



ISSN 2078-7138 (Print)
ISSN 2078-7146 (Online)
DOI: 10.56619/2078-7138-2025-170-4

АГРОПАНОРАМА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ РАБОТНИКОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

№ 4
август
2025

В номере:

Технология защиты от изнашивания поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих машин

Экспериментальное обоснование применения композиционной смеси для улучшения характеристик заземляющих устройств

Методика формирования теоретико-практической базы результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов вибросигналов форсунок

Концепция интегрированной логистики в АПК Республики Беларусь: теоретические и методические аспекты



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
АГРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Уважаемые коллеги!

***Приглашаем Вас принять участие в работе
Международной научно-практической конференции,
посвященной 70-летию образования
агротехнического факультета***

***«ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АПК»***,

***которая состоится в Белорусском государственном
аграрном техническом университете***

30 – 31 ОКТЯБРЯ 2025 г.

Основные направления работы конференции:

- Сельскохозяйственная техника: исследование, проектирование, испытание***
- Мобильная энергетика в сельском хозяйстве***
- Инновационные технологии производства продукции растениеводства***
- Инновационные технологии механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции***
- Инновационные технологии подготовки специалистов АПК***

г. Минск, пр-т Независимости, 99, корпус 2

Контактные телефоны:

(+375-17) 369-23-71; 366-11-35; 272-23-43; 272-68-18; 272-25-23

E-mail: dekanat_amf@bsatu.by

[www:bsatu.by](http://www.bsatu.by)

АГРОПАНОРАМА 4 (170) август 2025

Издается с апреля 1997 г.

Научно-технический журнал
для работников
агропромышленного комплекса.
Зарегистрирован в Министерстве
информации Республики Беларусь
21 апреля 2010 года.
Регистрационный номер 1324

Учредитель

*Белорусский государственный
аграрный технический университет*

Главный редактор

Николай Николаевич Романюк

Заместитель главного редактора
Михаил Александрович Прищепов

Редакционная коллегия:

Л.С. Герасимович	И.С. Крук
П.П. Казакевич	А.С. Сайганов
В.М. Капцевич	В.Н. Тимошенко
А.Н. Каргашевич	Н.К. Толочко
Н.В. Киреенко	В.П. Чеботарёв
И.П. Козловская	Н.С. Яковчик

Е.В. Сенчуров – ответственный секретарь
Н.И. Цындрина – редактор

*Компьютерная верстка
В.Г. Леван*

Адрес редакции:

БГАТУ, пр-т Независимости, 99/1, к. 220
220012, г. Минск, Республика Беларусь,
Тел. (+375 17) 272-47-71
Тел./факс (+375 17) 258-41-16

Прием статей и работа с авторами:

г. Минск, пр-т Независимости, 99/5, к. 602, 608
Тел. (+375 17) 385-91-02, 355-22-14
E-mail: AgroP@bsatu.by

БГАТУ, 2025.

Формат издания 60 x 84 1/8.

Подписано в печать с готового оригинала-макета 25.08.2025 г. Зак. № 480 от 20.08.2025 г.

Дата выхода в свет 29.08.2025 г.

Печать офсетная. Тираж 60 экз.

Статьи рецензируются.

Отпечатано в ИПЦ БГАТУ по адресу: г. Минск, пр-т Независимости, 99/2

ЛП № 02330/316 от 30.10.2020 г.

Выходит один раз в два месяца.

Подписной индекс в каталоге «Белпочта» - 74884.

Стоимость подписки на журнал на 2-е п/г 2025 г.:

для индивидуальных подписчиков - 49,62 руб.;

ведомственная - 52,71 руб.;

При перепечатке или использовании публикаций согласование с редакцией и ссылка на журнал обязательны. Ответственность за достоверность рекламных материалов несет рекламодатель.

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственное машиностроение. Металлообработка

Н.М. Максимов, Д.А. Григорьев

Определение мощности на привод вала воскоптки-центрифуги....2

Л.М. Акулович, В.Г. Мисько

Технология защиты от изнашивания поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих машин.....7

Энергетика. Транспорт

М.А. Бойко, А.В. Крутов, А.П. Мириленко

Обоснование технологических параметров электромагнитной установки очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники.....14

И.А. Павлович

Экспериментальное обоснование применения композиционной смеси для улучшения характеристик заземляющих устройств.....21

Технический сервис в АПК. Экономика

В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.А. Жешко

Методика формирования теоретико-практической базы результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов вибросигналов форсунок.....28

Ли Хунся

Агротуризм как интегрированный вид деятельности и элемент социально-экономической системы Китая.....35

А.Л. Косова

Концепция интегрированной логистики в АПК Республики Беларусь: теоретические и методические аспекты.....39

Е.З. Ловкис

Планирование качества пищевых продуктов при производстве в современных условиях.....44

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД ВАЛА ВОСКОТОПКИ-ЦЕНТРИФУГИ

Н.М. Максимов,

*доцент каф. автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин Великолукской государственной сельскохозяйственной академии, канд. техн. наук, доцент
(Российская Федерация, Псковская обл., г. Великие Луки)*

Д.А. Григорьев,

*зав. каф. технологий и механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции БГАТУ,
канд. техн. наук, доцент*

Представлена схема усовершенствованной воскотопки-центрифуги. Приведены расчетные схема и формулы для определения сил, действующих на восковое сырье внутри вращающегося барабана и обеспечивающих преодоление сил вязкого трения и силы тяжести. Представлены зависимости для определения момента и радиуса инерции барабана. Обоснован баланс мощности электропривода при отжиме воска из воскосырья. Полученные зависимости позволяют определить производительность воскотопки-центрифуги и удельный расход энергии на реализацию исследуемого процесса. Анализ полученных уравнений для расчета мощности привода воскотопки-центрифуги показывает, что энергозатраты возможно уменьшить за счет выбора рациональных параметров процесса отжима воска из мервы, а также уменьшением действующей силы трения.

