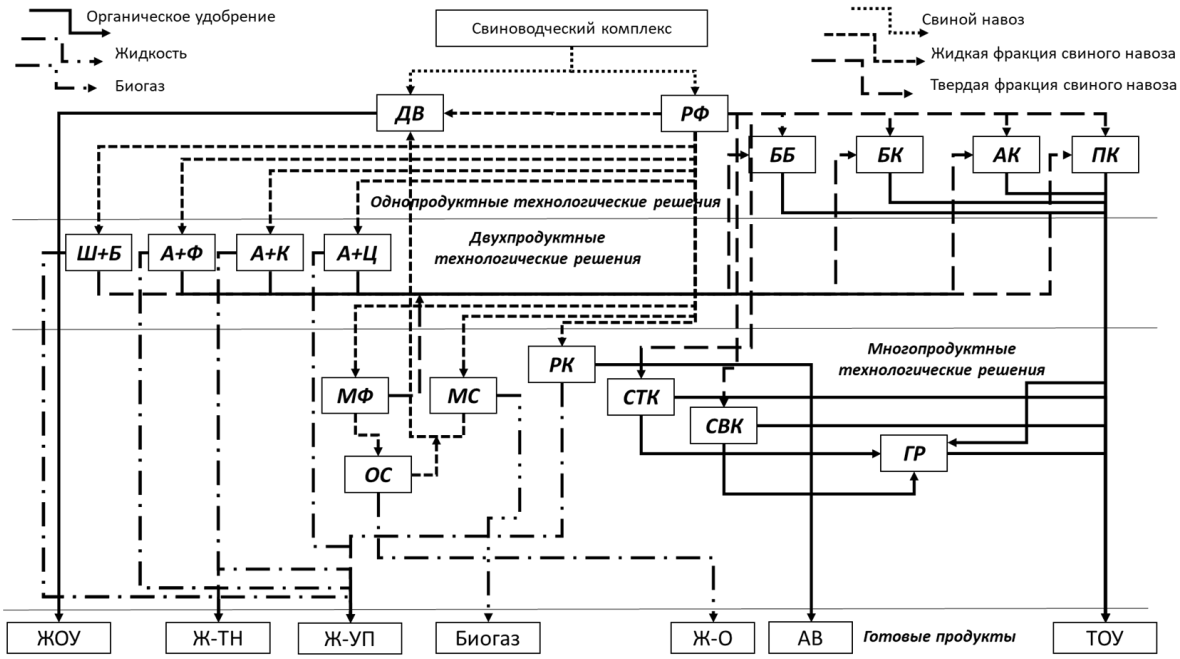

Рис. 1. Варианты технологий как сочетания технологических операций

ДВ – Длительное выдерживание; РФ – Разделение на фракции; Ш+Б – Шандорные отстойники и биологические пруды; А+Ф – Аэрационные установки и флокуляция; А+К – Аэрационные установки и коагуляция; А+Ц – Аэрационные установки и циклические отстойники; ББ – Биоферментатор барабанный; БК – Биоферментатор камерный; ПК – Пассивное компостирование; АК – Активное компостирование; МФ – Мембранная фильтрация; МС – Метановое сбраживание; РК – Выпаривание аммиака на ректификационной колонне; ОС – Обратный осмос; СТК – Сушка в термической камере; СВК – Сушка в вакуумной камере; ГР – Грануляция; ЖОУ – Жидкое органическое удобрение; Ж-ТН – Жидкость, пригодная для использования в качестве технической воды; Ж-УП – Жидкость, пригодная для использования в качестве подкормки кормовых культур; Ж-О – Очищенная жидкость, пригодная для сброса в открытые водоемы; ТОУ – Твердое органическое удобрение; АВ – аммиачная вода.

По типу получаемой продукции предложено разделить все технологии на 3 типа: однопродуктные, двухпродуктные и многопродуктные технологии. Определены целевые функции при получении конечных продуктов из исходного сырья – навоза для каждого вида технологий. Выходом однопродуктных технологий являются органические удобрения, цель производства которых – максимальное сохранение питательных веществ (минимальные потери питательных веществ).

Результатом двухпродуктных технологий является органическое удобрение (твердое или жидкое) и вода, которую можно использовать для подкормки растений или технологических нужд. После дополнительной биологической очистки она может быть сброшена в открытые водоемы, если ее химический состав соответствует установленным нормативным требованиям. Целевой задачей таких технологий является концентрация питательных веществ в

органических удобрениях для достижения требуемых показателей в очищенной воде.

Продукцией многопродуктных технологий являются органические удобрения (твердые или жидкие), очищенная вода и другие конечные продукты: биогаз, электроэнергия, эффлюент метантенков и другие. Целевой задачей таких технологий является перераспределение питательных веществ в зависимости от требований к конечному продукту.

Для получения значений по обоснованным целевым функциям, произведен расчет потоков питательных веществ при формировании технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства. Разработана общая структура модели процесса формирования технологий переработки навоза (рисунок 2).

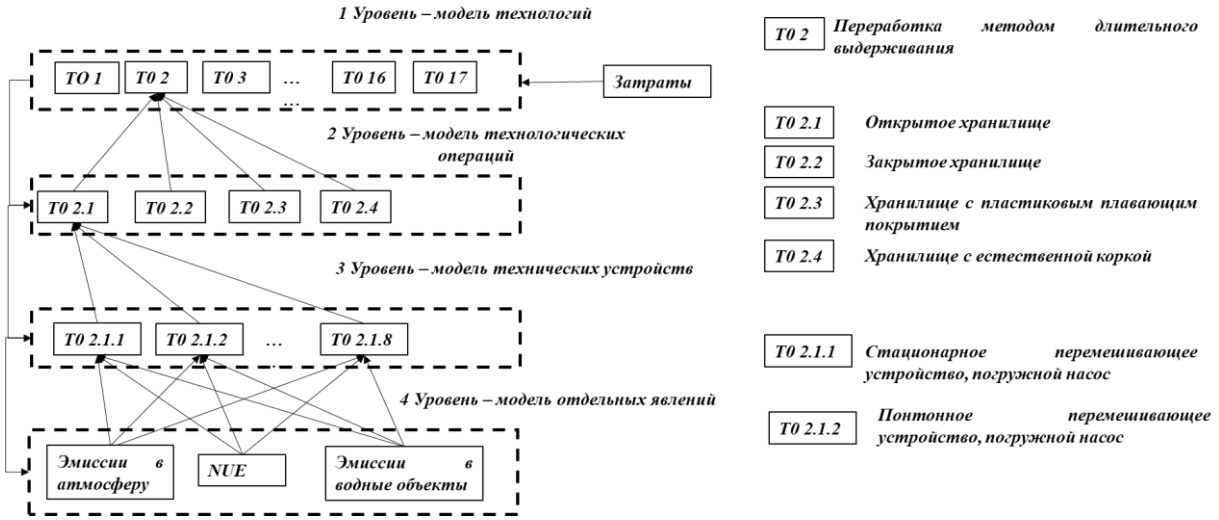

Рис. 2. Общая структура модели процесса формирования технологий переработки навоза

Структура модели состоит из 4 уровней. Применяется метод декомпозиции. Первый уровень – моделирование технологий переработки навоза из 17 возможных вариантов технологических операций. Каждая технологическая операция на втором уровне моделируется с учетом возможных вариантов ее исполнения. Так для технологической операции 2 – Длительное выдерживание возможны 4 варианта исполнения: открытое хранилище, закрытое хранилище, хранилище с плавающим пластиковым покрытием, хранилище с естественной коркой. Третий уровень – варианты технических устройств для конкретного варианта технологической операции. К примеру, в хранилище могут использоваться перемешивающие устройства разного типа: стационарное перемешивающее устройство или понтонное перемешивающее устройство. Четвертый уровень – это модель отдельных явлений. Моделируется воздействие каждого сочетания технических средств в рамках варианта технологической операции на атмосферу, воду и почву; оценивается эффективность использования азота (NUE).

При моделировании для формирования технологий применяются следующие методики:

– Методика сбора исходных данных свиноводческого комплекса (применяемые технологические решения, рационы кормления, поголовье, специализация) [15].

– Методика расчета количественных и качественных характеристик навоза.

– Методика анализа применимости технологий в зависимости от внешних условий.

– Методика расчета отдельных технологических операций при работе с навозом (общеизвестные модели и алгоритмы; модели и коэффициенты, полученные при собственных экспериментальных исследованиях).

– Методика расчета количественных и качественных характеристик конечных продуктов.

– Методика оценки возможности использования конечных продуктов.

– Методика оценки состояния агроэкосистемы.

Результаты и обсуждение

В результате разработана методика, позволяющая оценивать уровень экологической безопасности животноводческих комплексов и формировать эффективный комплекс технологий для создания условий экологической устойчивости свинокомплекса – как агроэкосистемы [16]. Полученные математические зависимости необходимы для расчета критериев оценки технологий и технологических операций при формировании технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства.

Разработаны эколого-экономические критерии, учитывающие ресурсосбережение.

Для комплексной оценки повторно используемой воды предлагается использовать критерий W_w (тонн*тыс руб на 1 голову в год), выражающий более эффективное использование воды при функционировании свиноводческого комплекса, определяемый по формуле 1:

$$W_w = \frac{(\mathrm{M}_{w1}+\mathrm{M}_{w2}+\mathrm{M}_{w3})}{H} \cdot Z_w \quad (1)$$

Где M_{w1} – масса технологической воды, возвращенной на свиноводческих комплекс для собственных нужд, т/год;

M_{w2} – масса технологической воды, переданной свиноводческим комплексом в городскую канализацию или другому потребителю, т/год;

M_{w3} – масса обедненной питательными веществами жидкости, используемой свиноводческим комплексом для удобрительного полива, т/год;

H – среднегодовое поголовье животных на комплексе, гол. При расчете среднегодового поголовья учитывается цикличность производства.

Z_w – удельные приведенные затраты на реализацию технологии по сохранению ресурса – вода, руб/т..

Для комплексной оценки негативного воздействия на атмосферный воздух предлагается использовать критерий E_m, выражающий количественный и стоимостной показатель эмиссий в атмосферный воздух при интенсивном свиноводстве (руб на 1 тонну продукции в год).

$$E_m = f(M, C) \quad (2)$$

Где M – количественный показатель– масса загрязняющих веществ в год, тонны;

C – стоимостной показатель – плата за негативное воздействие на окружающую среду в год, тыс. руб.

$$E_m = \frac{M_{NH3} \cdot C_{NH3} + M_{CO2} \cdot C_{CO2} + M_{CH4} \cdot C_{CH4} + M_{N20} \cdot C_{N20}}{D} \quad (3)$$

Где M_{NH3} – масса выбросов аммиака со свиноводческого комплекса, т/год;

C_{NH3} – плата за выбросы аммиака, руб/т

M_{CO2} - масса выбросов углекислого газа со свиноводческого комплекса, т/год;

C_{CO2} – плата за выбросы углекислого газа, руб/т;

M_{CH4} – масса выбросов метана со свиноводческого комплекса, т/год;

C_{CH4} – плата за выбросы метана, руб/т;

M_{N2O} – масса выбросов закиси азота со свиноводческого комплекса, т/год;

C_{N2O} – плата за выбросы закиси азота, руб/т;

D – среднегодовая масса продукции, т/год.

Критерий учитывает порядок расчета, отраженному в Приказе Минприроды России от 28.01.2021 N 59 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды».

Для комплексной оценки сохраненных питательных веществ в конечных продуктах, предлагается критерий K_{NP} (тыс руб на 1 кг в год), выражающий полученную массу питательных веществ в конечном продукте с учетом затрат на его переработку, транспортировку и внесение

$$K_{NP} = f(M_{NP}, Z_{NP}) \quad (4)$$

Где M_{NP} – масса сохраненных питательных веществ в конечном продукте, кг/т конечного продукта

$$M_{NP} = \frac{M_N + M_P}{M_{FP}} \quad (5)$$

Где M_N – масса сохраненного общего азота в конечном продукте, кг/год;

M_P – масса сохраненного общего фосфора в конечном продукте, кг/год;

M_{FP} – масса конечного продукта, т/год.

Где Z_{NP} – затраты на переработку, транспортировку и реализацию конечного продукта с учетом полученной прибыли, тыс руб/т конечного продукта

$$Z_{NP} = \frac{Z_{NP1} + Z_{NP2} + Z_{NP3} - Z_1}{M_{FP}} \quad (6)$$

Где Z_{NP1} – затраты на переработку свиного навоза в конечный продукт, тыс руб;

Z_{NP2} – затраты на транспортировку конечного продукта от места переработки до места внесения, тыс руб;

Z_{NP3} – затраты на внесение конечного продукта, тыс руб;

Z_1 – прибыль от реализации продукции, тыс руб.

С помощью разработанных критериев производится оценка технологических операций при формировании технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства.

Основные блоки методики формирования технологий представлены на рисунке 3.

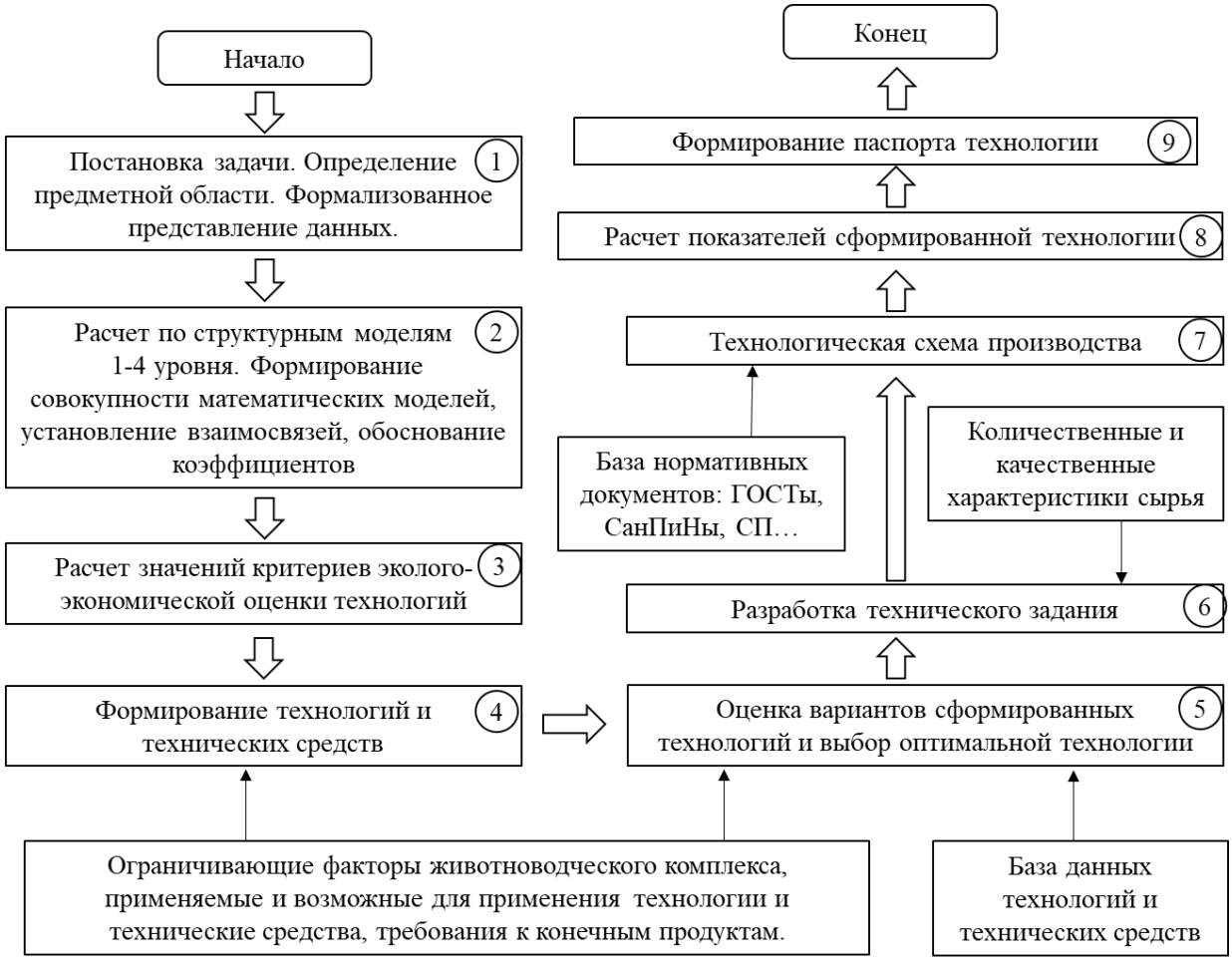

Рис. 3. Основные блоки методики формирования технологий

Методика формирования технологий состоит из следующих блоков:

Блок №1 – Определение предметной области. Осуществляется сбор необходимых исходных данных о животноводческом предприятии, регионе размещения предприятия, применяемых технологиях и технических средствах. Осуществляется формализованное представление данных.

Блок №2 – Расчет по структурным моделям 1-4 уровня (рисунок 2). Осуществляется расчет значений для каждого возможного варианта сочетания технологических операций и технических средств. Осуществляется формирование совокупности математических моделей при формировании технологий, устанавливаются взаимосвязи. Расчет осуществляется по разработанным ранее моделям с учетом обоснованных коэффициентов.

Блок №3 – Расчет значений критериев эколого-экономической оценки технологий. Для каждой сформированной технологии осуществляется расчет значений 3-х критериев: количественный и стоимостной критерий эмиссий в атмосферный воздух (формулы 2-3); критерий сохранности воды (формула 1) и критерий, характеризующий массу питательных веществ в конечном продукте с учетом затрат на его переработку, транспортировку и внесение с учетом прибыли от реализации продукции (формулы 4-6).

Блок №4 – Формирование технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства. Формирование технологии осуществляется с учетом ограничивающих факторов самого

животноводческого комплекса, уже внедренных элементов технологических операций и имеющихся технических средств и установленным законодательством требованиям к конечным продуктам.

Блок №5 – Оценка вариантов сформированных технологий и выбор оптимальной технологии. На основании полученных данных осуществляется трехкритериальная оценка по методу Парето и выбор оптимально сформированной технологии. Характеристики технических средств и режимы работы оборудования заложены в базе данных.

Блок №6 – Разработка технического задания. Для сформированной технологии разрабатывается техническое задание на основании исходных данных предприятия о количественных и качественных характеристиках исходного сырья (навоза).

Блок №7 – Технологическая схема производства. Разработка осуществляется на основе действующих нормативных документов: ГОСТы, СанПиНы, СП и т.п.

Блок №8 – Расчет показателей сформированной технологии. На основе общепринятых методик и информационно технического справочника по наилучшим доступным технологиям «Интенсивное разведение свиней» (ИТС НДТ 41) осуществляется расчет экономических и экологических показателей сформированной технологии.

Блок №9 – Формирование паспорта технологии. Все полученные расчетные значения, характеризующие сформированную технологию, заносятся в паспорт технологии. В паспорте указываются также характеристики задействованных технических средств и оборудования, их количество необходимое для реализации технологии.