Ключевые слова: пчеловодство, перетопка воска, воскотопка-центрифуга, силы, действующие на воскосырье, момент инерции, баланс мощности, производительность, удельный расход энергии.

The schematic diagram, of the improved wax extractor-centrifuge are described. Analytical models and formulas are provided to calculate the forces acting on the wax raw material inside the rotating drum, which overcome viscous friction and gravitational forces. Dependencies for calculating the moment of inertia and radius of inertia of the drum. The power balance of the electric drive during the wax extraction process is substantiated. The obtained relationships make it possible to determine the performance of the wax extractor-centrifuge and the specific energy consumption for implementing the investigated process. Analysis of the derived equations for calculating the drive power shows that energy consumption can be reduced through the rational selection of process parameters for wax extraction from slumgum, as well as by reducing friction forces.

Key words: beekeeping, wax remelting, wax extractor-centrifuge, forces acting on wax raw material, moment of inertia, power balance, performance, specific energy consumption.

Введение

Пчелиный воск является уникальным продуктом жизнедеятельности медоносных пчел. Он используется в различных отраслях народного хозяйства и находит применение в косметике и медицине, кондитерской промышленности, радиотехнике, металлургической и лакокрасочной промышленности, трехмерном моделировании, печати и многих других. Несмотря на востребованность, до 80 % получаемого пасечного воска используется для производства вошины (искусственной основы для постройки пчелиных сот) [1; 4].

Одним из основных путей увеличения производства воска на пасеках является снижение его потерь за счет внедрения эффективных и высокопроизводительных агрегатов [3-5]. К их числу можно отнести пасечную воскотопку-центрифугу [6]. Разогрев воскового сырья в данном агрегате осуществляется за счет тепловой энергии водяного пара. Источником пара может служить парогенератор по разработанной

конструкции [4]. Принцип выделения воска в центрифугах основывается на воздействии центробежных сил на разогретое воскосырье.

Ввиду сложности и отсутствия рентабельности транспортировки пасечных вытопок до воскоэкстракционных заводов с последующим извлечением воска, для небольших пасек необходимо организовывать самостоятельное извлечение воска из этого воскосырья.

Целью данного исследования является определение мощности на привод вала воскотопки-центрифуги.

Основная часть

Схема и общий вид воскотопки-центрифуги представлены на рисунке 1. Корпус центрифуги выполнен из нержавеющей кислотоупорной стали (рис. 1а). Внутри корпуса 1 на подшипниках вращается барабан 2, приводимый в действие от коллекторного электродвигателя 3 мощностью 300 Вт посредством ременной передачи 4.

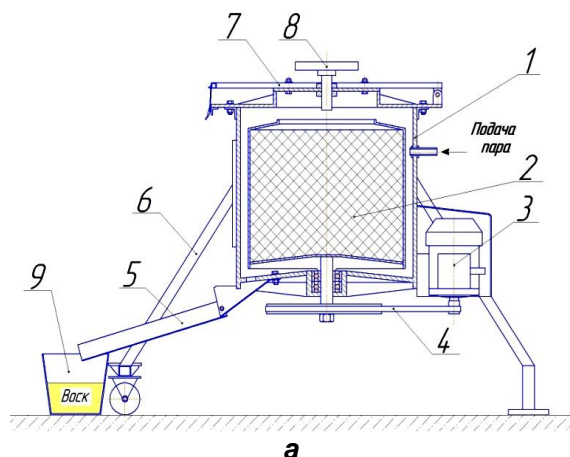


Рисунок 1. Воскотопка-центрифуга для получения воска из пасечной мервы:
а – схема устройства; б – общий вид; 1 – корпус центрифуги; 2 – барабан; 3 – электродвигатель; 4 – ременная передача; 5 – лоток для слива воска; 6 – опоры; 7 – загрузочный люк; 8 – термометр; 9 – контейнер

Регулирование оборотов двигателя осуществлялось при помощи широтно-импульсного модулятора (ШИМ) частоты оборотов «US-52» (Китай), встроенного в электрическую цепь питания электродвигателем. Замер частоты вращения барабана воскотопки-центрифуги производился при помощи цифрового тахометра (Китай), оснащенного датчиком Холла, закрепленного на корпусе установки. Корпус центрифуги 1 имеет приваренные к нему жесткие опоры 6. Загрузка воскосырья внутрь барабана центрифуги осуществлялась через загрузочный люк 7, на котором размещен биметаллический термометр 8. Для получения воска из воскового сырья использовалась проницаемая тканевая оболочка, помещаемая внутрь центрифуги. В корпус центрифуги 1 при ее работе подается острый пар, который разогревает воскосырье до температуры, свыше 100 °С. При вращении ротора жидкий воск извлекается из разогретого воскового сырья, который сливается через лоток 5 в контейнер 9 для сбора воска [4].

Работа центрифуги предусматривает следующие технологические операции: загрузку проницаемой оболочки с пасечной мервой внутрь барабана, центрифугирование и выгрузку оболочки с отжатыми вытопками. В качестве такой проницаемой оболочки может использоваться любая ткань, выдерживающая температуру подаваемого водяного пара, сшитая по размерам барабана. В нашем эксперименте была задействована мешковина, сшитая в два ряда, но предпочтительнее использовать ткань лавсановую фильтровальную (ФЛ-4), которая имеет высокую механическую прочность и стойкость к высоким температурам.

В ходе исследования было проведено теоретическое обоснование процесса работы пасечной центрифуги. Схема работы центрифуги при отжиме воска из мервы представлена на рисунке 2.

При рассмотрении работы воскотопки-центрифуги сделано допущение, что восковая масса равномерно распределяется на внутренней поверхности барабана. Уплотнением мервы во время отжима воска пренебрегаем ввиду малых оборотов барабана.

Воскотопка-центрифуга с электроприводом представляет собой механическую систему, в которой происходит отделение воска от мервы и потеря ее массы. Экспериментальные исследования позволили выявить рациональные режимные параметры, обеспечивающие максимальную производительность центрифуги, которые показали, что выделение воска из пасечной мервы происходит при следующих значениях: температура $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; $n = 1000\text{ мин}^{-1}$; время отжима $T = 15\text{ мин}$. [3]. При указанных параметрах производительность центрифуги по воску составляет 10 кг/ч.

На представленной схеме (рис. 2) приведены силы, действующие на расплавленный воск:

F_y – удерживающая сила (сила вязкого трения), Н;

$F_{ц}$ – центробежная сила, Н;

F_T – сила тяжести, обусловленная гравитационным полем, Н.

Задержка выхода воска из мервы в процессе центрифугирования связана с удерживающей силой F_y [2]. Ее величина находится в функциональной зависимости от частоты вращения ротора ω и температуры нагрева воска T , находящегося в пасечной мерве (рис. 2).

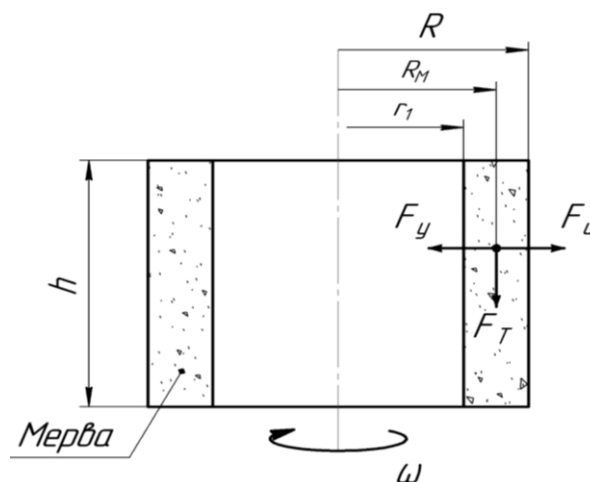


Рисунок 2. Схема работы воскотопки-центрифуги с пасечной мервой

Для дальнейшего определения производительности центрифуги обозначим следующие величины:

R – внутренний радиус барабана центрифуги, м;

r_1 – внутренний радиус слоя материала, который находится в центрифуге, м;

h – высота барабана, м;

ρ – плотность материала, который находится в центрифуге, кг/м³;

V_B – объем барабана центрифуги, м³;

V_M – объем материала, который находится в центрифуге, м³.

Рассмотрим каждую из задействованных сил более подробно.

Сила тяжести F_T может быть определена из выражения:

$$\bar{F}_T = m_M \cdot \bar{g}, \text{ Н}, \quad (1)$$

где m_M – масса пасечной мервы, загруженной в центрифугу, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Для центробежной силы, действующей на восковую массу, будет справедливо уравнение:

$$\bar{F}_c = m_M \cdot \bar{a}_c, \text{ Н}, \quad (2)$$

где a_c – центробежное ускорение, м/с².

В свою очередь, центробежное ускорение может быть найдено по формуле:

$$a_c = \frac{V_M^2}{R_M}, \text{ м/с}^2, \quad (3)$$

где V_M – линейная скорость воска в слое мервы, м/с;

R_M – радиус инерции загруженного в барабан слоя мервы (расстояние от центра вращения центрифуги до слоя мервы, в котором сосредоточена масса загруженной в центрифугу мервы), м.

Линейная скорость воска в мерве будет равна

$$V_M = \omega \cdot R_M, \text{ м/с}. \quad (4)$$

Угловая скорость воска в мерве может быть определена по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \text{ рад/с}, \quad (5)$$

где n – число оборотов барабана, мин⁻¹.

Подставляя известные данные в формулу (2), получим:

$$F_c = m_M \cdot R_M \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 \text{ Н}. \quad (6)$$

Результирующий вектор действия сил F_T и F_c направлен к радиусу цилиндра под углом ψ , который может быть определен из выражения:

$$\text{tg} \psi = \frac{\omega^2 R_M}{g}. \quad (7)$$

Для определения радиуса R_B инерции барабана и загруженной в него мервы необходимо вычислить его момент инерции. Кинетическая энергия вращающегося

тела с непрерывно распределенной массой определяется как сумма энергий множества материальных точек:

$$E_K = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot r_i^2 \cdot \omega^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (8)$$

где m_i – масса материальной точки в слое мервы, кг;

r_i – радиус материальной точки в слое мервы, м;

ω – угловая скорость, рад/с.