Проведена выборочная производственная проверка некоторых технологических операций переработки навоза. В качестве примера выбран типовой свиноводческий комплекс замкнутого цикла, общее поголовье животных составляет 101642 головы (включая поросят-сосунов). Рассмотрены 2 сценария: сценарий 1 – существующая технология переработки навоза без использования рециклинга воды; сценарий 2 – сформированная технология переработки навоза с рециклингом воды. Существующая технология – переработка свиного навоза методом длительного выдерживания, внесение всего полученного жидкого органического удобрения на поля. Сформированная технология – разделение свиного навоза на фракции, переработка части жидкой фракции методом длительного выдерживания, твердой фракции методом пассивного компостирования. Оставшаяся часть жидкой фракции подается обратно на свиноводческий комплекс, где используется совместно с чистой водой в системе навозоудаления. Реализация 2 сценария позволит повысить эффективность использования воды в 2 раза.

Выводы

1. Разработана методика формирования технологий рециклинга жидких органических отходов животноводства позволяет оценивать вторичное использование ресурсов при применении технологических операций. Методика позволяет формировать технологии рециклинга в зависимости от производственных особенностей самого животноводческого комплекса; количество извлеченной из навоза технической воды и возможности ее повторного использования в системе навозоудаления; количественные и качественные характеристики конечных продуктов в зависимости от исходных требований.

2. При формировании технологий для их комплексной оценки применяются разработанные критерии:

критерий W_w, выражающий более эффективное использование воды при функционировании свиноводческого комплекса; критерий E_m, выражающий количественный и стоимостной показатель эмиссий в атмосферный воздух при интенсивном свиноводстве; критерий K_{NP}, выражающий полученную массу питательных веществ в конечном продукте с учетом затрат на его переработку, транспортировку и внесение.

3. Разработанная методика позволяет формировать технологии при отслеживании количественных и качественных характеристик сырья на каждой технологической операции при этом обеспечив вторичное использование ресурсов (воды).

и повысить эффективность переработки навоза в конечные продукты,

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимов Д.А., Брюханов А.Ю., Субботин И.А., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Козлова Н.П. Методика принятия решения об экологически безопасном размещении сельхозпредприятия // *Техника в сельском хозяйстве*. 2014. № 5. С. 24-26.

2. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В. Методический подход к выбору и проектированию отстойников жидкой фракции свиного навоза // *Инновации в сельском хозяйстве.* 2013. № 2 (4). С. 17-21.

3. Kaasik A., Lund P., Poulsen H.D., Kuka, K., Lehn F. Overview of calculation methods for the quantity and composition of livestock manure in the Baltic Sea region. 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.luke.fi/manurestandards/wp-content/uploads/sites/25/2019/06/WP3-report_ManureStandards_Final2.pdf (дата обращения 05.09.2022)

4. Makara A., Kowalski Z., Lelek Ł., Kulczycka J. Comparative analyses of pig farming management systems using the Life Cycle Assessment method. *J. Cleaner Prod*. 2019, vol. 241, 118305. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118305

5. Won S., You B., Shim S., Ahmed N., Choi Y., Ra C. Nutrient variations from swine manure to agricultural land. *Anim. Biosci*. 2018, vol. 31 (5), pp. 763-772. doi:10.5713/ajas.17.0634

6. Poulsen H.D., Kristensen F.V. Standard values for farm manure. DIAS Report Animal Husbandry no. 7. Tjele, Denmark: Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Foulum. 1997. 160 p.

7. Афанасьев В.Н., Калюга В.В. Анализ способов переработки и использования навоза животноводческих ферм и комплексов // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 1982. № 36. С. 42-49.

8. Плаксин И.Е., Плаксин С.И., Трифанов А.В. Перспективные направления развития отрасли свиноводства в России // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2020. № 2 (103). С. 72-81.

9. Velthof G.L., Rietra R.P.J.J. Nitrogen use efficiency and gaseous nitrogen losses from the concentrated liquid fraction of pig slurries. *International Journal of Agronomy*. 2019, vol. 1, 9283106. doi: 10.1155/2019/9283106

10. Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Изменение содержания азота и фосфора в жидкой фракции свиного навоза при биологической очистке // *Технологии и технические*

средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. № 85. С. 146-150.

11. Киров Ю.А. Совершенствование рабочего процесса и обоснование параметров фильтрующей центрифуги для разделения жидкого навоза на фракции: Дисс ... канд. техн. наук. Саратов: Саратовский ГАУ, 1991. 170 с.

12. Fangueiro D., Lopes C., Surgy S., Vasconcelos E. Effect of the pig slurry separation techniques on the characteristics and potential availability of N to plants in the resulting liquid and solid fractions. *Biosyst Eng*, 2012, vol. 113 (2), pp. 187-194. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.07.006

13. Васильев Э.В. Результаты исследования поверхностного способа внесения жидкого органического удобрения в условиях Ленинградской области // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2012. № 4 (8). С. 56-61

14. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Уваров Р.А. Методы решения экологических проблем в животноводстве и птицеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2019. Т. 13. № 4. С. 32-37.

15. Template for a farm survey on manure management. Questionnaire for swine farms. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://projects.luke.fi/manurestandards/wp-content/uploads/sites/25/2020/04/Swine-farm-survey_FINAL.pdf (дата обращения 05.09.2022)

16. Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Брюханов А.Ю. Показатели экологической устойчивости сельских территорий при интенсивном производстве животноводческой продукции // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 95. С. 159-167.

REFERENCES

1. Maksimov D.A., Briukhanov A.Yu., Subbotin I.A., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Kozlova N.P. Metodika prinyatiya resheniya ob ekologicheski bezopasnom razmeshchenii sel'khozpredpriyatiya [Methodology for decision-making on the environmentally safe location of an agricultural enterprise]. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*. 2014. No. 5: 24-26 (In Russian)

2. Bryukhanov A.Yu., Shalavina E.V. Metodicheskii podkhod k vyboru i proektirovaniyu otstoinikov zhidkoi fraktsii svinogo navoza [A methodical approach to the choice and design of sedimentation tanks for liquid fraction of pig manure]. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve*. 2013. No. 2 (4): 17-21 (In Russian)

3. Kaasik A., Lund P., Poulsen H.D., Kuka, K., Lehn F. Overview of calculation methods for the quantity and composition of livestock manure in the Baltic Sea region. 2019. Available at: https://www.luke.fi/manurestandards/wp-content/uploads/sites/25/2019/06/WP3-report_ManureStandards_Final2.pdf (accessed 05.09.2022)

4. Makara A., Kowalski Z., Lelek Ł., Kulczycka J. Comparative analyses of pig farming management systems using the Life Cycle Assessment method. *J. Cleaner Prod*. 2019, 241, 118305 doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118305

5. Won S., You B., Shim S., Ahmed N., Choi Y., Ra C. Nutrient variations from swine manure to agricultural land. *Anim. Biosci*. 2018, 31 (5): 763-772 doi:10.5713/ajas.17.0634

6. Poulsen H.D., Kristensen F.V. Standard values for farm manure. DIAS Report Animal Husbandry no. 7. Tjele, Denmark: Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Foulum. 1997. 160 p.
7. Afanasiev V.N., Kalyuga V.V. Analiz sposobov pererabotki i ispol'zovaniya navoza zhivotnovodcheskikh ferm i kompleksov [Analysis of methods for processing and using manure from livestock farms and complexes]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 1982. No. 36: 42-49 (In Russian)

8. Plaksin I.E., Plaksin S.I., Trifanov A.V. Perspektivnye napravleniya razvitiya otrasli svinovodstva v Rossii [Perspective directions of pig breeding industry development in Russia]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2020. No. 2 (103): 72-81 (In Russian)
9. Velthof G.L., Rietra R.P.J.J. Nitrogen use efficiency and gaseous nitrogen losses from the concentrated liquid fraction of pig slurries. *International Journal of Agronomy*. 2019, 1, 9283106 doi: 10.1155/2019/9283106
10. Vasilev E.V., Shalavina E.V. Izmenenie soderzhaniya azota i fosfora v zhidkoi fraktsii svinogo navoza pri biologicheskoi ochistke [Change in nitrogen and phosphorus content during biological treatment of liquid fraction of pig manure]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2014. No. 85: 146-150 (In Russian)
11. Kirov Yu.A. Sovershenstvovanie rabochego protsessa i obosnovanie parametrov fil'truyushchei tsentrifugi dlya razdeleniya zhidkogo navoza na fraktsii: Diss ... kand. tekhn. Nauk [Improving the workflow and substantiating the parameters of a filter centrifuge for separating liquid manure into fractions: Diss ... Cand. Sci (Engineering)]. Saratov: Saratovskii SAU, 1991. 170 p. (In Russian)
12. Fangueiro D., Lopes C., Surgy S., Vasconcelos E. Effect of the pig slurry separation techniques on the characteristics and potential availability of N to plants in the resulting liquid and solid fractions. *Biosyst Eng*, 2012, 113 (2): 187-194 doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.07.006
13.Vasilev E.V. Rezul'taty issledovaniya poverkhnostnogo sposoba vneseniya zhidkogo organicheskogo udobreniya v usloviyakh Leningradskoi oblasti [Results of the study of superficial way introduction of liquid organic fertilizers in the Leningrad Region]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2012. No. 4 (8): 56-61 (In Russian)
14.Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A. Metody resheniya ekologicheskikh problem v zhivotnovodstve i ptitsevodstve [Methods for solving environmental problems in livestock and poultry farming]. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii*. 2019, vol. 13. No. 4: 32-37 (In Russian)
15. Template for a farm survey on manure management. Questionnaire for swine farms. Available at: https://projects.luke.fi/manurestandards/wp-content/uploads/sites/25/2020/04/Swine-farm-survey_FINAL.pdf (accessed 05.09.2022)
16. Vasilev E.V., Shalavina E.V., Briukhanov A.Yu. Pokazateli ekologicheskoi ustoichivosti sel'skikh territorii pri intensivnom proizvodstve zhivotnovodcheskoi produktsii [Indicators of ecological sustainability of rural areas with intensive livestock production]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. No. 95: 159-167 (In Russian)

УДК 636.08.003 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-109-121

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

И.Е. Плаксин[1] канд. техн. наук; А.В. Трифанов[1] канд. техн. наук;
С.И. Плаксин[2] канд. физ.-мат. наук.

[1]Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

[2]ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет», Новосибирск, Россия

Вследствие увеличения производственных издержек, распространения различных заболеваний, неблагоприятных погодных условий, а также отсутствия необходимого количества квалифицированных кадров уровень производства сельскохозяйственной продукции в России в 2021 году сократился на 2% по сравнению с аналогичным показателем 2020 года. Данный показатель повлиял на повышение себестоимости производимой продукции, что негативно сказалось на ее спросе как на внутреннем, так и на внешнем рынках. Для дальнейшего развития сельского хозяйства в целом и отрасли животноводства в частности необходимо применение более эффективных средств производства, более совершенных форм организации труда и технологических процессов, основанных на использовании последних научно-технических достижений. Основой модернизации производства служит внедрение систем управления, предусматривающих применение средств автоматизации и роботизации производственного процесса, обеспечивающих минимизацию человеческого фактора и позволяющих полностью использовать генетический потенциал высокопродуктивных животных. Основными направлениями, где на сегодняшний день применяются данные системы управления, являются идентификация животных, доение крупного рогатого скота и кормление животных. Наряду с выполнением отдельных технологических процессов, системы управления на животноводческих предприятиях применяются и для комплексного менеджмента. К недостаткам применяемых систем относится необходимость работы в рамках промежутка контролируемых параметров, заданного согласно нормативным данным. Решением данной проблемы служит применение систем искусственного интеллекта, предусматривающих самообучение системы и обеспечивающих обслуживание животных исходя из их физиологического состояния в настоящий момент. Дальнейшие разработки инновационных систем управления также будут основаны на отслеживании изменений в состоянии самого животного для реализации индивидуального подхода и своевременной корректировки производственного процесса.

Ключевые слова: сельское хозяйство, животноводство, система управления, автоматизация, искусственный интеллект.

Для цитирования: Плаксин И.Е., Плаксин С.И., Трифанов А.В. Применение систем управления на животноводческих предприятиях // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3 (112). С.109-121

APPLICATION OF MANAGEMENT SYSTEMS IN LIVESTOCK ENTERPRISES

I.E. Plaksin[1] Cand. Sc. (Engineering); A.V. Trifanov[1] Cand. Sc. (Engineering)
S.I. Plaksin[2] Cand. Sc. (Physics and Mathematics).

[1]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia
[2]Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia

The increase in production costs and spread of various diseases, the adverse weather conditions and the lack of the required qualified personnel resulted in a 2% lower agricultural production in Russia in 2021 against 2020. This had an adverse effect on the self-cost of products and, so, on their demand in both domestic and foreign markets. The further progress in agriculture in general and the livestock farming, in particular, requires more effective machines and equipment, more advanced labor management and improved structure of technological processes based on the latest achievements of science and technology. The production upgrading is possible through introduction of control systems. They would allow for the automation and robotization of processes, reduce the human error and ensure the full use of the genetic potential of highly productive animals. The current application of such control systems is animal identification, milking and feeding. These systems provide both the control of separate technological processes and an integrated management of the enterprise as a whole. Their disadvantage is the need to work within the range of controlled parameters set according to the regulatory data. The solution to this problem is the use of artificial intelligence systems. They feature the self-learning and service the animals according their current physiological state. The further improvement of innovative management systems will also be based on tracking the changes in the animal status in order to put in place the individual approach and timely adjustment of the production processes.

Keywords: agriculture, animal husbandry, control system, automation, artificial intelligence.

For citation: Plaksin I.E., Plaksin S.I., Trifanov A.V. Application of management systems in livestock enterprises. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 3(112): 107- 121 (In Russian)

Введение

Согласно данным Минсельхоза и Росстата уровень сельскохозяйственного производства в России за 2021 год снизился на 2% в сравнении с аналогичным показателем 2020 года. Отрасль животноводства показала отрицательную динамику в секторе птицеводства и свиноводства сократившим производственные объемы на 1,7% и 0,1% соответственно. Также на 0,93% снизилась яйценоскость кур. Производство мяса МРС (овцы, козы) сократилось на 0,9%. Наращивание производства наблюдалось только в секторе молочного животноводства, составившее 0,2% по сравнению с показателями 2020 года [1-3].

Данный результат наблюдался ввиду ряда факторов:

– увеличение производственных издержек (рост цен на племенной материал, корма, ветеринарные препараты, товары для хранения и транспортировки продукции);

– сложная эпизоотическая обстановка (распространение птичьего гриппа, африканской чумы свиней, а также репродуктивно-респираторного синдрома свиней);

– неблагоприятные погодные условия (аномальная жара в ряде регионов страны привела к снижению среднесуточных привесов);

– недостаток квалифицированных кадров, вынуждающих предприятия всех категорий сокращать производственные объемы.

Совокупность приведенных факторов повлияла на увеличение себестоимости производимой продукции, что привело к снижению потребительского спроса. А при учете достижения самообеспеченности по мясу и мясопродуктам в 100,2%, высокому уровню самообеспеченности по молоку и молокопродуктам в 84% существует реальный риск возникновения кризиса перепроизводства на внутреннем рынке. Также повышение себестоимости негативно повлияло на экспортный потенциал животноводческой продукции ввиду невозможности конкуренции в ценовом сегменте.

Для решения обозначенных проблем необходима интенсификация производства, предусматривающая применение более эффективных средств производства, более совершенных форм организации труда и технологических процессов, основанных на использовании последних достижений научно-технического прогресса.

Основой интенсификации производства в животноводстве является модернизация системы управления предприятием.

Система управления – это систематизированный набор средств для управления подконтрольным объектом, предусматривающий возможность сбора показаний о его состоянии, а также средств воздействия на поведение объекта предназначенных для достижения заданных условий [4].

Система управления сельскохозяйственным предприятием в целом, либо отдельными технологическими процессами, осуществляемыми на нем, является неотъемлемой частью предприятия. Основной целью системы управления является повышение эффективности производства, совершенствование контроля за выполнением операций, а также оказание помощи при принятии решений во время сбоев производственного процесса.

Современные системы управления технологическими процессами на животноводческих предприятиях подразумевают применение средств механизации, автоматизации и роботизации производственных процессов с целью снижения трудозатрат, а также стрессовых ситуаций при обслуживании животных.

Целью работы является аналитический обзор систем управления и технических устройств, обеспечивающих их работоспособность на животноводческих и птицеводческих предприятиях различного типоразмера, с формулировкой предложений по дальнейшей модернизации и разработке новых систем, предусматривающих использование современных технико-технологических решений.

Методы исследований

Для определения применяемых на сегодняшний день систем управления на животноводческих предприятиях, а также разрабатываемых технико-технологических решений для их модернизации, обеспечивающих повышение эффективности производства, снижение производственных издержек, а также минимизирующих человеческий фактор был применен метод поисковых исследований, который позволит сформулировать рекомендации для разработки систем управления

производством предусматривающих применение систем искусственного интеллекта и средств роботизации производственного процесса.

Результаты исследований обрабатывались с использованием программных средств: MS Word.

Результаты и обсуждение

Системы управления классифицируются по следующим критериям [5]:

1. уровень автоматизации:

– система считается ручной, если технологический процесс выполняется оператором в полном объеме;

– система считается автоматизированной при разделении функций технологического процесса между оператором и различными устройствами;

– автоматическими являются системы, в которых ход технологического процесса осуществляется полностью без участия оператора.

2. метод управления:

– обыкновенные, не самонастраивающиеся, системы, которые не имеют собственной структуры в производственном процессе. Данные системы бывают разомкнутые, замкнутые и комбинированные;

– адаптивные или самонастраивающиеся системы, в которых изменение характеристик объекта управления ведет к изменению параметров управляющего устройства в автоматическом режиме из-за корректировки структуры системы, либо введения в нее новых элементов.

3. иерархический принцип:

– одноуровневые системы могут быть как централизованными, в которых управление осуществляется с одного пункта, так и децентрализованными с управлением отдельных частей сложного объекта из самостоятельных независимых пунктов;

– многоуровневые системы, имеющие несколько уровней управления, каждым из которых выполняются определенные функции производственного процесса.

4. функциональный признак:

– системы, координирующие работу механизмов. Данные системы координируют работу как отдельных механизмов, так и комплекс оборудования в целом. К данному классу относятся только автоматические системы;

– системы регулирования параметров технологических процессов. Данный класс систем также является автоматическим и предназначен для стабилизации контролируемой величины, либо ее изменения согласно программе, а также ввиду самообучения системы;

– системы автоматического контроля предназначены для получения информации о контролируемых параметрах в реальном времени без участия оператора;

– автоматические защитно-блокировочные системы предназначены для предотвращения аварийных ситуаций, возникающих во время работы технологического оборудования. Кроме того, данный класс систем служит для предотвращения, намеренного или непреднамеренного изменения параметров технологического процесса.