Общий приведенный момент инерции I_B определяется из выражения:

$$I_B = I_M + I_{B1} + I_{B2}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (9)$$

где I_M – момент инерции загруженного слоя мервы, кг·м²;

I_{B1} – момент инерции вертикальных стенок барабана, кг·м²;

I_{B2} – момент инерции основания барабана, кг·м².

Найдем момент инерции загруженного слоя мервы:

$$\begin{aligned} I_M &= \int R_M^2 dm_M = \sum_j \int_{r_j}^R 2\pi\rho h R_M^3 dR_M = \\ &= 2\pi\rho h \sum_j \int_{r_j}^R R_M^3 dR_M = 2\pi\rho h \cdot \sum_j \frac{R_M^4}{4} \Big|_{r_j}^R = \\ &= \frac{\pi\rho h}{2} \cdot \sum_j (R^4 - r_j^4) = \frac{\pi\rho h}{2} \times \\ &\times \sum_j (R^2 - r_j^2)(R^2 + r_j^2) = \\ &= \frac{m_M}{2} \sum_j (R^2 + r_j^2), \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (10) \end{aligned}$$

где r_j – расстояние от центра вращения до j слоя мервы, м.

Объем барабана центрифуги может быть определен по формуле:

$$V_B = \pi \cdot R^2 \cdot h, \text{ м}^3 \quad (11)$$

Объем загруженной в барабан мервы может быть записан в виде:

$$V_M = \pi \cdot (R^2 - r_1^2) \cdot h, \text{ м}^3. \quad (12)$$

Масса загруженной в барабан мервы:

$$m_M = \rho \cdot V_M = \rho \cdot \pi \cdot (R^2 - r_1^2) \cdot h, \text{ кг}. \quad (13)$$

Сумма моментов инерции (10) в процессе работы центрифуги будет меняться по неуставленной зависимости. Учитывая, что наибольшая нагрузка на электропривод центрифуги приходится на момент начала ее пуска, то расчет может быть проведен для условий, когда барабан заполнен мервой равномерно по стенкам барабана. Момент инерции заполненного мервой барабана составит:

$$I_M = \frac{1}{2} m_M (R^2 + r_1^2), \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (14)$$

Момент инерции вертикальных стенок барабана определим по формуле:

$$I_{Б1} = m_{Б1} R^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (15)$$

Момент инерции основания барабана:

$$I_{Б2} = \frac{1}{2} m_{Б2} R^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (16)$$

где $m_{Б1}$ – масса стенок барабана, кг;

$m_{Б2}$ – масса днища барабана, кг.

С учетом формул (14) – (16) формула (9) примет вид:

$$I_{Б} = \frac{1}{2} m_{М} (R^2 + r_1^2) + m_{Б1} R^2 + m_{Б2} \frac{1}{2} R^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (17)$$

Радиус инерции загруженного барабана определится из выражения:

$$R_{Б} = \sqrt{\frac{I_{Б}}{m_{БМ}}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} m_{М} (R^2 + r_1^2) + m_{Б1} R^2 + m_{Б2} \frac{1}{2} R^2}{m_{М} + m_{Б1} + m_{Б2}}}, \text{ м} \quad (18)$$

где $m_{БМ}$ – масса барабана с загруженной в него мервой, кг.

Сила, удерживающая воск в мерве, зависит от вязкости воска и определится из выражения:

$$\bar{F}_y = -\bar{v}_M \cdot \beta_T, \text{ Н}, \quad (19)$$

где \bar{v}_M – средняя скорость движения воска (или среднего потока воска), м/с;

β_T – коэффициент вязкого сопротивления (зависит от температуры T , состава воска и геометрии канала), Н·с/м.

Сила извлечения воска из мервы должна быть больше суммы сил, удерживающих его в мерве. Исходя из этого условия, будет справедливо неравенство:

$$|\bar{F}_ц| > |\bar{F}_y| + |\bar{F}_T|. \quad (20)$$

Расход энергии для пасечной центрифуги, работающей в периодическом режиме, можно рассчитать отдельно для пускового и основного (рабочего) режимов.

Максимальная мощность на привод центрифуги требуется в начальный период, когда преодолевается инерция массы вращающихся частей центрифуги и загруженного материала (мервы). В основном режиме работы центрифуги расход энергии будет ниже.

Полный расход энергии в центрифуге периодического действия будет складываться из следующих затрат:

1) на сообщение барабану центрифуги необходимой скорости – $N_{Б}$;

2) на сообщение кинетической энергии мерве, находящейся внутри барабана – $N_{М}$;

3) на преодоление трения в подшипниках центрифуги – $N_{Т}$;

4) на преодоление трения барабана о паровоздушную смесь внутри корпуса центрифуги – $N_{Б}$;

Для начала пуска центрифуги, когда угловая скорость барабана близка к нулю, совершаемая работа будет соответствовать работе силы при повороте тела на конечный угол φ и определяться моментом силы

$$A_{Б} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M d\varphi, \text{ Дж}, \quad (21)$$

где $A_{Б}$ – работа, совершаемая электродвигателем при пуске центрифуги, Дж;

M – крутящий момент на валу электродвигателя, Н.

φ_1, φ_2 – начальное и конечное значения угла поворота, рад;

$d\varphi$ – бесконечно малое приращение угла поворота барабана центрифуги.

Работа, затрачиваемая на сообщение барабану необходимой скорости, определится по формуле:

$$A_{Б} = \frac{\left(m_{Б1} R^2 + m_{Б2} \frac{1}{2} R^2\right) \cdot \omega^2}{2}, \text{ Дж}. \quad (22)$$

Мощность, необходимая для разгона барабана до рабочей частоты вращения

$$N_{Б} = \frac{A_{Б}}{1000 \cdot \tau}, \text{ кВт}, \quad (23)$$

где τ – время разгона центрифуги, с.

На основании полученных практических данных установлено, что время разгона барабана центрифуги составляет до одной минуты.

Работа, затрачиваемая на сообщение кинетической энергии мерве, находящейся внутри барабана, определится по формуле:

$$A_{М} = \frac{m_{М} (r_1^2 + R^2) \cdot \omega^2}{4}, \text{ Дж}, \quad (24)$$

где $m_{М}$ – масса загружаемой мервы, кг.

Мощность, необходимая на сообщение кинетической энергии отжимаемой мерве

$$N_{М} = \frac{A_{М}}{1000 \cdot \tau \cdot \eta_{Э}}, \text{ кВт}, \quad (25)$$

где $\eta_{Э}$ – коэффициент, учитывающий снижение расхода электроэнергии на привод за счет уменьшения массы мервы.

Мощность, необходимая на преодоление трения в подшипниках, запишется в виде:

$$N_{Т} = \frac{m \cdot f \cdot v_{В}}{1000}, \text{ кВт}, \quad (26)$$

где m – масса вращающихся частей центрифуги и воскосырья, кг;

f – коэффициент трения;

$v_{В}$ – окружная скорость шейки вала центрифуги, м/с;

Окружная скорость на поверхности шейки вала центрифуги будет:

$$v_B = \frac{\pi \cdot d_B \cdot n}{60}, \text{ рад/с}, \quad (27)$$

где d_B – диаметр шейки вала, м;
 n – число оборотов вала, мин⁻¹.

Мощность, необходимая на преодоление трения барабана о паровоздушную смесь внутри корпуса центрифуги

$$N_B = \frac{\rho_{\text{отн}} \pi^3 \cdot \mu \cdot H \cdot R^3 \cdot n^2}{45000 \cdot h}, \text{ кВт}, \quad (28)$$

где $\rho_{\text{отн}}$ – коэффициент относительной плотности, учитывающий свойства и состав паровоздушной смеси;
 μ – коэффициент трения (динамическая вязкость паровоздушной смеси), Н•с/м²;

H – высота барабана, м;

R – радиус барабана, м;

n – число оборотов барабана, мин⁻¹;

h – расстояние между барабаном и корпусом, м;

$\pi^3 / 45000$ – комбинация перевода единиц (обороты/мин → рад/с, Вт → кВт).

Максимальная расчетная мощность на валу центрифуги

$$N_{\Pi} = N_B + N_T + N_{\text{Б}} + N_{\text{М}}, \text{ кВт}. \quad (29)$$

В раскрученном состоянии расход электроэнергии на центрифугу значительно меньше

$$N_{\Pi} = N_B + N_T, \text{ кВт}. \quad (30)$$

Производительность центрифуги можно определить по формуле:

$$G = \frac{q}{t}, \text{ кг/ч}, \quad (31)$$

где q – количество полученного на центрифуге воска, кг;

t – продолжительность полного цикла работы центрифуги, ч.

Удельный расход электроэнергии при центрифугировании мервы

$$W_{\text{уд}} = \frac{N_{\Pi}}{G}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}. \quad (32)$$

Анализ уравнений (29), (30) показывает, что затраты мощности на привод центрифуги могут быть снижены за счет выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров центрифуги.

Заключение

1. Применение воскотопки-центрифуги в составе технологической линии по переработке пасечного воскосырья позволяет повысить качество продукции и снизить потери воска, а также уменьшить энергоемкость и трудоемкость процесса его отжима из мервы.

2. Баланс мощности рассчитывается при условии, что центробежная сила, действующая на загруженную мерву, должна превышать сумму сил трения и тяжести, что делает возможным отделение воска. Максимальная мощность, потребляемая приводом воскотопки-центрифуги, приходится на момент пуска и определяется исходя из момента инерции загруженного барабана и действующих сил трения.

3. Полученные зависимости позволяют определить производительность и удельный расход электроэнергии на привод центрифуги. Энергоемкость процесса может быть снижена за счет рационального выбора параметров отжима воска из мервы и уменьшения действующих сил трения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бышов, Д.Н. Анализ перспективных направлений повышения качества и выхода сортового пчелиного воска / Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин, В.В. Павлов // Технологические новации как фактор устойчивого и эффективного развития современного агропромышленного комплекса: материалы Национальной науч.-практ. конф., Рязань, 20 ноября, 2020 г. – Часть II. – С. 77-81.

2. Хорошунов, Н.Г. Режим работы электропривода центрифуги для откочки меда: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Хорошунов Н.Г.; Кубанский гос. аграр. ун-т. – Краснодар, 2011. – 144 л.

3. Максимов, Н.М. Многофакторное исследование режимных параметров центрифуги для отжима воска из пасечных вытопок / Н.М. Максимов, Т.Е. Федорова-Семенова, Д.В. Рыжов // Известия Великолукской гос. с.-х. академии. – 2022. – № 1. – С. 40-48.