5. информационный признак:

– источники информации,

– носители информации,

– виды и методы переработки информации.

Структура и количество получаемой информации определяет качество работы системы управления. Большее количество информационных каналов способствует улучшению качества работы системы управления, а также расширяет ее функциональные возможности.

Каждая система управления состоит из отдельных частей, узлов и агрегатов. Все эти составляющие в процессе функционирования системы взаимодействуют между собой по ранее заданному алгоритму.

По функциональному назначению элементы системы управления делятся на исполнительные, измерительные и усилительно-преобразовательные.

К измерительным элементам системы управления относятся датчики –первичные элементы автоматической системы, реагирующие на изменение физической величины, характеризующей процесс, и преобразующие эту величину в другую, удобную для работы последующих элементов. Статической характеристикой датчика является зависимость изменения выходной величины от изменения входной [6].

Датчики классифицируются по измеряемым величинам (давление, уровень и т.д.), либо по параметрам, в которые преобразуются данные величины (сопротивление, индуктивность).

Усилительно – преобразовательные элементы предназначены для обработки сигналов от датчиков и формирования управляющих сигналов для исполнительных элементов [7].

К функционалу усилительно-преобразовательных элементов относится: предварительная обработка сигналов, преобразование сигналов, осуществление математических операций с сигналами, усиление сигналов.

К усилительно-преобразовательным элементам систем управления относятся: различные регуляторы и усилители мощности.

В качестве регуляторов широкое применение нашли программируемые логические контроллеры (ПЛК) – специализированные микропроцессорные устройства со встроенным аппаратным и программным обеспечением, которые используются для выполнения функций управления технологическим оборудованием [8].

Программируемый логический контроллер, включает в себя центральный процессор, область памяти и функции обработки сигналов ввода/вывода.

Входов существует два вида, аналоговые и цифровые с их помощью обеспечивается связь с внешними устройствами. Центральный процессор обрабатывает программные команды и управляет всеми элементами контроллера. Область памяти делится на два вида, оперативная память куда загружается программа во время работы контроллера, и область данных необходимая для хранения программы работы системы управления. Выходы обеспечивают работу исполнительных механизмов. Также обязательной частью контроллера являются источники питания, которые могут быть внешними (постоянного или переменного тока) и внутренними (встроенными) сервисными используемыми для подачи питания на датчики или другие устройства, подключенные к контроллеру для упрощения входных и выходных цепей.

Исполнительный элемент (исполнительное устройство) – это функциональный элемент системы управления, осуществляющий воздействие на объект управления путем изменения потока энергии и потока материалов, поступающих на объект [9].

Исполнительные элементы подразделяются на два типа: механические, оборудованные двигателем (механическое перемещение регулирующего органа осуществляется исполнительным элементом) и с электрическим выходом, то есть осуществляющим воздействие на объект регулирования с помощью электричества (например, регулятор напряжения генератора

постоянного тока, где роль регулирующего воздействия играет напряжение возбуждения, полученное от усилителя).

Основными требованиями к исполнительным элементам в системах управления являются: быстродействие, точность отработки команд, высокий КПД, низкое энергопотребление, высокая надежность.

В животноводстве на сегодняшний день автоматизированные системы управления широко используются в следующих областях:

– идентификация животных [10]. Принцип работы систем управления применяемых в данном случае основан на взаимодействии маркировочного устройства, расположенного на теле животного с приемным блоком, установленном на соответствующем оборудовании. Чаще всего в качестве маркировочного устройства используется бесконтактный импульсный датчик пассивного или активного типа, то есть содержащим или не содержащим собственный источник питания.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами, основанные на идентификации животных, находят широкое применение в свиноводстве. Примером служит система индивидуального кормления свиноматок. Взаимодействие маркировочных устройств с приемным блоком, расположенном в производственном помещении, позволяет определить пространственное положение животных, а также отслеживать его физиологическое состояние, за счет чего осуществляется коррекция рациона питания для каждой свиноматки. Данная система обеспечивает повышение производительности труда и минимизирует стрессы животных, возникающие в следствии контакта с обслуживающим персоналом.

Также данные системы широко применяются в молочном животноводстве, что позволяет осуществить полную автоматизацию процесса доения при беспривязном содержании животных [11]. Применение данной системы обеспечило систематизацию всей поступающей информации о каждом животном (сведения по среднесуточным надоям, данные о состоянии животного, даты осеменения и отела и т.д.)

– доение КРС [12-15]. Применение автоматизированных систем позволило полностью автоматизировать все технологические операции процесса доения коров. Системой идентифицируется каждое животное, фиксируется дата, время, продолжительность доения, вся информация о количестве и качестве полученного молока по всему стаду. Системой также контролируется уровень вакуума для обеспечения оптимальных режимов доения, обеспечивается раздельное доение каждой четверти вымени, а также автоматическая дезинфекция сосков после доения. Также проводится экспресс анализ молока, и в случае отклонения от заданных норм осуществляется отделение молока в отдельный сборник, при этом фиксируется информация о животном, от которого получено некачественное молоко с дальнейшим занесением в специальный журнал и рекомендациями выполнения необходимых действий.

Системой управления на сегодняшний день контролируются многофункциональные доильные центры, состоящие из доильных роботов, системы охлаждения получаемого молока, секций ожидания, отела, помещения управления стадом.

– кормление животных [16,17]. На молочных фермах наибольшую эффективность показала технология кормления, предусматривающая одновременную раздачу животным всех видов корма в виде сбалансированной кормосмеси. Применение данной технологии

предусматривает соблюдение жестких требований во время процесса приготовления кормосмеси, основным этапом которого является точное взвешивание отдельных компонентов, что обосновывает применение современных высокоточных измерительных систем. Активно внедряются беспроводные системы электронного взвешивания, состоящие из двух терминалов, сообщающихся по беспроводному каналу связи и получающие от смесителя данные о загрузке. Основной терминал расположен в кабине раздатчика, для осуществления контроля за процессом загрузки компонентов. Портативный терминал размещен к кабине погрузчика компонентов кормосмеси.

Также активно внедряются системы кормления животных при помощи подвесных бункеров, в данном случае приготовление кормосмеси и ее раздача осуществляется непосредственно в животноводческом помещении [18].

На свиноводческих предприятиях кормление осуществляется сбалансированными комбикормами, состав которых зависит от половозрастной группы животных и периода производственного цикла. Для минимизации потерь корма и трудозатрат широко применяются автоматизированные станции кормления, выдающие корм исходя из показаний физиологического состояния животных. Кроме того, во время потребления корма животными данные станции позволяют точно определять половую охоту у свиноматок, что способствует более полному использованию генетического потенциала животных [19,20].

Наряду с контролем и управлением одним технологическим процессом, разрабатываются и внедряются в производство системы управления, подразумевающие применение комплексного менеджмента на животноводческом предприятии.

В качестве примера можно привести разработанную компанией DeLaval систему управления молочными фермами с привязным содержанием животных (DeLaval DelPro Farm Manager) [21]. Данной системой осуществляется комплексный учет результатов работы операторов машинного доения, составляются ежедневные задания специалистам, предоставляется точная информация об удоях для расчета программы кормления в соответствии с продуктивностью животных, ведется учет физиологического состояния животных. Преимуществом данной системы является возможность удаленного доступа для консультантов и специалистов в режиме реального времени.

Для свиноводства также разработаны комплексные системы управления предприятием. Компания Big Dutchman представила систему BigFarmNet [22]. Данная система осуществляет управление микроклиматом, автоматической системой кормления и всеми производственно-экономическими процессами – содержанием свиноматок, доращиванием поросят и откормом свиней. Благодаря объединению всех компьютеров системы в единую сеть обеспечивается доступ ко всем данным в независимости от того на каком из компьютеров ведется работа (офис, животноводческое помещение). Данные операторам предоставляются в виде графиков и таблиц. Все настройки и корректировки по раздаче корма, воды, параметрах микроклимата автоматически переносятся из компьютера, расположенного в офисе на компьютеры, расположенные в производственных помещениях. За счет постоянного контроля и своевременного устранения отклонений в производственном процессе достигается наиболее полное использование генетического потенциала животных, минимизация производственных издержек и, как следствие, достижение высокой рентабельности производства.

Для птицеводства компанией Big Dutchman разработана система управления фермой Farm Power Manager, основанная на контроле расхода электроэнергии. За счет постоянного мониторинга затрат электроэнергии на выполнение определенных технологических процессов (кормление, поение, сбор яиц, пометоудаление, организация микроклимата) оценивается потенциал экономии энергии, а также формируются рекомендации по корректировке производственного процесса [23].

Описанные системы управления функционируют по программе, содержащей нормативные данные по расходу кормов, воды, электроэнергии, температуре, предельно допустимой концентрации вредных газов и т.д. и их корректировка возможна только в рамках заданного промежутка, но на сегодняшний день объективной необходимостью является корректировка работы системы исходя из физиологического состояния животного в настоящий момент.

Решением данной проблемы служит применение систем искусственного интеллекта предполагающих самообучение.

Активно внедряются методы искусственных нейронных сетей, при помощи которых определяют супоросность свиноматок. Данная разработка подразумевает расположение камер в станках для опороса, а алгоритмы машинного обучения дают результаты, основанные на наблюдении за сном свиноматок, положением туловища и условиями питания. Система запоминает породы свиней, возраст, вес, условия питания, интенсивность передвижения, а также траекторию движения. Кроме того, алгоритмы распознавания голоса используются для мониторинга здоровья поросят и защиты от удушья, что снижает уровень смертности на 3% и увеличивает количество отнятых поросят на свиноматку до трех голов [24].

Для купного рогатого скота при помощи российских специалистов разработан проект Cattle Care, предусматривающий систему видео мониторинга здоровья и продуктивности коров на основе компьютерного зрения.

Используя узор на шкуре коров (который индивидуален для каждой особи) обученная нейросеть собирает информацию с камер, детектирует, и идентифицирует каждую корову. Учитывая количество шагов, жевательных движений, потребляемого корма и воды, а также других поведенческих паттернов программа составляет медицинскую карту каждой коровы, что позволяет своевременно реагировать на изменение ее состояния [25].

Очевидно, что для обеспечения сокращения производственных издержек как в России, так и за рубежом активно внедряют автоматизированные системы управления процессами производства продукции, что способствует снижению трудозатрат, а также стрессовых ситуаций, возникающих у животных за производственный цикл.

Проведенный анализ применяемых систем позволил провести их классификацию, а также выделить их основные элементы.

В представленном обзоре приведены системы управления, используемые на сегодняшний день, от ручных и простых автоматизированных систем с последовательной связью датчиков, преобразовательных и исполнительных элементов, до сложных многокомпонентных систем, подчиняющихся законам автоматического управления и регулирования, и интеллектуальных систем управления.

ВЫВОДЫ

Применяемые на сегодняшний день системы управления обеспечивают подачу

животным кормов, воды, утилизируют навоз и помет, организуют микроклимат производственного помещения и т.д. в зависимости от нормативных, заранее заданных, неизменных показателей. Данный подход не позволяет объективно оценить физиологическое и психоэмоциональное состояние животного, что напрямую влияет на его продуктивность.

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что дальнейшая разработка современных инновационных систем управления должна, в первую очередь, отслеживать изменение в состоянии самого животного (температуру, изменение массы, процент жировой ткани, физическую активность, оксигенацию, аппетит, жажду и т.д.), для реализации индивидуального подхода и своевременной корректировки производственного процесса.

Для разработки данных систем управления и создания технических средств для их реализации на практике необходимо проведение комплексных исследований, направленных на определение влияния различных факторов на физиологическое и психоэмоциональное состояние животных, а также влияния данных показателей на продуктивность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Итоговый доклад о результатах деятельности Минсельхоза России за 2021 год [Электронный ресурс] Режим доступа: https://mcx.gov.ru/upload/iblock/aed/aed85b58433e872aa1848ad211ced148.pdf?ysclid=l7a5dzia2w315358653 (дата обращения 08.09.2022)
2. Федеральная служба государственной статистики. Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство [Электронный ресурс] Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 08.09.2022)
3. Национальный союз свиноводов [Электронный ресурс] Режим доступа https://nssrf.ru/ (дата обращения 08.09.2022)
4. Исследование систем управления. [Электронный ресурс] / Электронная библиотека SciCenter.online. Режим доступа: https://scicenter.online/ekonomicheskaya-teoriya-scicenter/sistema-upravleniya sistematizirovannyiy-171481.html (дата обращения 08.09.2022)
5. Классификация систем управления [Электронный ресурс] / Электронная библиотека. Режим доступа: https://libraryno.ru/1-2-klassifikaciya-sistem-upravleniya-upr_sys/ (дата обращения 08.09.2022 г.)
6. Фролов В. Ю., Бычков А. В., Брусенцов А. С., Класнер Г. Г., Дробот В. А. Механизация и автоматизация в животноводстве: учебное пособие. Краснодар: КубГАУ, 2020. 191 с.
7. Кабанов В. Н. Элементы автоматики: учебное пособие. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2010. 187 с.
8. Лившиц Ю. Е., Лакин В. И., Монич Ю. И. Программируемые логические контроллеры для управления технологическими процессами: учебно-методическое пособие. Часть 1. Минск: Международный институт дистанционного образования, 2014. 176 с.
9. Исполнительные элементы систем автоматики. Классификация и общие характеристики исполнительных элементов [Электронный ресурс] Режим доступа: https://studfile.net/preview/7228558/ (дата обращения 08.09.2022 г.)
10. Кузьмина, Т. Н. Электронные системы идентификации в животноводстве: аналитическая справка. Пос. Правдинский: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 29 с.

11. Шульгин И. К., Лужняк В. Д., Суровцев В. Н., Хазанов В.Е., Гордеев В.В. Цифровая трансформация производственных процессов в молочном скотоводстве Ленинградской области // *Молочное и мясное скотоводство*. 2022. № 4. С. 3-8 DOI 10.33943/MMS.2022.17.37.001
12. Каталог продукции Boumatic Gascoigne Melotte (Ирландия) [Электронный ресурс] Режим доступа: https://boumatic.com/about-us (дата обращения 08.09.2022 г.)
13. Роботизированная доильная система LELY ASTRONAUT. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.lely.com/media/filer_public/be/3b/be3bf392-d614-4eae-ad7b-6f9cc27b6404/webres_lely_astronaut_lhqb06416_ru.pdf (дата обращения 08.09.2022 г.)
14. Система добровольного доения VMS компании DeLaval. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://evrosnab.ru/product/doenie/avtomaticheskoe-doenie/robotizirovannaya-doilnaya-ustanovka-delaval-vms/? (дата обращения 08.09.2022 г.)
15. Доильный робот Mlone [Электронный ресурс] Режим доступа: https://td-vavilon.ru/katalog-produktsii/molochnoe-zhivotnovodstvo/tekhnika-dlya-doeniya/avtomaticheskoe-doenie/doilnyj-robot-mlone? (дата обращения 08.09.2022 г.)
16. Система управления кормлением для молочных ферм TFM Tracker Dairy [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.trioliet.ru/produkcija/sistema-upravlenija-kormleniem/tfm-tracker-dairy-sistema-upravlenija-kormleniem-dlja-molochnykh-ferm (дата обращения 08.09.2022 г.)
17. Беспроводная весовая система Feed Manager [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.kongskilde.com/fr/ru-RU/ru-RU/Wireless-weighing-system (дата обращения 08.09.2022 г.)
18. Total Solutions и преимущества оборудования GEA Farm Technologies. Смесители-Кормораздатчики [Электронный ресурс] Режим доступа: https://w-mo.ru/wp-content/uploads/2021/07/kormorazdatchiki.total-solution.pdf (дата обращения 08.09.2022 г.)
19. Новая система обнаружения охоты у свиноматок SowCheck / Аграрное Обозрение. [Электронный ресурс] Режим доступа https://agroobzor.ru/svin/a-183.html? (дата обращения 08.09.2022 г.)
20. Инновационные технологии менеджмента для искусственного осеменения в срок PigWatch & Contact-O-Max (Big Dutchman). [Электронный ресурс] Режим доступа https://piginfo.ru/upload/iblock/e40/pig-production-sow-management-PigWatch-Contact-O-Max-Big-Dutchman-ru.pdf?ysclid=l11sbwnez8 (дата обращения 08.09.2022 г.)
21. Навигатор стада DeLaval DelPro Farm Manager [Электронный ресурс] Режим доступа http://delaval.usloviyatruda.ru/opencms-8.5.2/export/sites/delaval/.content/images/navigator.pdf (дата обращения 08.09.2022 г.)
22. Система менеджмента и управления BigFarmNet (Big Dutchman) [Электронный ресурс] Режим доступа https://www.bigdutchman.ru/ru/svinovodstvo/katalog/detail/bigfarmnet/ (дата обращения 08.09.2022 г.)
23. The climate computer for optimum climate control in smaller poultry houses (Big Dutchman) [Электронный ресурс] Режим доступа https://triolpro.ru/upload/iblock/c80/c8052f69c3909033d96f2722762b8650.pdf (дата обращения 08.09.2022 г.)
24. Роботы и клубничка: как AI повышает урожайность полей [Электронный ресурс] Режим доступа: https://habr.com/ru/company/cloud4y/blog/460129/ (дата обращения 08.09.2022)

25. Бодянский Е. В., Руденко О. Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. Харьков: ТЕЛЕТЕХ. 2004. 369 с.

REFERENCES

1. Itogovyj doklad o rezul'tatah deyatel'nosti Minsel'hoza Rossii za 2021 god [Final report on the results of the activities of the Ministry of Agriculture of Russia for 2021] Available at: https://mcx.gov.ru/upload/iblock/aed/aed85b58433e872aa1848ad211ced148.pdf?ysclid=l7a5dzia2w315358653 (accessed 08.09.2022) (In Russian)
2. Sel'skoe hozyajstvo, ohota i lesnoe hozyajstvo [Agriculture, hunting and forestry] / Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki. Available at: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (accessed 08.09.2022) (In Russian)
3. Nacional'nyj soyuz svinovodov [National Pig Farmers Union]. [online] Available at: https://nssrf.ru/ (accessed 08.09.2022) (In Russian)
4. Issledovanie sistem upravleniya. [Investigation of control systems.] / Elektronnaya biblioteka SciCenter.online. Available at: https://scicenter.online/ekonomicheskaya-teoriya-scicenter/sistema-upravleniya sistematizirovannyiy-171481.html (accessed 08.09.2022) (In Russian)
5. Klassifikaciya sistem upravleniya [Classification of control systems] / Elektronnaya biblioteka. Available at: https://libraryno.ru/1-2-klassifikaciya-sistem-upravleniya-upr_sys/ (accessed 08.09.2022) (In Russian)
6. Frolov V. YU., Bychkov A. V., Brusencov A. S., Klasner G. G., Drobot V. A. Mekhanizaciya i avtomatizaciya v zhivotnovodstve: ucheb. Posobie [Mechanization and automation in animal husbandry: textbook]. Krasnodar: KubGAU, 2020. 191 p. (In Russian)
7. Kabanov V. N. Elementy avtomatiki: ucheb. Posobie [Elements of automation: a tutorial]. Ekaterinburg: Ural'skij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2010. 187 p. (In Russian)
8. Livshic Yu. E., Lakin V. I., Monich Yu. I. Programmiruemye logicheskie kontrollery dlya upravleniya tekhnologicheskimi processami: uchebno-metodicheskoe posobie [Programmable logic controllers for process control: educational and methodical manual]. Minsk: Mezhdunarodnyj institut distancionnogo obrazovaniya, Part 1, 2014. 176 p. (In Russian)
9. Ispolnitel'nye elementy sistem avtomatiki. Klassifikaciya i obshchie harakteristiki ispolnitel'nyh elementov [Executive elements of automation systems. Classification and general characteristics of actuators]. Available at: https://studfile.net/preview/7228558/ (accessed 08.09.2022) (In Russian)
10. Kuzmina, T. N. Elektronnye sistemy identifikacii v zhivotnovodstve: Analiticheskaya spravka [Electronic identification systems in animal husbandry: analytical essay]. Pravdinskij Settl.: FGBNU “Rosinformagrotekh”, 2011. 29 p. (In Russian)
11. Shul'gin I. K., Luzhnyak V. D., Surovtsev V. N., Khazanov V.E., Gordeev V.V. Tsifrovaya transformatsiya proizvodstvennykh protsessov v molochnom skotovodstve Leningradskoi oblasti [Digital transformation of production processes in dairy cattle farming in the Leningrad Region]. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo*. 2022. No. 4: 3-8 (In Russian)
DOI 10.33943/MMS.2022.17.37.001
12. Katalog produkcii Boumatic Gascoigne Melotte (Irlandia) [Product catalogue of Boumatic Gascoigne Melotte (Ireland)] Available at: https://boumatic.com/about-us (accessed 08.09.2022) (In Russian)

13 Robotizirovannaya doil'naya sistema Lely Astronaut [Lely Astronaut milking robot] Available at: https://www.lely.com/media/filer_public/be/3b/be3bf392-d614-4eae-ad7b-6f9cc27b6404/webres_lely_astronaut_lhqb06416_ru.pdf (accessed 08.09.2022) (In Russian)
14 Sistema dobrovol'nogo doeniya VMS kompanii DeLaval. [DeLaval VMS voluntary milking system] Available at: https://evrosnab.ru/product/doenie/avtomaticheskoe-doenie/robotizirovannaya-doilnaya-ustanovka-delaval-vms/? (accessed 08.09.2022) (In Russian)
15. Doil'nyj robot Mlone [Mlone milking robot] Available at: https://td-vavilon.ru/katalog-produktsii/molochnoe-zhivotnovodstvo/tekhnika-dlya-doeniya/avtomaticheskoe-doenie/doilnyj-robot-mlone? (accessed 08.09.2022) (In Russian)
16. Sistema upravleniya kormleniem dlya molochnyh ferm TFM Tracker Dairy. [TFM Dairy Tracker feed management system for dairy farms] Available at: https://www.trioliet.ru/produkcija/sistema-upravlenija-kormleniem/tfm-tracker-dairy-sistema-upravlenija-kormleniem-dlja-molochnykh-ferm (accessed 08.09.2022) (In Russian)
17. Besprovodnaya vesovaya sistema Feed Manager [Wireless weighing system Feed Manager] Available at: https://www.kongskilde.com/fr/ru-RU/ru-RU/Wireless-weighing-system (accessed 08.09.2022) (In Russian)
18. Total Solutions i preimushchestva oborudovaniya GEA Farm Technologies. Smesiteli-Kormorazdatchiki [Total Solutions and advantages of GEA Farm Technologies. Feed mixer wagons] Available at: https://w-mo.ru/wp-content/uploads/2021/07/kormorazdatchiki.total-solution.pdf (accessed 08.09.2022) (In Russian)
19. Novaya sistema obnaruzheniya ohoty u svinomatok SowCheck [A new oestrus detection system]. Agrarnoe Obozrenie [Agricultural Review. 25.04.2013]. Available at: https://agroobzor.ru/svin/a-183.html? (accessed 08.09.2022) (In Russian)
20. Innovacionnye tekhnologii menedzhmenta dlya iskusstvennogo osemeneniya v srok PigWatch & Contact-O-Max (Big Dutchman). [Innovative management tools for optimal artificial insemination] Available at: https://piginfo.ru/upload/iblock/e40/pig-production-sow-management-PigWatch-Contact-O-Max-Big-Dutchman-ru.pdf?ysclid=l11sbwnez8 (accessed 08.09.2022) (In Russian)
21. Navigator stada DeLaval DelPro Farm Manager [Herd Navigator within DeLaval DelPro Farm Manager] Available at: http://delaval.usloviyatruda.ru/opencms-8.5.2/export/sites/delaval/.content/images/navigator.pdf (accessed 08.09.2022) (In Russian)
22. Sistema menedzhmenta i upravleniya BigFarmNet (Big Dutchman) [BigFarmNet – management and control system] Available at: https://www.bigdutchman.ru/ru/svinovodstvo/katalog/detail/bigfarmnet/ (accessed 08.09.2022) (In Russian)
23. The climate computer for optimum climate control in smaller poultry houses (Big Dutchman). Available at: https://triolpro.ru/upload/iblock/c80/c8052f69c3909033d96f2722762b8650.pdf (accessed 08.09.2022)
24. Roboty i klubnichka: kak AI povyshaet urozhajnost' polej [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: https://habr.com/ru/company/cloud4y/blog/460129/ (data obrashcheniya 8.09.2022)
Roboty i klubnichka: kak AI povyshaet urozhainost' polei [Robots and strawberries: how AI improves field yields] Available at: https://habr.com/ru/company/cloud4y/blog/460129/ (accessed 08.09.2022) (In Russian)

25. Bodyanskiy Ye. V., Rudenko O. G. Iskusstvennye nejronnye seti: arhitektury, obuchenie, primeneniya [Artificial neural networks: architectures, learning, applications]. Harkov: TELETEKH. 2004. 369 p. (In Russian)

УДК 636.08.003 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-121-129

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОВЕРКИ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ БРОЙЛЕРОВ

Д.А. Сошнев В.И. Базыкин
А.В. Трифанов, канд. техн. наук И.Е. Плаксин, канд. техн. наук

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время сектор производства мяса цыплят бройлеров является важнейшим звеном животноводческой отрасли Российской Федерации. За первое полугодие 2022 года производство птицы выросло на 0,7% – до 532,1 тысяч тонн. Главную роль в производстве играют крупные сельскохозяйственные организации. Крестьянско-фермерским и личным подсобным хозяйствам трудно конкурировать с крупными предприятиями из-за более мелких объёмов производства продукции и отсутствия современного технологического сопровождения производства. Разработка технологических модулей для содержания и выращивания цыплят-бройлеров является перспективным направлением, способным привнести в сектор мелкотоварного производства ряд современных технико-технологических и планировочных решений, пропорционально масштабирующих промышленную технологию производства со всеми ее преимуществами в частный сектор. В результате исследования получены математические модели, позволяющие определить количество корма и прирост живой массы цыплят-бройлеров в зависимости от времени их содержания в технологическом модуле с регулируемым микроклиматом. Строгое определение данных параметров имеет существенное значение ввиду того, что затраты на приобретение корма составляют 50-70% всех расходов производства продукции. Полученные экспериментальные данные дают возможность получить зависимости между потреблением корма и приростом живой массы цыплят-бройлеров

Ключевые слова: Бройлер, технологический модуль, математическая модель, птицеводство, бройлер Росс 308

Для цитирования: Сошнев Д.А., Трифанов А.В., Базыкин В.И., Плаксин И.Е. Особенности использования технологических модулей для выращивания цыплят - бройлеров // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3(112). 121-129

RESULTS OF EXPERIMENTAL AND PRODUCTION CHECK OF THE OPERATION OF THE TECHNOLOGICAL MODULE FOR GROWING BROILERS

D.A. Soshnev,
A.V. Trifanov, Cand. Sc.(Engineering),
V.I. Bazykin,
I.E. Plaksin, Cand. Sc. (Engineering)

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

Currently, the broiler chicken meat production is the most important sector of the livestock industry in the Russian Federation. In the first half of 2022 the poultry production increased by 0.7% – to 532.1 thousand tons. The main role here belongs to the large-scale agricultural enterprises. Private farms and smallholdings find it difficult to compete with large farms. Such farms feature the smaller production volumes and lack of modern engineering support. The technological modules for housing and rearing broiler chickens are of great promise in this regard. They introduce several advanced technical, technological, and space-planning solutions to the small-scale poultry farming and scale the advantages of industrial production technology to the private sector. The study output was the mathematical models for determining the amount of feed and the live weight gain of broiler chickens depending on their housing time in a technological module with a controlled microclimate. The accuracy of these parameters is of utmost importance since the feed costs account for 50 to 70% of all production costs. The experimental data obtained allows deriving the dependencies between the feed consumption and the live weight gain of broiler chickens.

Keywords: broiler, technological module, mathematical model, poultry production, Ross 308 broiler.

For citation: Soshnev D.A., Trifanov A.V., Bazykin V.I., Plaksin I.E. Results of experimental and production check of the operation of the technological module for growing broilers. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 3(112): 121-129 (In Russian)

Введение

Объем российского рынка мяса птицы в 2021 году вырос на 0,7% до 532,1 тысяч тонн. Разведением цыплят-бройлеров в стране традиционно занимаются как хозяйства населения, так и крупные сельскохозяйственные организации. Перекос рынка производства в сторону крупных предприятий, особенно в последнее время, происходит в связи с несопоставимо большими объемами производства продукции, а также использованием современных технико-технологических и планировочных решений.

Выращивание бройлеров, это достаточно прибыльный бизнес, особенно если использовать интенсивную технологию выращивания.

На данный момент существующие проектные решения, предназначенные для мелкотоварных птицеводческих предприятий, обладают рядом недостатков, основными из которых являются: низкий уровень автоматизации и механизации технологических процессов, а также, отсутствие современных наукоемких технических средств для эффективного

производства продукции птицеводства.

Разработка технологических модулей для выращивания цыплят - бройлеров на сегодняшний день является одним из основных перспективных направлений ввиду существенных недостатков технико-технологических и планировочных решений для мелкотоварного производства продукции птицеводства [3].

Исходя из этого в ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработан проект технологического модуля для выращивания бройлеров [4]

Согласно «Методические рекомендации по технологическому проектированию птицеводческих предприятий РД-АПК 1.10.05.04-13» были определены основные технологические показатели методом расчета [5].

Целью исследования является определение расхода корма, воды, прироста живой массы и выхода помета при выращивании цыплят – бройлеров в технологическом модуле.

Материалы и методы

Объект исследований – технологический модуль для выращивания бройлеров представлен на рис. 1.

Модуль для выращивания бройлеров с теплоизолирующей конструкцией включает в себя два входа 1, для удобства выноса поддонов с пометом и два пластиковых окна 2, для эффективного проветривания в теплое время года.

Бройлеры располагаются в птицеводческом помещении в многоярусной клетке 7, по 116 голов на каждом ярусе, где происходит их содержание и откорм. В весенне-осенний период открываются лазы 5 для выгула бройлеров в огороженном вольере 4. Уборка помета с поддона осуществляется вручную по мере их загрязнения.

Для кормления бройлеров используется по пять бункерных кормушек 10 на каждом уровне, предназначенных для откорма до тридцати двух птиц каждая. Рацион бройлеров составляют сухие корма. Исходя из нормативных показателей кормушки, корм будет ежедневно досыпаться в кормушки, с суммированием расхода за весь цикл содержания птиц, составляющий 6 недель[5, 6, 7].

Для поения птиц предусмотрены ниппельные автопоилки 11, вода в которые подается из накопительного бака 9, который наполняется путем подключения водонапорного шланга по мере опорожнения, для учета расхода воды установлен счетчик.

Для обслуживающего персонала в модуле предусмотрен технологический проход, сообщающийся с ярусами посредством сетчатых перегородок с затворами. Время, затраченное на ежесуточное обслуживание птиц, фиксируется с помощью секундомера с последующим суммированием определением трудозатрат необходимых для получения 1 кг продукции.

Вентиляция технологического модуля осуществляется за счет поступления воздуха через приточные окна 3 и его удаления при помощи шести приточных вентиляторов 6 (по два на каждый ярус).

Управление модулем осуществляется непосредственно с пульта управления 13.

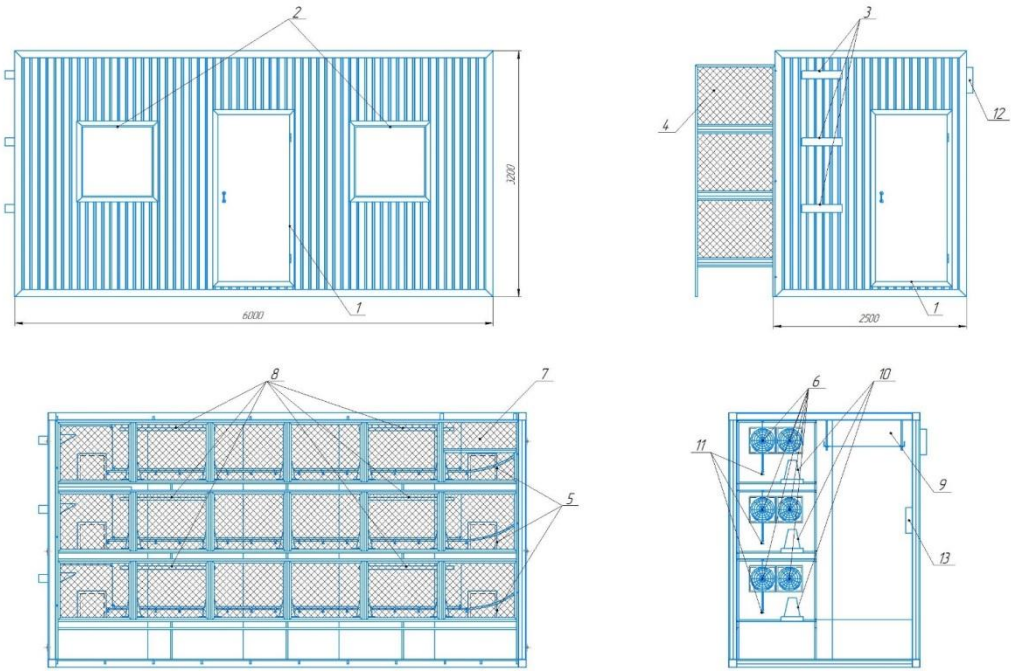

Рис. 1. Технологический модуль для выращивания цыплят - бройлеров:

1-дверь; 2- окно; 3- окно приточной вентиляции; 4- выгульный вольер; 5- лаз; 6- вытяжные вентиляторы; 7-клетка; 8- инфракрасный обогреватель; 9- накопительный бак; 10- кормушка; 11- ниппельная поилка; 12- электросчетчик; 13- пульт управления модулем

Исследования проводились в соответствии с утвержденными программой и методикой выполнения экспериментальной научно-исследовательской работы «Опытно-производственная проверка работы технологического модуля для выращивания бройлеров».

Факторы, подлежащие исследованию: расход корма, воды, прирост живой массы, выход помета.

Расход корма определялся путем взвешивания каждой порции на лабораторных весах CAS SW-5. Показания снимали один раз в сутки в одно и то же время. Комбикорм в зависимости от рациона кормления засыпался в бункерные кормушки ежедневно.

Для учёта расхода воды в технологическом модуле перед баком установлен счетчик воды «VALTEC DN15». Замер расхода воды производится при помощи счетчика воды один раз в сутки.

Прирост живой массы определялся ежесуточным взвешиванием бройлеров на лабораторных весах CAS SW-5. Все показания фиксировали в журнале наблюдений.

Удаление помёта осуществляется путем опорожнения поддона один раз в три дня. Для определения количества помёта производилось контрольное взвешивание на лабораторных весах «CAS SW-5».

Результаты исследований обрабатывались с использованием программных средств: MC Excel и MC Word.

Результаты и обсуждение

Технологический модуль для выращивания цыплят - бройлеров работает следующим образом. Внутри модуля расположены: система управления микроклиматом, система регистрации вредных газов в реальном времени, бак с водой и клетка, состоящая из трех ярусов [8]. На каждом ярусе располагаются по 116 суточных бройлеров. По достижению бройлеров 42-дневного возраста, бройлеров забирают на убой.

Потребление комбикорма бройлерами за цикл выращивания представлено на рис. 2. В первые дни жизни цыплят - бройлеров важно грамотно составить рацион, т.к. основной падеж приходится в этот период времени.