4. Максимов, Н.М. Перспективная технология переработки воскового сырья на пасеках с использованием парогенератора / Н.М. Максимов, В.В. Морозов // Традиции и инновации в развитии АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Великие Луки, 17-18 апреля 2019 г. / Великолукская гос. с.-х. академия. – Великие Луки, 2019. – С. 493-498.

5. Максимов, Н.М. Определение энергозатрат центрифуги при отжиме воска из воскосырья / Н.М. Максимов, Д.В. Рыжов // Известия Великолукской гос. с.-х. академии. – 2023. – № 1 (42). – С. 19-27.

6. Патент 217028 U1 РФ, МПК7 А01К 59/06. Воскотопка-центрифуга: № 2022109514: заявлено 08.04.2022: опубл. 14.03.2023 / Максимов Н.М.; заявитель: Максимов Н.М. – 2 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.04.2024

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗНАШИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

Л.М. Акулович,

профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В.Г. Мисько,

ст. преподаватель каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ

В статье научно обоснована гипотеза защиты от изнашивания поверхностей деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин, заключающаяся в формировании на их поверхностях градиентного по твердости упрочненного слоя с шероховатостью поверхности, позволяющей ее шаржировать твердыми (абразивными) частицами, содержащимися в почве, что в результате самоорганизации процесса изнашивания создает в зоне контакта с почвой абразивную прослойку, способствующую приблизить коэффициент трения контактируемой поверхности детали о почву к коэффициенту трения почвы с почвой. Для реализации гипотезы предложена и экспериментально подтверждена технология нанесения покрытий электроискровой упрочняющей обработкой, создающая топографию поверхности для последующего ее шаржирования твердыми частицами при контакте с почвой.

Ключевые слова: структура почвы, абразивная прослойка, покрытие, электроискровое упрочнение, впадины неровностей, градиент твердости, шероховатость поверхности.

The article scientifically validates the hypothesis of protecting the surfaces of the working parts of tillage machines from wear by forming a hardened layer with a surface roughness gradient on their surfaces, allowing it to be overacted with hard (abrasive) particles contained in the soil. As a result of the self-organization of the wear process, an abrasive layer in the contact zone with the soil is created, which helps to approximate the coefficient of friction of the contact surface with the soil to the coefficient of friction of the soil with the soil. For the implementation of the hypothesis, the technology of applying electro spark hardening treatment, which creates topography of the surface for subsequent contamination by solid particles in contact with the soil has been proposed and experimentally confirmed

Key words: soil structure, abrasive layer, coating, electro spark hardening, surface depressions, hardness gradient, surface roughness.

Введение

Эксплуатация большинства сельскохозяйственной техники носит сезонный характер и происходит в условиях изменяющихся нагрузок и свойств окружающей среды, что по мере увеличения наработки приводит к искажению формы рабочих поверхностей деталей, изменению их размеров, увеличению зазоров в подвижных соединениях, появлению дополнительных нагрузок и вибраций. Основной причиной потери работоспособности деталей является изнашивание их поверхностей, что приводит к необходимости либо замены деталей, либо восстановления изношенных поверхностей при ремонте. Установлено [1, с. 3], что из потерявших работоспособность деталей машин по причинам износа поверхностей около 85 % имеют износ не более (0,2÷0,3) мм, а себестоимость их восстановления составляет (50÷60) % от стоимости новой детали. Поэтому восстанавливать многие детали экономически целесообразно.

Количественно изнашивание характеризуется [2, с. 67] скоростью $V_{и} = \Delta h/t$ или интенсивностью $I_{и} = \Delta h/L$,

где Δh – величина износа (толщина удаленного слоя), м;

t – время работы, ч;

L – путь.

Поверхности деталей рабочих органов землеройных, почвообрабатывающих и посевных машин при перемещении в почве подвергаются воздействию массы незакрепленных твердых частиц. Степень этого воздействия в значительной мере зависит от структуры и фракционного состава почвы (рис. 1). Структура почвы отображает физическое строение твердой части и порового пространства почвы, обусловленное размером, формой, количественным соотношением, характером взаимосвязи и расположением, как механических элементов, так и состоящих из них агрегатов (ГОСТ 27593-88). В зависимости от фракционного состава почвы возможно наличие в ней одиночных крупных фракций. При динамическом контактирова-

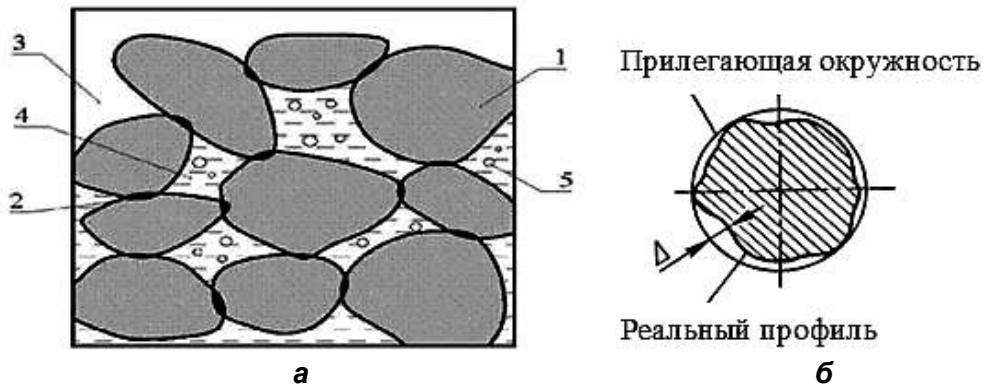


Рисунок 1. Схема расположения твердых частиц в структуре почвы: а – типовое расположение фракций: 1 – твердые частицы почвы; 2 – зоны контакта частиц; 3 – газовые поры; 4 – поры, заполненные жидкостью; 5 – пузырьки газа; б – модель поперечного сечения твердой частицы: Δ – отклонение от окружности округлого профиля абразивных частиц