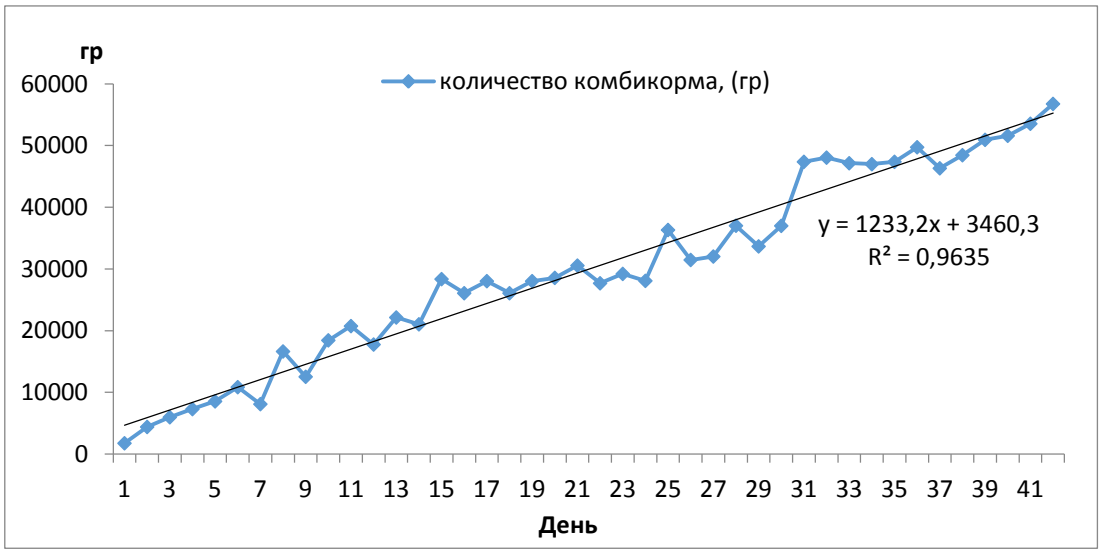

Рис. 2. Потребление комбикорма бройлерами за цикл

Всего за цикл откорма было затрачено 1258,9 килограмма комбикорма. Потребление комбикорма одной птицей за цикл составляет:

$$Z_б = \frac{N_к}{N_б}; кг, \quad (1)$$

где: $Z_б$ – потребление комбикорма одной птицей за цикл (42 дня), кг;

$N_к$ – общее количество комбикорма за цикл, кг;

$N_б$ – количество бройлеров в технологическом модуле, гол.

$$Z_б = \frac{1258,9}{350} = 3,59; кг,$$

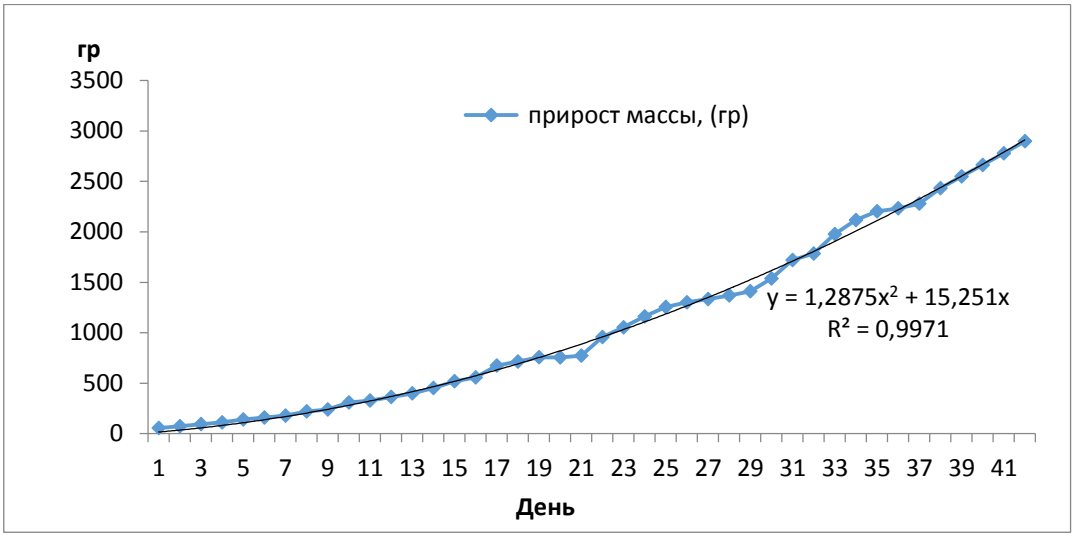

Рис. 3. Прирост живой массы

Учитывая средний вес бройлера при съеме на убой, который составил 2,5 килограмма рис. 3, был определен коэффициент конверсии корма:

$$K_к = \frac{Z_б}{M_c}; \qquad (2)$$

где: $К_к$ – коэффициент конверсии корма;

$Z_б$ – потребление комбикорма одной птицей за цикл (42 дня), кг;

$М_с$ – Средняя масса бройлера при съеме на убой, кг.

$$K_к = \frac{3{,}59}{2{,}5} = 1{,}44;$$

Аналогично определению общего количества комбикорма, было определено общее количество воды рис. 4.

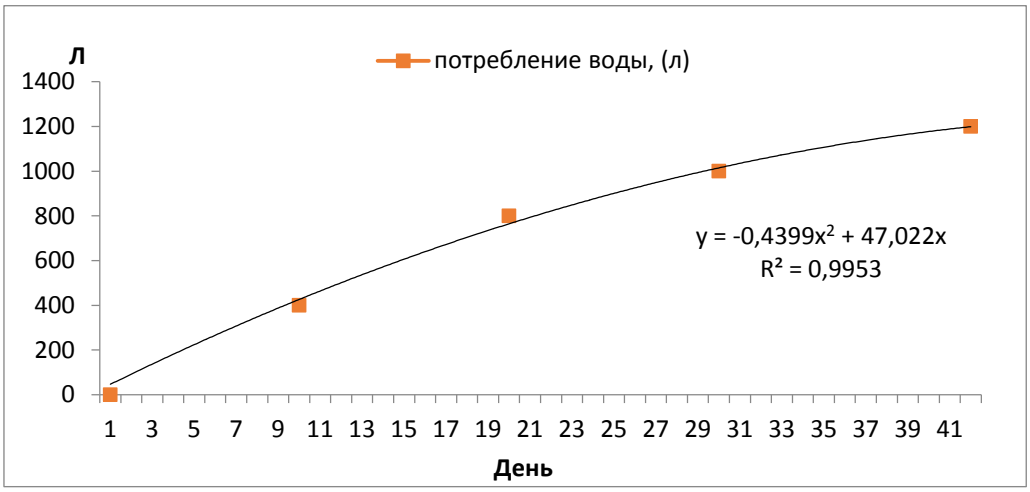

Рис. 4. Потребление воды

Всего за цикл было расходовано 3400 литра, т.е. затраты на каждого бройлера составили 9,71 литра, при учете среднего веса птицы при съеме на убой 2,5 килограмма определено количество воды необходимое для набора бройлером одного килограмма живого веса, составившее 3,88 л. Согласно РД-АПК 1.10.05.04-13 среднесуточный расход воды на одну голову составляет 0,24 л. В нашем случае среднесуточный расход воды составил 0, 23л.[5, 6, 9].

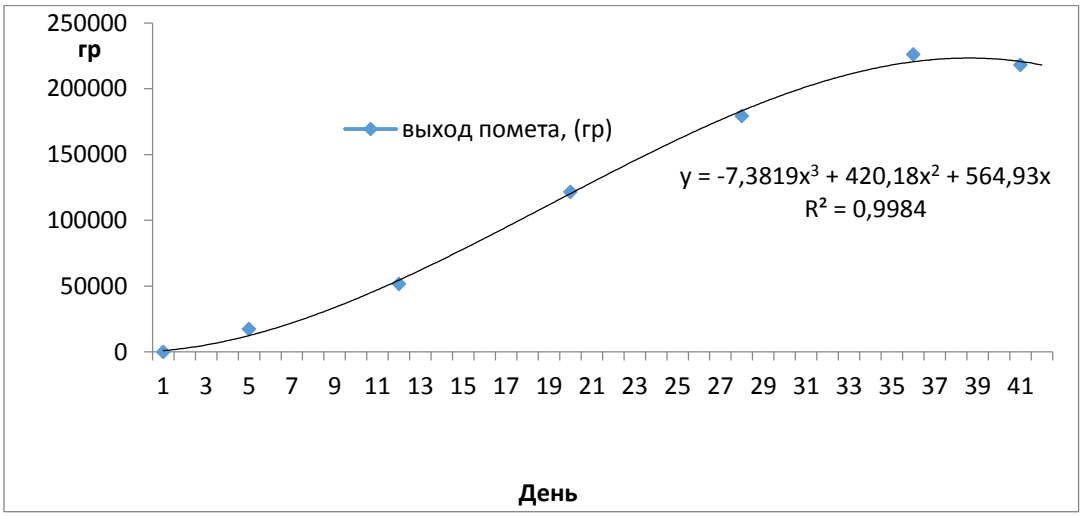

Рис. 5. Выход помета

Согласно РД-АПК 1.10.05.04-13 среднесуточное количество помета от бройлера в возрасте от 1 до 8 недель составляет 135 гр./сут. Согласно экспериментальным данным выход помета в технологическом модуле от одного бройлера составил 86 гр./сут. рис.5, разница между экспериментальным и нормативным показателем составила 36% [10].

Выводы

Основываясь на полученных данных и показателях РД-АПК 1.10.05.04-13 мы смогли оценить новую технологию выращивания бройлеров в технологических модулях. Согласно РД-АПК 1.10.05.04-13 среднесуточный расход воды на одну голову 0,24 л. В технологическом модуле среднесуточный расход воды находился на уровне 0,23 л. Разница составила 4,2%. Выход помета от одного бройлера в технологическом модуле составил 86 гр./сут. Разница с нормативным показателем составляет 36%, что связано с хорошей усвояемостью корма. Потребление комбикорма одним бройлером, за полный цикл выращивания (42 дня) в технологическом модуле составило 3,59 кг. Показатель конверсии корма 1,44 при среднем убойном весе 2,5 кг свидетельствует о высоком качестве обслуживания птицы и правильно подобранном рационе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1.Мясо и субпродукты [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://specagro.ru/analytics/202208/daydzhest-myaso-minselkhoz-rossii-prorabatyvaet-dopolnitelnye-mery-podderzhki (дата обращения 15.09.2022).

2. Пахомов В.И., Рудой Д.В., Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Ольшевская А.В. Технологии и оборудование для производства комбикормов и премиксов: учебное

пособие. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. 228 с.
3. Сошнев Д.А., Трифанов А.В., Соколов А.М., Плаксин И.Е. Эффективность выращивания бройлеров в технологическом модуле. Journal of Agriculture and Environment. 2022. № 4 (24). DOI 10.23649/jae.2022.4.24.06.
4. Плаксин И. Е., Трифанов А. В. Модульные технологии содержания и выращивания сельскохозяйственных животных и птиц на мелкотоварных предприятиях. СПб: ИАЭП - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2021. 136 с.
5. Методические рекомендации по технологическому проектированию птицеводческих предприятий РД-АПК 1.10.05.04-13. М.: Росинформагротех. 2013. 217 с.
6. Бункерные кормушки для кур [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://stroy-podskazka.ru/kury/bunkernye-kormushki/ (дата обращения 15.09.2022)
7. Трифанов А.В., Базыкин В.И., Плаксин И.Е., Сошнев Д.А.. Перспективы развития органического животноводства в Северо-Западном регионе России // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 1(110). С. 178-190. DOI: 10.24412/2713–2641–2022–1110–178–190
8. Трифанов А.В., Сошнев Д.А., Плаксин И.Е., Соколов А.М. Влияние температуры окружающей среды на микроклимат внутри технологических модулей для выращивания кроликов и птицы // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 47. С. 97-101.
9. Справочник по выращиванию бройлеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/RUS_TechDocs/Ross-BroilerHandbook2018-RU.pdf (дата обращения 15.09.2022).
10. Плаксин И.Е., Трифанов А.В. Обоснование технико-экономических параметров технологического модуля для откорма цыплят бройлеров. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 95. С. 181-188.

REFERENCES

1. *Myaso i subprodukty* [Meat and by-products]. Available at: https://specagro.ru/analytics/202208/daydzhest-myaso-minselkhoz-rossii-prorabatyvaet-dopolnitelnye-mery-podderzhki (accessed 15.09.2022) (In Russian)
2. Pakhomov V.I., Rudoi D.V., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Olshevskaya A.V. *Tekhnologii i oborudovanie dlya proizvodstva kombikormov i premiksov: uchebnoe posobie*. [Technologies and equipment for complete feed and premixes production: textbook]. Rostov-on-Don: DSTU, 2019. 228 p. (In Russian)
3. Soshnev D.A., Trifanov A.V., Sokolov A.M., Plaksin I.E. Effektivnost' vyrashchivaniya broilerov v tekhnologicheskom module [Efficiency of broiler farming in a process module]. *Journal of Agriculture and Environment*. 2022. No. 4 (24) (In Russian) DOI 10.23649/jae.2022.4.24.06.
4. Plaksin I. E., Trifanov A. V. *Modul'nye tekhnologii soderzhaniya i vyrashchivaniya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh i ptits na melkotovarnykh predpriyatiyakh* [Modular technologies of housing and rearing of farm animals and poultry on small-scale farms]. Saint Petersburg: IEEP – branch of FSAC VIM, 2021. 136 p. (In Russian)

5. *Metodicheskie rekomendacii po tekhnologicheskomu proektirovaniyu pticevodcheskih predpriyatij RD-APK 1.10.05.04-13* [Management Directive for Agro-Industrial Complex 1.10.05.04-13. Recommended Practice for Engineering Designing of Poultry Farms]. Moscow: Rosinformagrotekh, 2013: 217 (In Russian)
6. Bunkernye kormushki dlya kur [Bunker feeders for chickens]. Available at: https://stroy-podskazka.ru/kury/bunkernye-kormushki/ (accessed 15.09.2022) (In Russian)
7. Trifanov A.V., Bazykin V.I., Plaksin I.E., Soshnev D.A.. Perspektivy razvitiya organicheskogo zhivotnovodstva v Severo-Zapadnom regione Rossii [Prospects for the development of organic animal husbandry in the North-Western Region of Russia]. *AgroEkoInzheneriya*. 2022. No. 1(110): 178-190. (In Russian) DOI: 10.24412/2713–2641–2022–1110–178–190
8. Trifanov A.V., Soshnev D.A., Plaksin I.E., Sokolov A.M. Vliyanie temperatury okruzhayushchei sredy na mikroklimat vnutri tekhnologicheskikh modulei dlya vyrashchivaniya krolikov i ptitsy [The insolation effect on the technological modules' inside temperature for rabbits and poultry growing]. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*. 2022. No. 47: 97-101 (In Russian)
9. Spravochnik po vyrashchivaniyu broilerov [Reference book on growing broilers]. Available at: https://ru.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/RUS_TechDocs/Ross-BroilerHandbook2018-RU.pdf (accessed 15.09.2022) (In Russian)
10. Plaksin I.E., Trifanov A.V. Obosnovanie tekhniko-ekonomicheskikh parametrov tekhnologicheskogo modulya dlya otkorma tsyplyat broilerov [Justification of technical and economic parameters of technological module for broilers]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. No. 95: 181-188 (In Russian)

УДК 66.097.3 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-129-140

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ЖИВОТНОВОДЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

К.Д. Семенов Ю.Н. Сидыганов, д-р. техн. наук
А.А. Медяков, канд. техн. наук Е.М. Онучин канд. техн. наук

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия

Рассмотрена проблема сокращения объема энергии, потребляемой животноводческими комплексами на отопление, за счет использования беспламенного подогревателя, основным видом топлива для которого является биогаз, получаемый в результате сбраживания животноводческих стоков в биогазовых установках, находящихся на территории комплекса. В статье представлен вариант конструктивного исполнения

беспламенного подогревателя для поддержания необходимого температурного режима в помещениях животноводческого комплекса. Беспламенный подогреватель рассматривается как основное устройство для обеспечения животноводческого комплекса теплом. Для проведения вычислительного эксперимента на разработанной математической модели был составлен план эксперимента, определены и распределены на пять групп входные величины, характеризующие различные параметры исследуемого объекта. Результатом математического моделирования стали уравнения линий аппроксимации для объема газа, потребляемого беспламенным подогревателем, при различных температурах циркулирующего воздуха – 150 ^{o}C, 160 ^{o}C, 170 ^{o}C. При температуре 150 ^{o}C цикл работы подогревателя (включение/ отключение) отсутствует; при 160 ^{o}C и 170 ^{o}C цикл работы составляет 110 с. и 55 с., соответственно.

Ключевые слова: беспламенный подогреватель, биогаз, животноводческий комплекс, система обогрева.

Для цитирования: Семенов К.Д., Медяков А.А., Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М. Моделирование работы системы обогрева производственных помещений животноводческого комплекса // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3(112). С.129-141

MODELING OF THE HEATING SYSTEM FOR PRODUCTION FACILITIES IN A CATTLE-REARING COMPLEX

K.D. Semenov
A.A. Medyakov, Cand. Sc. (Engineering)
Y.N. Sidyganov, DSc (Engineering)
E.M. Onuchin Cand. Sc. (Engineering)

Volga State University of Technology, Yoshkar Ola, Russia

The article deals with the problem of reducing the amount of energy consumed by a livestock complex for heating by using a flameless biogas-fueled heater. The biogas is produced by fermentation of livestock wastewater in special plants located on the complex territory. The article presents a structural option of a flameless heater designed to maintain the required temperature regime in the rooms of a cattle-rearing complex. A flameless heater is considered the main device to supply heat to the cattle-rearing complex. For a computational experiment with the created mathematical model, the plan of the experiment was drawn up, the input values were determined and distributed into five groups characterizing various parameters of the object under study. The result of mathematical modeling was the equations of approximation lines for the gas volume consumed by the flameless heater at various temperatures of the circulating air – 150 ^{o}C, 160 ^{o}C, and 170 ^{o}C. At 150 ^{o}C, the heater operation cycle (on/ off) is not in place. At 160 ^{o}C and 170 ^{o}C the operation cycles were 110 sec. and 55 sec., respectively.

Key words: flameless heater, biogas, livestock complex, heating system.

For citation: Semenov K. D., Medyakov A. A., Sidyganov Yu. N., Onuchin E. M. Modeling of the heating system for production facilities in a cattle-rearing complex. *AgroEcoEngineeriya*. 2022. No. 3(112): 129-141 (In Russian)

Введение

Сельское хозяйство входит в число важнейших отраслей народного хозяйства и является наиболее энергоемкой [1, 2]. При этом значительное количество потребления энергоресурсов в сельском хозяйстве приходится на отрасль животноводства. Основные энергетические затраты предприятий животноводства связаны с обеспечением технологических процессов, таких как выращиванием животных, с подготовкой кормов, с обработкой продуктов производства и отходов, а также поддержанием необходимого микроклимата в помещениях для содержания животных. [3, 4]

На основании изложенной цели одним из вариантов, который позволит комплексно решить проблему повышения энергоэффективности животноводческих хозяйств является комбинирование системы отопления и вентиляции комплекса с каталитическим устройством сжигания биогаза [5].

По сравнению с устройствами сжигания органических топлив более эффективными являются *беспламенные устройства сжигания*. К преимуществам беспламенных устройств относятся:

1) полнота сжигания топлива, которая способствует повышению эффективности процесса горения;

2) снижение температуры процесса горения, которое обеспечивает конструктивные преимущества беспламенных устройств горения;

3) сокращение выбросов вредных газов в атмосферу в связи со снижением температуры горения и более полным сжиганием топлива. [6]

В качестве беспламенных устройств для низкотемпературного окисления возможно использование существующих разработок и изделий.

Термостабильный катализатор очистки газов ИКТ-12-40, разработанный в Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. Данный катализатор не содержит в своем составе драгоценные металлы, также обладает уникальной термостабильностью, высокой каталитической активностью и высокой механической прочностью. [7]

Автомобильные каталитические нейтрализаторы различных производителей, применяющиеся для очистки выхлопных газов автомобиля. Недогоревшие остатки (CO, CH, NO) касаясь поверхности каталитического слоя, вступают в химическую реакцию и окисляются кислородом, присутствующим в выхлопных газах. В результате реакции выделяется разогревающее катализатор тепло, и, тем самым, активизируется реакция окисления. В конечном итоге на выходе выхлопные газы содержат в основном N_2 и CO_2 [8]

Каталитические теплофикационные устройства (КТУ), разработанные в Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. Каталитический реактор КТУ. Установка работает при температуре свыше 800^0C, при этом одновременно производится отвод тепла путем введения теплообменных поверхностей непосредственно в псевдоожиженный слой катализатора. [9]

Каталитический газовый обогреватель Термокат-2М. Экономичный автономный обогреватель, работающий на бытовом газе (пропан-бутановая смесь). Обеспечивает экологическую чистоту сгорания газа без образования токсичных соединений. [10]

Экологически чистый теплогенератор. Принцип действия теплогенератора основан на двухстадийном сжигании жидкого или

газообразного топлива (природный газ). Обеспечивает экономию и экологическую чистоту сгорания топлива, имеет пониженную металлоемкость, надежен в эксплуатации [11].

Для достижения поставленной цели предлагается использовать особенности функционирования биогазовых установок, как наиболее перспективных устройств для конверсии органических отходов в животноводческих хозяйствах, беспламенный подогреватель, как наиболее эффективное устройство для утилизации продуктов конверсии органических отходов, и обогреваемого объекта. Для выбранных устройств была разработана схема обогрева объекта с использованием беспламенного подогревателя (рис. 1).

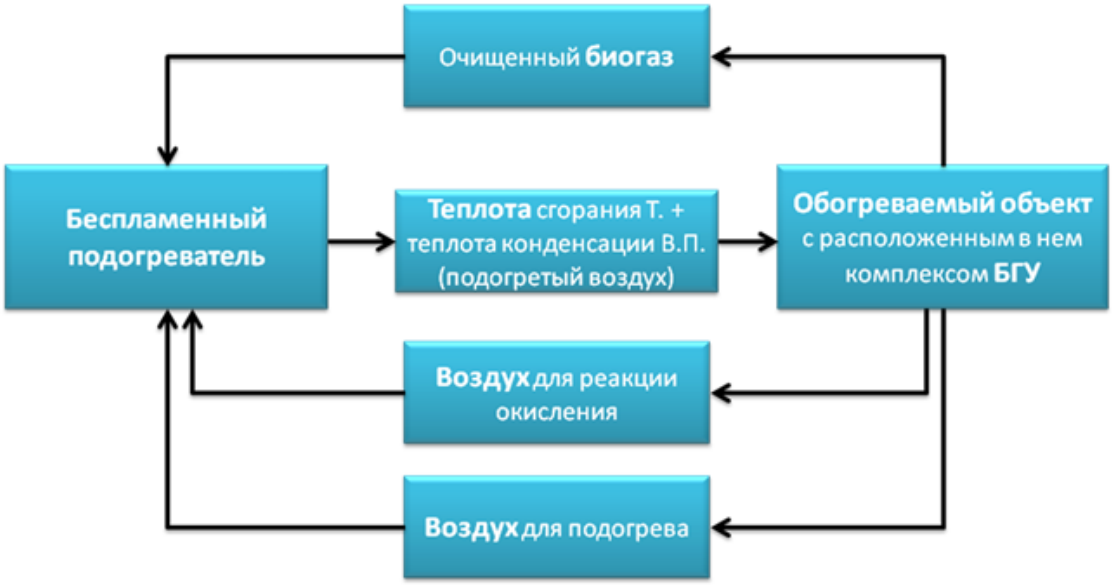

Рис. 1. Схема обогрева объекта с использованием беспламенного подогревателя

Конструкция биогазовой установки выбрана на основания результатов, представленных в работе [5], в рамках которой описана наиболее перспективная с энергетической точки зрения биогазовая установка с барботажным перемешиванием подогретым биогазом.

При этом конструкции представленных подогревателей позволяют обеспечить требуемые параметры микроклимата в помещении [3,4], в том числе содержание углекислого газа, температура воздушных потоков в зоне содержание животных и работы персонала. Указанные параметры планируется достичь путем организации подачи свежего воздуха и удаления газообразных продуктов жизнедеятельности.

Из обогреваемого объекта, в котором расположен комплекс биогазовых установок, в беспламенный подогреватель поступают очищенный биогаз и воздух для реакции окисления, которые при взаимодействии на поверхности подогревателя выделяют теплоту и уходящие после процесса горения газы. Уходящие газы смешиваются с подогреваемым воздухом и полностью передают ему теплоту сгорания топлива, том числе и теплоту конденсации водяных паров. Затем подогретый воздух возвращается обратно в обогреваемый объект для поддержания необходимой температуры.

На рис. 2 представлена предлагаемая конструкция беспламенного подогревателя воздуха в объекте, реализующего предложенную схему.

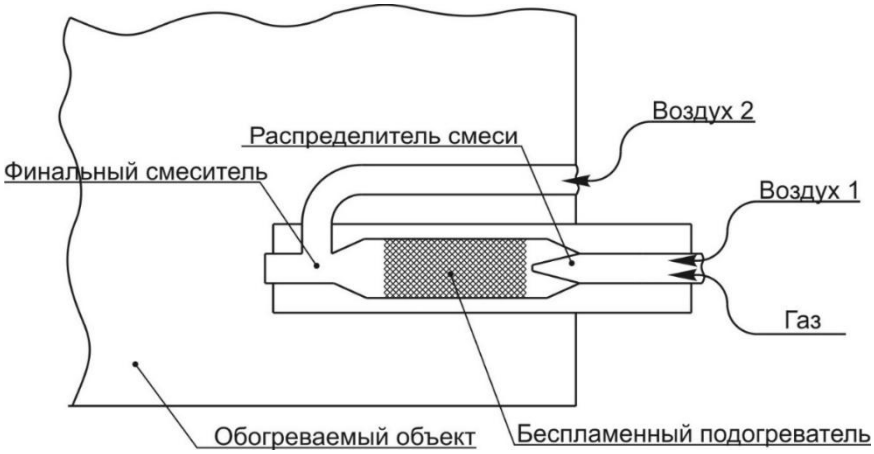

Рис. 2. Беспламенный подогреватель воздуха в объекте

В беспламенный подогреватель, встроенный в обогреваемый объект, подается смесь топлива с воздухом. Топливом является очищенный биогаз – результат биоконверсии органических отходов. В результате реакции беспламенного горения топливо полностью сгорает до паров воды и углекислого газа, которые непосредственно подаются в обогреваемый объект. В процессе охлаждения продуктов горения в обогреваемом объекте полностью утилизируется теплота сгорания топлива, в том числе теплота конденсации водяных паров. Однако для предотвращения перегрева беспламенного подогревателя и поддержания необходимой для реакции беспламенного горения температуры в подогреватель подается воздух I в количестве достаточном для стехиометрического сгорания очищенного биогаза и для поддержания температуры подогревателя постоянной. В результате из беспламенного подогревателя выходит смесь уходящих после процесса горения газов и избыточного воздуха с температурой равной температуре беспламенного подогревателя. Затем происходит смешивание выходящей из подогревателя смеси газов и воздуха II в количестве необходимом для поддержания постоянной температуры подогретого воздух, подаваемого в обогреваемый объект.

Материалы и методы

Для проведения теоретических исследований была разработана математическая модель с использованием среды Microsoft Excel и Visual Basic. В рамках разработанной модели исследовались циклы работы подогревателя при обогреве объекта.

Вычислительный эксперимент проводился в следующем порядке:

1) выбор входных данных;

2) выбор элементарного периода времени и числа циклов моделирования;

3) запуск процесса моделирования для выбранного числа циклов;

4) формирование таблиц данных и построение графиков.

Входные данные, используемые в разработанной математической модели, относятся к пяти группам параметров:

1) характеристики внешних условий (температуры окружающей среды);

2) характеристики объекта (площадь теплопередачи объекта, масса составляющих объекта);

3) характеристики режима обогрева (максимальная и минимальная температуры внутри объекта, объем/масса циркулирующего воздуха, температура циркулирующего воздуха на входе в объект);

4) параметры, характеризующие работу беспламенного подогревателя

воздуха (площадь теплопередачи подогреватель – окружающая среда, температура подогревателя, нач. температура топлива, нач. температура окислителя);

5) параметры, характеризующие тепловое и массовое взаимодействие в рамках модели (коэффициент теплопередачи от объекта к окружающей среде, удельная теплоемкость составляющих объекта, теплоемкость циркулирующего воздуха, коэффициент теплопередачи подогреватель – окружающая среда, удельная теплоемкость ух. газа CO_2, удельная теплоемкость ух. газа H_2O, высшая удельная теплота сгорания топлива, удельная теплоемкость топлива, удельная теплоемкость окислителя, температура беспламенного горения.

Температуры окружающей среды принималась равной 20°С.

Площадь теплопередачи объекта определяется по его геометрическим размерам, а масса по его объему, умноженному на плотность составляющих. Для моделирования выбрана емкость объемом 2 м^3. Емкость заполнена воздухом. Справочные данные по воздуху приводятся в работах [12].

Максимальная и минимальная температуры внутри объекта выбираются следующие: максимальная температура 27,5 °С, минимальная температура 22,5 °С. Масса циркулирующего воздуха принимается равной 250 л/мин. Температура циркулирующего воздуха на входе в объект выбирается на основе решения упрощенного теплового баланса для объекта моделирования, определяется минимальная необходимая температура циркулирующего воздуха для поддержания постоянной температуры объекта. Моделирование проводилось для трех значений температур, отличающихся от минимально необходимой (155°С): для 150 °С, для 160 °С, для 170 °С.

Площадь теплопередачи между беспламенным подогревателем и окружающей средой берется в соответсвии с геометрическими размерами подогревателя 0,18 м^2. Начальные температуры топлива (CH_4) и окислителя (O_2) принимаются равными температуре окружающей среды 20°С.

Параметры, характеризующие тепловое и массовое взаимодействие в рамках модели, вычисляются на основе зависимостей [13, 14] в соответствии со справочной литературой для воздуха [12], для процессов горения [15-17] и ограждающих конструкций [18].

Интервал моделирования для трех вычислительных экспериментов при температурах циркулирующего воздуха 150 °С, 160 °С, 170 °С принимается равным 0,1 секунда. Количество циклов моделирования первоначально было взято 15000 повторений, затем снижено до 5000. Для температуры циркулирующего воздуха 160 °С проведен дополнительный эксперимент с интервалом моделирования 0,01 секунды.

Результаты и обсуждение

Результаты вычислительного эксперимента представлены на графиках (рис. 3 – 5).

На графике (рис. 3) представлены циклы изменения температуры внутри объекта в диапазоне от минимальной до максимальной в процессе моделирования. В один цикл работы подогревателя входит:

– нагрев объекта до максимального значения температуры;

– выключение подогрева;

– постепенное охлаждение объекта до минимального значения температуры;

– включение подогрева.

Для процесса подогрева при температуре циркулирующего воздуха 150°С цикл нагрева-охлаждения отсутствует.

Температура внутри объекта за 20 с. снижается до минимального значения, после достижения которого происходит включение подогревателя. Затем в течение 130 с. температура внутри объекта достигает постоянного значения 27°С. Это позволяет сделать вывод о том, что тепловая энергия, сообщаемая потоком циркулирующего воздуха с температурой 150°С, не покрывает тепловые потребности объекта при температуре выше 27°С, что не позволяет нагреть объект до максимального значения температуры внутри объекта.

Для процесса подогрева при температуре циркулирующего воздуха 160°С цикл нагрева-охлаждения составляет 140 с. Из них 110 с. составляет нагрев объекта до максимальной температуры, 30 с. – свободное охлаждение объекта. Тепловая энергия, сообщаемая потоком циркулирующего воздуха с температурой 160°С, покрывает тепловые потребности объекта, что позволяет нагреть объект до максимального значения температуры внутри объекта 27,5°С. Однако при приближении к максимальному значению температуры внутри объекта (27,5°С) скорость нагрева существенно снижается, это связано с увеличением потерь в окружающую среду (пропорциональным разности температур между окружающей средой и объектом).

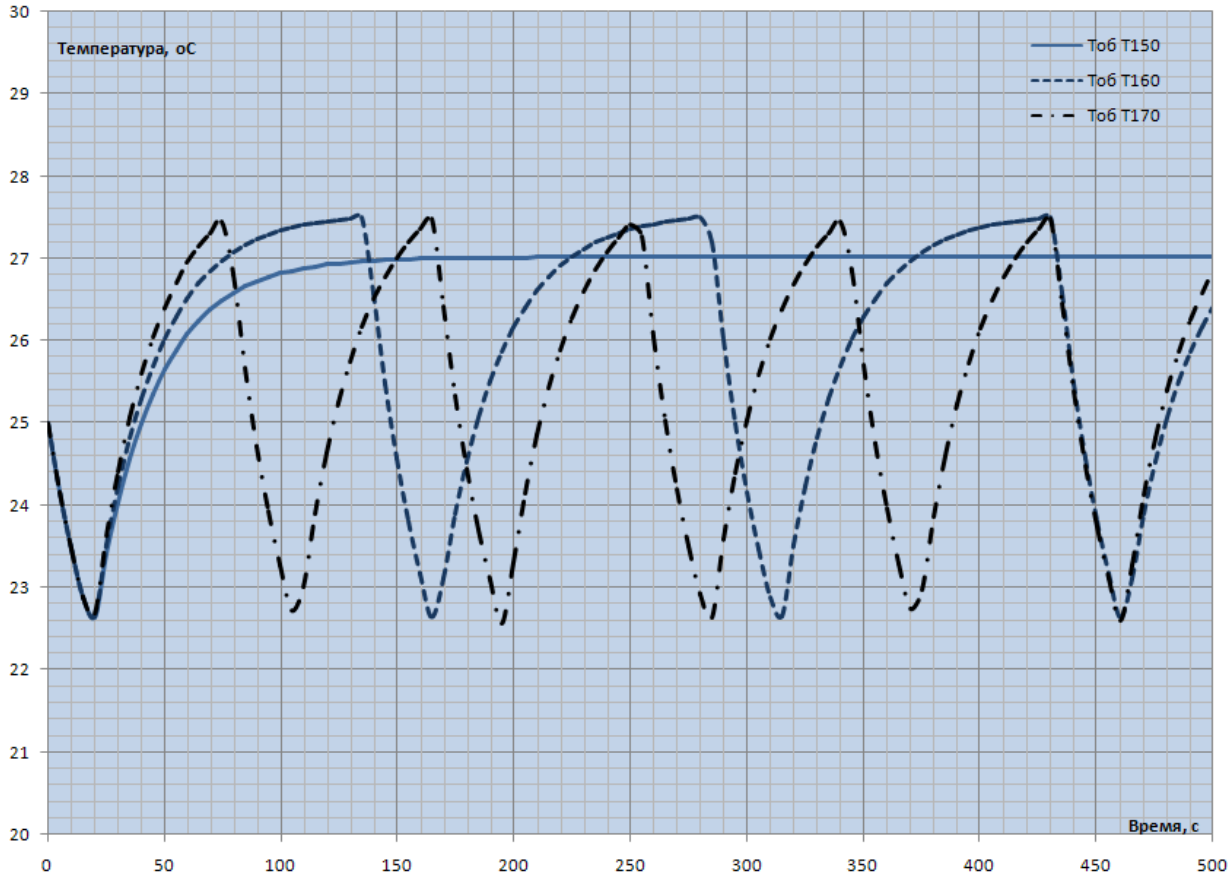

Рис. 3. Графики изменения температуры объекта в процессе моделирования

Для процесса подогрева при температуре циркулирующего воздуха 170°С цикл нагрева-охлаждения составляет 85 с., это в 1,6 раза меньше, чем при температуре циркулирующего воздуха 160°С. Из них 55 с. составляет нагрев объекта до максимальной температуры (в 2 раза меньше, чем при температуре 160 °С), 30 с. – свободное охлаждение объекта. Сокращение времени цикла за счет сокращения времени нагрева,

связанное с увеличением температуры циркулирующего воздуха, а соответственно и теплоты, передаваемой циркулирующим воздухом объекту за интервал моделирования.

Причем время свободного охлаждения остается постоянным для двух последних графиков, потому что оно не зависит от режима обогрева, а характеризуется только параметрами объекта и условиями окружающей среды.

На графике (рис. 4) отображены изменения потребления метана беспламенным подогревателем в процессе моделирования. Графики для всех трех значений температур циркулирующего воздуха являются аналогичными. Они наглядно иллюстрируют потребление топлива, необходимого для нагрева циркулирующего воздуха. В процессе нагрева объекта в каждом случае потребляется одинаковое количество метана, что иллюстрирует нагрев циркулирующего воздуха до заданной температуры. В период свободного охлаждения потребление метана равно нулю.

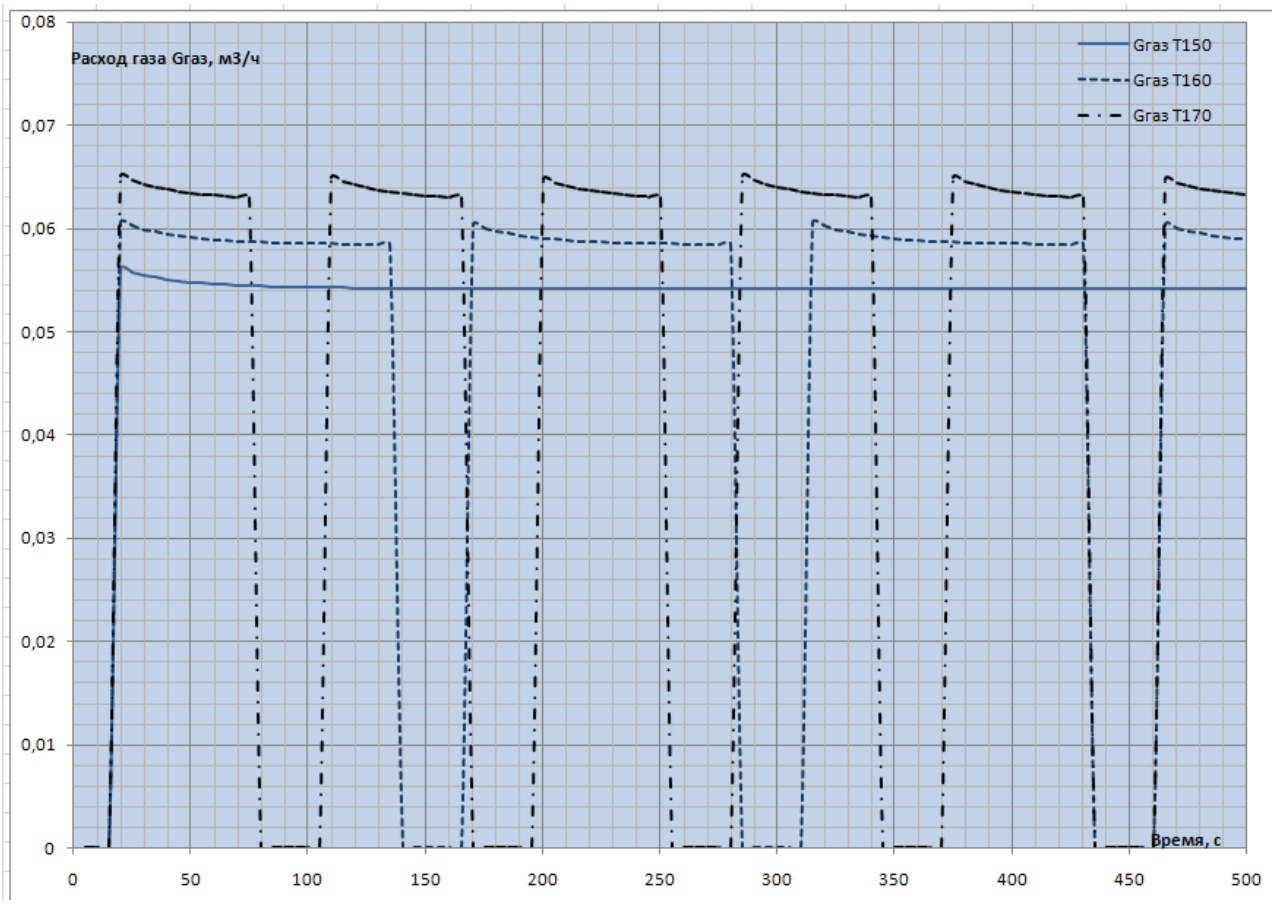

Рис. 4. Графики изменения потребления газа беспламенным подогревателем в процессе моделирования

График для циркулирующего воздуха с температурой 150°С характеризуется самым низким потреблением метана при обогреве – 0,054 м^3/ч. Для циркулирующего воздуха с температурой 160°С потребление метана при обогреве составляет 0,059 м^3/ч. А для циркулирующего воздуха с температурой 170°С потребление метана при обогреве составляет 0,064 м^3/ч. Увеличение потребления метана при увеличении температуры циркулирующего воздуха связано с увеличением количества теплоты, которое необходимо подвести к

циркулирующему воздуху за интервал моделирования.