нии металлических поверхностей с почвой такого состава, когда в зону контакта попадают абразивные или иные твердые частицы, а поры заполнены газовой и (или) жидкой фракцией, процесс изнашивания незакрепленными абразивными частицами можно уподобить «изнашиванию в абразивной прослойке», при котором абразивные частицы могут ударяться своими гранями о контактируемые поверхности, скользить по ним или вращаться, оставляя на поверхностях царапины и (или) углубления (рис. 1а). Наличие в абразивной прослойке жидкой среды облегчает условия трения за счет охлаждающего и смазывающего действия жидкости, а также способствует выносу абразива из зазора.

Цель исследования – изучить особенности изнашивания поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих машин при контакте с незакрепленными абразивными частицами и предложить технологический метод создания абразивной прослойки, снижающей интенсивность трения и износ.

Методики исследований, оборудование и материалы

В ходе исследований выполнен анализ механизма изнашивания металлической поверхности в среде незакрепленных абразивных частиц почвы, а также технологических методов повышения износостойкости поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих машин. На основании данного анализа обоснован метод формирования в зоне трения абразивной прослойки из твердых частиц почвы, одним из технологических вариантов которого может быть нанесение покрытий электроискровой упрочняющей обработкой и последующее их шаржирование особо твердыми частицами.

Экспериментальные исследования по нанесению покрытий проводились на установке для восстановления и упрочнения ОВД-28339 с генератором искровых импульсов модели БИГ-4. На рабочую часть диска сошников СПР-10.01.01 посевного агрегата АПП-6 наносили покрытие из твердого сплава ВК8. Материал основы – сталь 45 с закалкой рабочей части ТВЧ 45...50 HRC на глубину 1,15 мм. Режимы электроис-

кровой обработки: напряжение импульсного тока – 180 В; величина тока – 80 А.

Основная часть

Структура почвы включает совокупность всех видов частиц, находящихся в твердом состоянии, а поровое пространство – разнообразные по размерам и форме промежутки между механическими элементами, заполненные глиной, воздухом, водой и другими составляющими почвы (рис. 1а). Твердые (абразивные) частицы почвы, несмотря на различие их исходных форм, при трении стремятся приобрести в поперечном сечении округлую форму – сферическую, либо цилиндрическую (рис. 1б). Физически это объясняется стремлением трущихся частиц к минимуму свободной энергии.

Важнейшей характеристикой структуры почвы является способность почвенных частиц соединяться в относительно устойчивые комочки различной формы и величины (структурные элементы), через которые могут свободно проходить влага и воздух. Геометрическая форма структурных элементов определяет структуру почвы: кубовидная (рис. 2а), призмовидная (рис. 2б), плитовидная (рис. 2в). Перемещение рабочих органов почвообрабатывающих машин в такой среде приводит к абразивному изнашиванию их поверхностей.

Сложность процесса абразивного изнашивания обусловлена влиянием многочисленных факторов, основными из которых являются механические свойства поверхности и абразива, контактное давление в зоне трения, размеры и форма абразивных частиц, скорость их относительного перемещения. Независимо от вида перемещения абразивных частиц по контактируемой поверхности, их движение в зоне контакта может сопровождаться микрорезанием и (или) деформированием (упругим или пластическим) материала детали. Округлая форма частиц позволяет при их движении по контактируемой поверхности осуществлять переход из режима трения скольжения в режим трения качения, при котором частицы занимают устойчивое положение, как по отношению к контактируемой поверхности, так и по отношению к

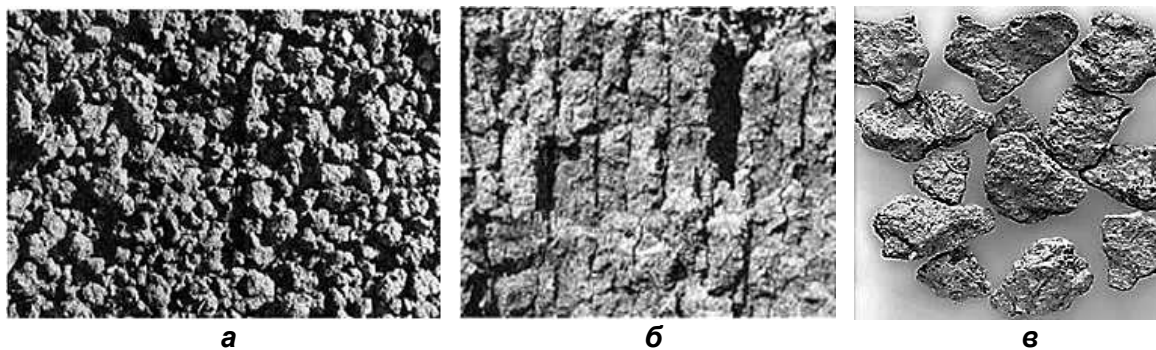


Рисунок 2. Формы типовых структурных элементов почвы: а – кубовидная; б – призмовидная; в – плитовидная

другим частицам почвы, находящимся в абразивной массе [3]. Устойчивость положения объясняется тем, что трение само по себе является самоорганизующимся процессом, при котором одновременно или последовательно осуществляется разрушение поверхностного слоя и создаются условия, снижающие трение и износ [4].