На графике (рис. 5) представлены графики, показывающие объем метана, потребленного беспламенным подогревателем в каждый момент времени. На этих графиках циклы нагрева-охлаждения представлены в виде отрезков линейно увеличивающегося объема потребленного газа для процессов нагрева и отрезков постоянного объема для процессов свободного охлаждения. Уравнение линии аппроксимации для графика объема газа, потребляемого беспламенным подогревателем, при температуре циркулирующего воздуха 150°С имеет следующий вид:

$V_{газа} = 1,5*10^{-5}*t – 2,5*10^{-4}$

Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,999$.

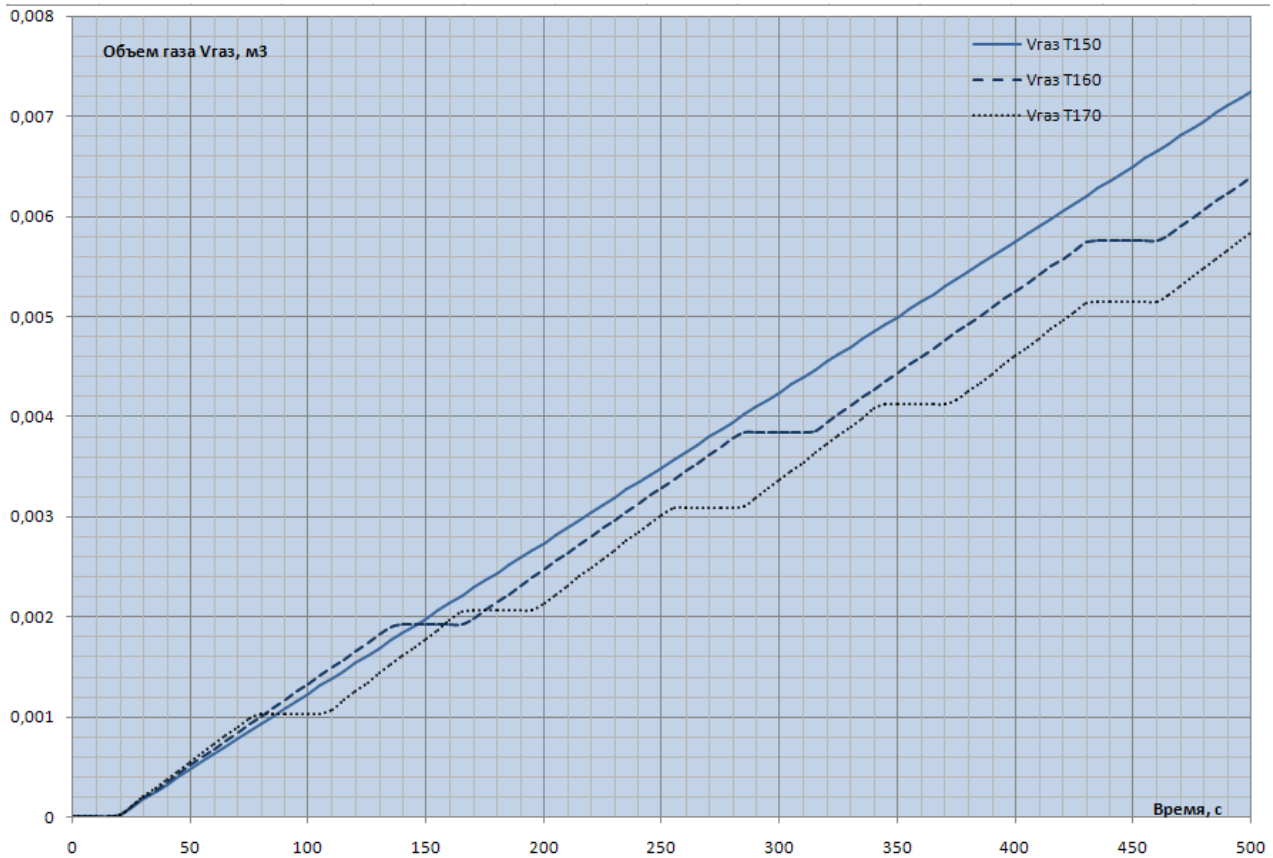

Рис.5. Графики объема газа, потребляемого беспламенным подогревателем, в процессе моделирования

Уравнение линии аппроксимации для графика объема газа, потребляемого беспламенным подогревателем, при температуре циркулирующего воздуха 160°С имеет следующий вид:

$V_{газа} = 1,3*10^{-5}*t – 6,8*10^{-5}$

Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,996$.

Уравнение линии аппроксимации для графика объема газа, потребляемого беспламенным подогревателем, при температуре циркулирующего воздуха 170°С имеет следующий вид:

$V_{газа} = 1,1*10^{-5}*t – 5,2*10^{-5}$

Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,996$.

Выводы

Предложена конструкция и описан принцип работы беспламенного

подогревателя для поддержания требуемой температуры внутри производственных помещений животноводческого комплекса, позволяющая сократить расходы энергии на обогрев производственного помещения по предварительным оценкам на 20%.

В предлагаемой схеме системы обогрева производственных помещений животноводческого комплекса беспламенный подогреватель рассматривается как основное оборудование, замещающее все оборудование для теплоснабжения.

В рамках проведенных математического моделирования и вычислительного эксперимента получены зависимости, характеризующие особенности работы системы обогрева производственных помещений животноводческого комплекса на базе предложенных беспламенных подогревателей. Для условий моделирования установлено, что при температуре циркулирующего воздуха на входе в объект 150°C система не выключается и поддерживает постоянную температуру 27°C. При этом повышение температуры циркулирующего воздуха на входе в объект на 5 ^{o}C (160°C) и 15 ^{o}C (170°C) приводит к формированию циклов работы системы обогрева (включение/выключение) продолжительностью 110 с. и 55 с. соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихомиров, Д. А., Тихомиров А. В. Распределенные системы энергоснабжения АПК // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 3(36). С. 3-10

2. Шакиров Ф.К. Организация производства на предприятиях АПК: учебник / под ред. Ф.К. Шакирова. М.: КолосС, 2008. 520 с

3. Андреев Л. Н., Жеребцов Б. В. Система автоматизации параметров воздушной среды животноводческих помещений // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 5(91). С. 133-138

4. Новиков Н. Н., Кольчик И. Е. Современное оборудование и технические средства обеспечения микроклимата на животноводческих фермах // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 1(37). С. 81-88

5. Онучин Е. М., Медяков А. А., Яблонский Р. В. Биогазовая установка с устройством для перемешивания и каталитического обогрева субстрата // Альтернативная энергетика и экология. 2010. №11. С. 91-94

6. Лукьянов Б. Н., Кузин Н. А., Кириллов В. А., Куликов В. А., Шигаров В. Б., Данилова М. М. Экологически чистое окисление углеводородных газов в каталитических нагревательных элементах // Химия в интересах устойчивого развития. 2001. № 9(5). С. 667-677

7. Катализатор ИКТ-12-40 (Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=88 (дата обращения 08.09.2022)

8. Все про катализаторы – каталоги, производители (Vincast) [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.vincast.ru/parts/catalyst#full (дата обращения 08.09.2022)

9. Пармон В.Н., Исмагилов З.Р., Кириллов В.А., Симонов А.Д. Каталитические теплофикационные устройства для решения экологических и энергетических проблем. Часть 1 // Катализ в промышленности. 2002. № 3. С. 20-29.

10. Каталитический обогреватель «Термокат-2М» (Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН) [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=90 (дата обращения 11.10.2022)

11. Теплогенератор (Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН) [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=111 (дата обращения 11.10.2022)

12. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика: учебник для вузов М.: МЭИ, 2008. 496 с.

13. Ерофеев В. Л., Пряхин А. С. , Семенов П. Д. Теплотехника в 2 т. Том 1. Термодинамика и теория теплообмена : учебник для вузов. М. : Издательство Юрайт, 2022. 308 с.

14. Крайнов А.Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества: учеб. пособие. Томск: STT, 2016. 48 с.

15. Гущин С.Н., Казяев М. Д. Расчеты горения топлива: учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ УПИ, 1995. 48 с.

16. Эквист Б. В. Теория горения и взрыва: учебник. М.: Издательский Дом МИСиС, 2018. 180 с.

17. Пашков Л. Т. Основы теории горения. М.: МЭИ, 2002. 125 с.

18.Стомахина Г. И. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: справочное пособие. М.: Пантори, 2003. 308 с.

REFERENCES

1. Tikhomirov, D. A., Tikhomirov A. V. Raspredelennye sistemy energosnabzheniya APK // [Distributed power supply systems for agriculture]. Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2019. No. 3(36): 3-10 (In Russian)

2. Shakirov F.K. Organizatsiya proizvodstva na predpriyatiyakh APK: uchebnik [Shakirov F.K. (ed.) Organization of production at agricultural enterprises: textbook]. Moscow: KolosS, 2008. 520 p. (In Russian)

3. Andreev L. N., Zherebtsov B. V. Sistema avtomatizatsii parametrov vozdushnoi sredy zhivotnovodcheskikh pomeshchenii [Automation system for the parameters of the air environment of livestock premises]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021. No. 5(91): 133-138 (In Russian)

4. Novikov N. N., Kolchik I. E. Sovremennoe oborudovanie i tekhnicheskie sredstva obespecheniya mikroklimata na zhivotnovodcheskikh fermakh [The modern equipment and technical means of providing the microclimate on livestock farms]. Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve. 2020. No. 1(37): 81-88 (In Russian)

5. Onuchin E. M., Medyakov A. A., Yablonskiy R. V. Biogazovaya ustanovka s ustroistvom dlya peremeshivaniya i kataliticheskogo obogreva substrata [The biogas unit with the device of stirring and catalytic heating of the substrate]. Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2010. No. 11: 91-94 (In Russian)

6. Lukyanov B. N., Kuzin N. A., Kirillov V. A., Kulikov V. A., Shigarov V. B., Danilova M. M. Ekologicheski chistoe okislenie uglevodorodnykh gazov v kataliticheskikh nagrevatel'nykh elementakh [Environmentally friendly oxidation of hydrocarbon gases in catalytic heating elements]. Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya. 2001. No. 9: 667-677 (In Russian)

7. Katalizator IKT-12-40 (Institut kataliza im. G. K. Boreskova SO RAN) [ICT-12-40 Catalyst (Federal Research Center, Boreskov Institute of Catalysis)]. Available at: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID= 3&SECTION_ID=88 (accessed 08.09.2022) (In Russian)

8. Vse pro katalizatory – katalogi, proizvoditeli (Vincast) [Everything about catalysts – catalogs, manufacturers (Vincast)] Available at: http://www.vincast.ru/parts/catalyst#full (accessed 08.09.2022.) (In Russian)

9. Parmon V.N., Ismagilov Z.R., Kirillov V.A., Simonov A.D. Kataliticheskie teplofikatsionnye ustroistva dlya resheniya ekologicheskikh i energeticheskikh problem. Chast' 1[Catalytic heating installations for solution of ecological and power problems. Part 1]. Kataliz v promyshlennosti. 2002. No. 3: 20-29 (In Russian)

10. Kataliticheskii obogrevatel' «Termokat-2M» (Institut kataliza im. G. K. Boreskova SO RAN) [Catalytic heater “Thermocat 2M” (Federal Research Center, Boreskov Institute of Catalysis)] Available at: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=90 (accessed 10.11.2022) (In Russian)

11. Teplogenerator (Institut kataliza im. G. K. Boreskova SO RAN) [Heat generator (Federal Research Center, Boreskov Institute of Catalysis)] Available at: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=111 (accessed 11.10.2022) (In Russian)

12. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E. Tekhnicheskaya termodinamika: uchebnik dlya vuzov [Technical thermodynamics: a textbook for universities]. Moscow: MEI, 2008. 496 p. (In Russian)

13. Erofeev V. L., Pryakhin A. S., Semenov P. D. Teplotekhnika v 2 t. Tom 1. Termodinamika i teoriya teploobmena : uchebnik dlya vuzov [Heat engineering in 2 volumes. Volume 1. Thermodynamics and the theory of heat transfer: a textbook for universities]. Moscow: Izdatel'stvo Yurait, 2022. 308 p. (In Russian)

14. Krainov A.Yu. Osnovy teploperedachi. Teploperedacha cherez sloi veshchestva: ucheb. posobie [Fundamentals of heat transfer. Heat transfer through a layer of matter: textbook]. Tomsk: STT, 2016. 48 p. (In Russian)

15. Gushchin S.N., Kazyaev M. D. Raschety goreniya topliva: uchebnoe posobie [Calculations of fuel combustion: textbook]. Ekaterinburg: UGTU UPI, 1995. 48 p. (In Russian)

16. Ekvist B. V. Teoriya goreniya i vzryva: uchebnik [Theory of combustion and explosion: textbook]. Moscow: Izdatel'skii Dom MISiS, 2018. 180 p. (In Russian)

17. Pashkov L. T. Osnovy teorii goreniya [Fundamentals of the Theory of Combustion]. Moscow: MEI, 2002. 125 p. (In Russian)

18. Stomakhina G. I. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha: spravochnoe posobie [Heating, ventilation and air conditioning: a reference guide]. Moscow: Pantori, 2003. 308 p. (In Russian)

УДК: 637.133.3 DOI 10.24412/2713-2641-2022-3112-141-148

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ ПАСТЕРИЗАЦИИ МОЛОКА

Каунова Л. М.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО ВГСХА), Великие Луки, Россия

Одним из наиболее важных и перспективных направлений сельскохозяйственного производства является молочное животноводство, так как только оно сможет в сложившихся экономически сложных условиях импортозамещения обеспечить потребности населения в незаменимом продукте питания отечественного производства. При этом самым перспективным направлением, на наш взгляд, является использование пастбищного содержания коров в летний период для условий Северо-запада Российской Федерации. Однако при использовании эффективной технологии стойлово-пастбищного содержания коров в данных экологических условиях особо важным нерешенным вопросом остается получение высококачественного молока, отвечающего современным требованиям к показателям качества продукта. В связи с ухудшением экологической обстановки в целом молоко, получаемое от животных, зачастую является уже бактериально обсемененным. И основная задача при его получении будет заключаться в снижение воздействия вредных микроорганизмов именно в парном молоке. Для теоретического расчета установки термообработки молока с индуктивным нагревателем использовалась конструкция трубчатого нагревателя, которая обеспечивала равномерный и быстрый нагрев молока при его движении в потоке. Задачей теоретического расчета было выявление математической зависимости конструкционных параметров индукционного сердечника от требуемой для обеспечения процесса пастеризации тепловой мощности при исключении неравномерности нагрева молока в потоке. Были определены параметры элементов конструкции: полная мощность однофазного нагревателя – 5,4 кВА; тепловая мощность нагревателя – 5,0 кВт; коэффициент мощности – 0,86; расчетная удельная мощность 11,0-11,2 Вт/л; расчетная производительность (для температуры пастеризации 78-80^{0}С) 430...450 л/ч. При этом длина нагревателя составила 1,1м. Данный расчет может быть использован при конструировании пастеризационных установок с индукционным нагревателем.

Ключевые слова: пастеризация, индукционный нагреватель, молоко, равномерный нагрев, тепловыделение.

Для цитирования: Каунова Л.М. Обоснование конструктивных параметров индукционного нагревателя для пастеризации молока // *АгроЭкоИнженерия.* 2022. № 3(112). С.141-148

SUBSTANTIATION OF THE DESIGN PARAMETERS OF AN INDUCTION HEATER FOR MILK PASTEURIZATION

L.M. Kaunova

Federal State Educational Institution of Higher Education “Velikiye Luki State Agricultural Academy”, Velikiye Luki, Russia

The current challenging environments feature the economic difficulty in import substitution. Only the dairy farming can meet the population needs of the in an irreplaceable domestic food item. In this regard, the summer pasture grazing of cows shows, in our opinion, the greatest promise in the conditions for the North-West of the Russian Federation. Yet, the effective practice of stall and pasture housing of cows involves a very important, still open issue of producing top-grade milk that would follow the modern quality requirements. The general environmental degradation often causes its bacterial contamination. So the major task will be to reduce the effect of harmful microorganisms in the fresh milk. The study used a tubular heater with a uniform and rapid in-flow heating of milk to perform theoretical calculations of the milk heat treatment unit with an inductive heater. The aim was to identify the mathematical dependences between the structural parameters of the induction core and the thermal power required to ensure the pasteurization process while avoiding the uneven in-flow heating of milk. The study determined the following parameters of the structural elements: 5.4 kVA total capacity of a single-phase heater; 5.0 kW thermal capacity of the heater; a power factor of 0.86; 11.0 to 11.2 W/l estimated specific capacity, and 430 to 450 l/h estimated throughput under the pasteurization temperature of 78-80 °C. The heater length was 1.1 m. This calculation could be applied to design the pasteurization units with induction heaters.

Key words: pasteurization, induction heater, milk, uniform heating, heat dissipation.

For citation: Kaunova L. M. Substantiation of the design parameters of an induction heater for milk pasteurization. *AgroEcoEngineeriya*. 2022. No. 3(112): 141-148 (In Russian)

Введение

Для бактериального обеззараживания применяется тепловая обработка молока, для сохранения свойств в специальных пастеризационных установках.

Пастеризацию осуществляют при температурах от 63 ^{0}С с выдержкой времени до 95 ^{0}С без выдержки. Временные и температурные режимы пастеризации можно выбрать в зависимости от продукта и технологического процесса. мы знаем, что пастеризация бактерицидный эффект (не менее 99,98% [1].

Для увеличения срока хранения молока на предприятиях молочной промышленности применяют различные виды пастеризационных установок прямого и косвенного нагрева. [2,3]

Существующие аппараты косвенного нагрева, для тепловой обработки молока, использующие в качестве промежуточного теплоносителя пар и горячую воду энергетически не эффективны, так как их использование сопряжено с дополнительными затратами по установке и обслуживанию паровых котлов-парообразователей, вспомогательного оборудования, сложной системой автоматизации поддержания технологических параметров, пожаро-взрывоопасностьюи

потерями теплоты при циркуляции теплоносителя в нагревательном контуре [4].

В отличии от водяных и паровых пастеризаторов при индукционном нагреве тепловая энергия выделяется в металлических частях нагревателя и передается напрямую омывающему их молоку. Таким образом тепловые потери в окружающую среду сводятся к минимуму. Установки пастеризации молока с индукционным нагревателем имеют большую энергоэффективностьи меньшую удельную мощность по сравнению с водяными и паровыми установками [5,6,7].

Внедрение энергоэффективной линии переработки молока позволит увеличить срок хранения молока, приведёт к улучшению его качества, а так же к экономичности технологического процесса, существенно снижая расход тепловой и электроэнергии, тем самым, уменьшая себестоимость готового продукта.

Использовать уже существующие конструкции индукционных нагревателей воды в целях пастеризации молока в потоке не представляется возможным, так как нагрев молока не равномерен по сечению нагревателя. Для устранения недостатков надо разработать индукционный нагреватель молока и учесть в конструкции требования, предъявляемые к процессу пастеризации [9].

Целью нашей работы является обоснование конструктивных параметров индукционного нагревателя молока в составе пастеризационной установки.

Материалы и методы

В работе используется методика решения дифференциального уравнения распределения теплового поля по сечению индукционного нагревателя.

Достижение поставленной цели обусловлено выполнением теоретического анализа процесса нагрева молока в потоке в индукционном нагревателе. Теоретические исследования посвящены получению зависимостей, обоснованию модели движения молока, влиянию термообработки на изменение температурного режима и выявлению рабочих параметров при обработке.

Молоко на ферме подвергается механическому и бактериальному загрязнению. Источники: пыль, чешуйки с кожи сосков, частицы подстилки, прилипшие к вымени, навоз и пр. Попадают многочисленные бактерии и микроорганизмы из воздуха и с подстилки, которые быстро размножаются.

Молоко является благоприятной средой для развития и размножения микробов – мельчайших организмов, большинство из которых невидимы вооружённым глазом. В свежевыдоенном молоке при различных способах его получения всегда находится то или иное количество микробов, которые попадают в него из вымени животных, с кожного покрова, а так же с молочных коммуникаций, оборудования для охлаждения и др.

В молоке, при строгом соблюдении санитарных правил, содержаться молочнокислые микро организмы. Свежевыдоенное молоко может содержать большое количество гнилостных и группы кишечной палочки. Непосредственно после доения размножение микроорганизмов в молоке не отмечается. Это объясняется тем, что в свежевыдоенном молоке имеются вещества, способные подавлять жизнедеятельность микробов и даже частично разрушать их. К таким веществам относятся лактенины, лактопироксидаза, агглютинины и др. Период, когда в молоке под действием указанных веществ бактерии не размножаются, называется бактерицидной фазой.

Молоко, полученное на фермах с хорошими гигиеническими условиями, сохраняет первоначальное количество бактерий на протяжении 3 часов при

температуре тела коровы (бактерицидная фаза).

Со средними гигиеническими условиями сохраняет свои микробиологические условия на уровне первого класса на протяжении 48 часов только при температуре 4…6^{0}С. В молоке, полученном с плохими гигиеническими условиями быстро накапливаются микроорганизмы (в том числе патогенные) при всех температурах хранения на протяжении 48 часов. При большем бактериальным обсеменением длительность бактерицидной фазы в молоке ограничивается 3 часами [11].

Установлено, что для обеспечения сохранности качества молока содержание бактерий в сыром молоке сразу после доения не должно превышать 1000000 штук в 1мл, при этом молоко должно иметь температуру при хранении 8…10 ^{o}С в течение 24 часов. При хранении свыше 24 часов температура молока должна составлять не более 3…5 ^{0}С.

Результаты и обсуждение

Для увеличения срока хранения молока-сырья и снижения его бак обсемененности применяют пастеризацию. Рассмотрим процесс нагрева молока в индукционном нагревателе пастеризационной установки (рис.1).

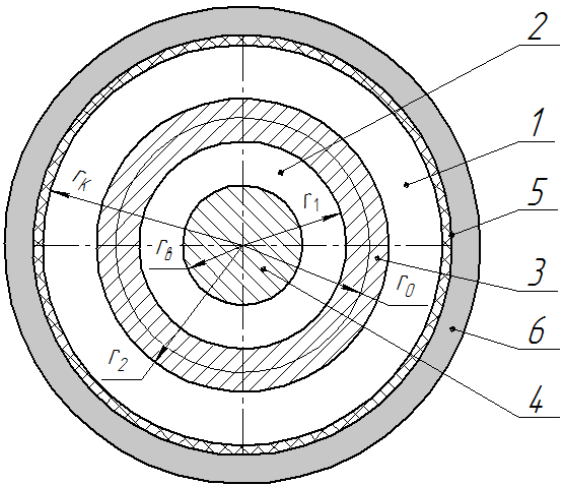

Рис. 1. Схема поперечного сечения индукционного нагревателя молока

1 – внешний кольцевой зазор; 2 – внутренний кольцевой зазор; 3 – труба-сердечник нагревателя; 4 – вытеснитель; 5 – корпус; 6 - индуктор.

Для расчета процесса нагрева молока возьмем бесконечно длинную цилиндрическую трубу, которая имеет внутренний радиус r_1, наружный радиус r_2, постоянный коэффициент теплопроводности λ, и неравномерно распределенные по объему цилиндрической трубы источники тепла производительностью q_v. Теплообмен с окружающей средой осуществляется, как с наружной, так и с внутренней поверхности. Поверхность теплообмена торцов трубы ввиду ее малой площади в расчете не учитывается.

Источником теплоты выступают вихревые токи, протекающие по замкнутому контуру в объеме металлической трубы нагревателя [10]. Распределение плотности тока по сечению трубы неравномерно и уменьшается в направлении от внешней поверхности к внутренней. На радиусе r_0 в слое с максимальной температурой t_{max} находится изотермическая поверхность, разделяющая тепловые потоки на два направления – к внутренней поверхности трубы q_1 и к наружной q_2. Введем понятие среднего тепловыделения в единице объема для наружного q_{v1}и внутреннего слоя q_{v2}.

Для упрощения модели примем, что интервале $r_0 \ldots r_2$.
q_{v1}=const в интервале $r_1 \ldots r_0$, а q_{v2}=const в

Следовательно, среднюю тепловую производительность можем определить по формулам(1) и (2):

- для внутреннего слоя:

$$q_{v1} = \frac{\int_{r_1}^{r_0} q_v dr}{r_0 - r_1}, \quad (1)$$

где q_{v1} – средняя тепловая производительностьпо внутреннему слою, Вт/м^3;q_v – тепловая производительность на радиусеr, Вт/м^3;r_0 – изотермический радиус, м;r_1 – радиус внутренней поверхности трубы, м;

- для наружного слоя:

$$q_{v2} = \frac{\int_{r_0}^{r_2} q_v dr}{r_2 - r_0}, \quad (2)$$

где q_{v2} – средняя по наружному слою тепловая производительность, Вт/м^3;r_2 –радиус наружной поверхности трубы, м.

Для определения неизвестной величины r_0 решим уравнение, описывающее процесс теплопроводности в нагревателе [4].

$$\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt}{dr} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad (3)$$

где t - температура в точке с радиусомr, ^{0}C;λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Чтобы выразить r_0необходимо ввести коэффициент неравномерности тепловых потоков с внутренней и внешней поверхностей трубы, равный отношению теплового потока с наружной поверхности трубы к внутренней

$$k=q_2/q_1, \quad (4)$$

Тогда коэффициент неравномерности потоков будет определяться из выражения

$$k_H = \frac{r_2}{r_1} + k_C. \quad (5)$$

Величина k определяется экспериментально для цилиндрических труб разной толщины и диаметров. На входе и выходе мы замерили разность температур молока.

Используя выражение (3) найдем величину r_0

$$r_0^2 = \frac{kq_{v2}r_2^2 + q_{v1}r_1^2}{q_{v1} + kq_{v2}} \quad (6)$$

Трубу для изготовления нагревателя возьмем из стандартного ряда типоразмеров стального проката. Расчет параметров нагревателя можно свести к определению внутреннего радиуса корпуса, вытеснителя и длины нагревателя.

Для схемы, приведенной на рис. 1, тепловые мощности$P_{ПТ1}$ и $P_{ПТ2}$, получаемые потоками жидкости в кольцевых зазорах находятся из выражений

$$\begin{cases} P_{ПТ1} = q_{T1}F_T^B = W_1 c \cdot (t_2 - t_1) = V\pi \cdot c \cdot (t_2 - t_1)(r_1^2 - r_B^2) \\ P_{ПТ2} = q_{T1}F_T^H + q_K F_K = W_3 c \cdot (t_2 - t_1) = V\pi \cdot c \cdot (t_2 - t_1)(r_K^2 - r_2^2) \end{cases} \quad (7)$$

где $P_{ПТ1}$ - тепловая мощность в зазоре,ограниченном радиусамиг$_B$ и r_1, Вт;$P_{ПТ2}$ - тепловая мощностьв зазоре, ограниченном радиусами r_2 и r_K, Вт;$q_{т1}$- тепловой поток с

поверхности трубы, Вт/м^2;F_T^B, F_T^H – площади поверхности трубы нагревателя, м^2;V– скорость движения молока через кольцевые зазоры, м/с;с – теплоемкость молока, Дж / (кг·К);$q_к$ - тепловой поток создаваемый, обмоткой индуктора, Вт/м^2.

Тепловой поток, создаваемый при протекании электрического тока индукторанаходим по формуле

$$q_K = \frac{P_{об}}{F_K} = \frac{I_1^2 R}{2 \cdot \pi \cdot r_K \cdot l_K}. \quad (8)$$

где $P_{об}$ - мощность выделяющаяся в индукторе при работе, Вт;F_K – часть площади корпуса участвующая в теплообмене с молоком, м^2;I_1–сила тока обмотки индуктора, А;R - сопротивление переменному току обмотки индуктора, Ом;l_K - длина корпуса, м.

Из системы уравнений (7) найдем r_K и r_B

$$r_B = \sqrt{r_1^2 - \frac{2 q_{T1} r_1 l}{V \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}}, \quad (9)$$

$$r_K = \frac{q_K l + \sqrt{q_K^2 l^2 + V^2 c^2 (t_2 - t_1)^2 r_2^2 + 2V \cdot c \cdot (t_2 - t_1) q_T l \cdot r_2}}{V \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}. \quad (10)$$

Длина трубы

$$l = \frac{P_T}{\pi (q_1 r_2 + q_2 r_1)}, \quad (11)$$

где P_T - тепловая мощность, которая выделяется в трубе нагревателя, Вт.

По приведенным выше теоретическим расчетам и для их подтверждения в лаборатории Великолукской ГСХА была разработана экспериментальная установка пастеризации молока индукционным нагревом [8].

Изготовление экспериментальной установки было произведено на базе ПМР-02-ВТ с модернизацией нагревателя. Штатный гидродинамический нагреватель был заменен на экспериментальный индукционный.

Выводы

Установленные технические характеристики установки для пастеризации молока с индукционным нагревателем: полная мощность однофазного нагревателя – 5,4 кВА; тепловая мощность нагревателя – 5,0 кВт; коэффициент мощности – 0,86; расчетная удельная мощность 11,0-11,2 Вт/л; расчетная производительность (для температуры пастеризации 78-80^{0}С) 430...450 л/ч [2]. При этом геометрические размеры нагревателя составили: r_2=21мм; r_1 – 17мм; r_0 – 19,3мм; $r_к$ – 25мм; $r_в$ – 10мм; длина нагревателя *l* – 1,1м.

Для определения параметров и режима работы индукционного нагревателя молока можно использовать представленный в статье порядок расчета. Полученные нами энергетические и технические характеристики индукционного нагревателя показали перспективность разработки и исследования индукционных установок для нагрева молока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крусь Г.Н., Храмцов А.Г., Волокитина З.В., Карпычев С.В. Технология молока и молочных продуктов / Под ред. А.М. Шалыгиной. М.: КолосС, 2006. 455 с.

2. Соловьёв С.В., Морозов В. В., Радкевич Е. В., Карташов Л. П., Макаровская З. В. Обоснование параметров конструктивных элементов индукционного нагревателя для

пастеризации молока в потоке // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2019, №1. С. 100-103

3. Ведищев С.М., Милованов А.В. Технологии и механизация первичной обработки и переработки молока: учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 152 с.

4. Бузоверов С. Ю., Воробьев Ф. Н. Анализ процесса термообработки и модернизация технологического оборудования для переработки молока // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2016. № 10(144). С. 142-146.

5. Бобровский, С. О., Багаев А. А. Перспективы применения индукционного нагрева для пастеризации молока / *Аграрная наука - сельскому хозяйству*: Сб. матер. XVI Международной научно-практической конференции в 2 кн., Барнаул, 09-10 февраля 2021 г. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2021. С. 6-7.

6. Немков В.С., Демидович В.Б.. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энероатомиздат. 1988. 280 с.

7. Шутов А.А. Обоснование необходимости тепловой обработки молока-сырья на ферме и результаты экспериментальных исследований по оптимизации установки для термизации // *Молодой ученый*. 2010. №12-1. С. 46-48.

8. Макарова Г.В., Соловьев С.В. Экспериментальное исследование пастеризационной установки с индукционным нагревателем // *Аграрная наука XXI века: проблемы и перспективы*. Материалы Международной научно-практической конференции. 18-19 апреля 2013 года. Великие Луки: ВГСХА. 2013. С. 315-319.

9. Лосяков К.А., Каунова Л.М. Оптимизация конструктивных параметров трехфазного индукционного нагревателя жидкости / *Приоритетные направления развития АПК и сельских территорий*. Материалы научно-практической конференции. Великие Луки: ВГСХА. 2021. С. 58-61

10. Макарова Г. В., Соловьёв С.В., Шилин В.А. Индукционный нагреватель жидкости с выдерживателем. Патент на полезную модель RU 137709 U1. Заявлено 10.07.2013, опубликовано 27.02.2014. Бюл. № 6.

11. Вагин Б.И., Герасимова О.А., Соловьев С.В.Анализ способов первичной обработки молока / *Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения*. Сб. научных трудов международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава «Научное обеспечение развития сельского хозяйства и снижение технологических рисков в продовольственной сфере»: в 2-частях. СПб: СПбГАУ. 2017. Часть I. С. 442-445

REFERENCES

1. Krus' G.N., Khramtsov A.G., Volokitina Z.V., Karpychev S.V. Tekhnologiya moloka i molochnykh produktov / Pod red. A.M. Shalyginoi [Technology of milk and dairy products / Ed. A.M. Shalygina]. Moscow: KolosS, 2006. 455 p. (In Russian)

2. Soloviev S.V., Morozov V. V., Radkevich E. V., Kartashov L. P., Makarovskaya Z. V. Obosnovanie parametrov konstruktivnykh elementov induktsionnogo nagrevatelya dlya pasterizatsii moloka v potoke [Rationale of parameters of constructive elements of an induction heater for pasteurizing milk in a stream]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2019 No. 1(75): 100-103 (In Russian)

3. Vedishchev S.M., Milovanov A.V. Tekhnologii i mekhanizatsiya pervichnoi obrabotki i pererabotki moloka: uchebnoe posobie [Technologies and mechanization of primary treatment and processing of milk: a tutorial]. Tambov: Tambov State Technical University, 2005. 152 p. (In Russian)

4. Buzoverov S. Yu., Vorobyev F. N. Analiz protsessa termoobrabotki i modernizatsiya tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya pererabotki moloka [The analysis of heat treatment process and modernization of milk processing equipment]. Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. No. 10(144): 142-146 (In Russian)

5. Bobrovskii, S. O., Bagaev A. A. Perspektivy primeneniya induktsionnogo nagreva dlya pasterizatsii moloka [Prospects for the use of induction heating for milk pasteurization]. In: Agrarnaya nauka - sel'skomu khozyaistvu [Agricultural science to agriculture]. Proc. XVI Int. Sci. Prac. Conf. in 2 books, Barnaul, 09-10 February 2021 Barnaul: Altai State Agrarian University, 2021:6-7 (In Russian)

6. Nemkov V.S., Demidovich V.B. Teoriya i raschet ustroistv induktsionnogo nagreva [Theory and calculation of induction heating devices]. Leningrad: Eneroatomizdat. 1988. 280 p. (In Russian)

7. Shutov A.A. Obosnovanie neobkhodimosti teplovoi obrabotki moloka-syr'ya na ferme i rezul'taty eksperimental'nykh issledovanii po optimizatsii ustanovki dlya termizatsii [Justification of the need for heat treatment of raw milk on the farm and the results of experimental studies to optimize the installation for thermization]. Molodoi uchenyi. 2010. No.12-1: 46-48 (In Russian)

8. Makarova G.V., Solov'ev S.V. Eksperimental'noe issledovanie pasterizatsionnoi ustanovki s induktsionnym nagrevatelem [Experimental study of a pasteurization plant with an induction heater]. Agrarnaya nauka XXI veka: problemy i perspektivy. [Agrarian science of the XXI century: problems and prospects]. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. 18-19 April 2013. Velikie Luki: VGSKhA. 2013: 315-319 (In Russian)

9. Losyakov K.A., Kaunova L.M. Optimizatsiya konstruktivnykh parametrov trekhfaznogo induktsionnogo nagrevatelya zhidkosti [Optimization of the design parameters of a three-phase induction liquid heater]. Prioritetnye napravleniya razvitiya APK i sel'skikh territorii. [Priority directions for the development of the agro-industrial complex and rural areas]. Proc. Sci. Prac. Conf. Velikie Luki: VGSKhA. 2021: 58-61 (In Russian)

10. Makarova G. V., Solov'ev S.V., Shilin V.A. Induktsionnyi nagrevatel' zhidkosti s vyderzhivatelem [Induction liquid heater with holding device]. Patent on utility model of RF No. 13770, 2013 (In Russian)

11. Vagin B.I., Gerasimova O.A., Solov'ev S.V.Analiz sposobov pervichnoi obrabotki moloka [Analysis of the methods of primary milk processing]. Nauchnoe obespechenie razvitiya APK v usloviyakh importozameshcheniya [Scientific support for the development of the agro-industrial complex in conditions of import substitution]. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. of Professors and Lecturers Nauchnoe obespechenie razvitiya sel'skogo khozyaistva i snizhenie tekhnologicheskikh riskov v prodovol'stvennoi sfere: v 2-chastyakh [Scientific support for the development of agriculture and the reduction of technological risks in the food sector: in 2 Parts]. Saint Petersburg: SPbGAU. 2017. Part I: 442-445 (In Russian)

Для заметок

Для заметок