Самоорганизация процесса проявляется в переориентации массы контактируемых незакрепленных абразивных частиц, что обусловлено изменяющимися условиями изнашивания при трении в абразивной массе. Абразивная масса податлива и сопротивление перемещению деталей в ней гораздо ниже, чем при других подвидах абразивного изнашивания, абразивные частицы могут легко оттесняться деталью при перемещении. Усилие в зоне контакта определяется скоростью движения детали в абразивной массе, плотностью этой массы, размером и твердостью ее частиц, а также наличием жидкой среды и пор в массе абразива. Так как самоорганизация формирования структуры происходит с учетом перечисленных изменений внешней среды, то интенсивность изнашивания поверхности при трении в абразивной массе значительно ниже, чем при трении по закрепленному абразиву.

Механизм разрушения поверхностных слоев деталей при трении в массе незакрепленных абразивных частиц согласуется с общими закономерностями теории абразивного изнашивания (рис. 3а, кривая 1), представляющими прохождение процесса изнашивания при постоянных условиях в три стадии: I – приработка; II – установившееся изнашивание; III – форсированное изнашивание [2].

Однако при перемещении рабочего органа в почве на металлическую поверхность воздействует масса незакрепленных абразивных частиц и динамика изнашивания претерпевает заметные изменения, обусловленные самоорганизующимся формированием контакта абразивных частиц с движущейся поверхностью рабочего органа и изменениями внешней среды, к числу которых также относится преобразование геометрической формы абразивных частиц в процессе трения. Часть абразивных частиц застревает во впадинах неровностей, что способствует формированию у них округлой формы, уменьшающей коэффициент трения и интенсивность изнашивания. В результате при трении в массе незакрепленных абразивных частиц интенсивность изнашивания поверхности значительно ниже, чем при трении по закрепленному абразиву.

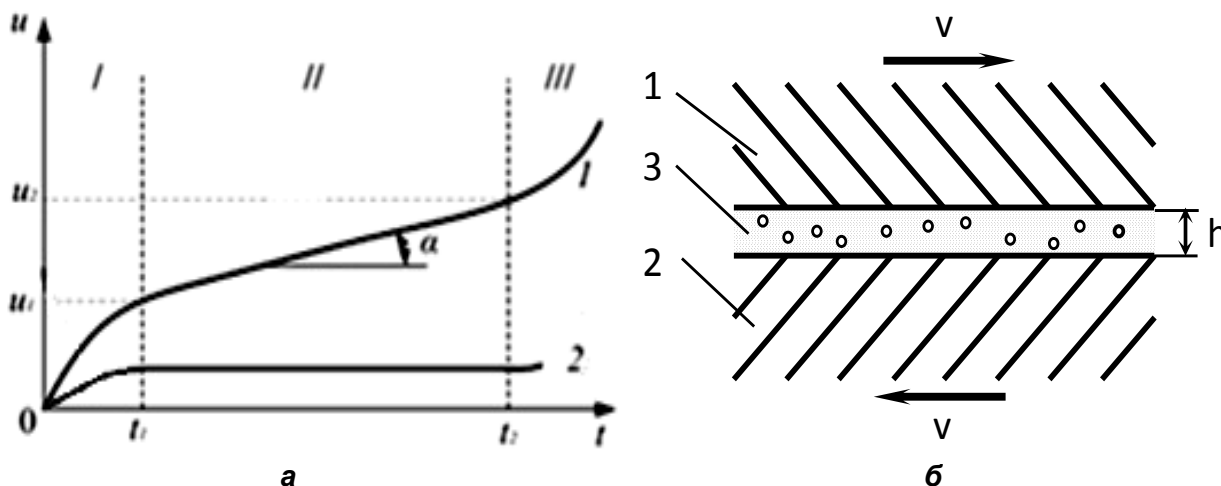


Рисунок 3. Характер изнашивания поверхностей при трении в массе абразивных частиц: а – зависимости величины и изнашивания от времени: 1 – теоретическая кривая; 2 – при трении незакрепленной абразивной частицы; б – схема контактирования поверхностей при трении в массе незакрепленных частиц: 1, 2 – поверхности трения; 3 – абразивная прослойка толщиной h ; v – скорость относительного перемещения контактируемых поверхностей

зиву, и носит неизменный характер в установившемся режиме изнашивания. Поэтому кривая 2 (рис. 3а) на стадии II не имеет угла наклона α , что свидетельствует о постоянной во времени скорости изнашивания.

Рассмотренный механизм изнашивания металлических поверхностей проявляется с разной интенсивностью, зависящей от вида почвы, ее состояния и других факторов, которые исследователи объединяют общим термином – «изнашивающая способность почвы» [5]. При контакте рабочих органов с почвенной массой интенсивность изнашивания их поверхностей определяется, главным образом, количеством абразивных частиц в почве и их твердостью, а также степенью их фиксации в почвенной массе. Чем больше в почве содержится песчаных частиц размером 0,25...1,00 мм, тем больше абразивный износ металла. Наибольший износ наблюдался при прочной фиксации песчаных частиц в сухой глинистой почве. Установлено, что увеличение плотности почвы и твердости частиц, содержащихся в ней, усиливает абразивный износ поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих машин. По твердости частиц наибольшее влияние на изнашивающую способность почвы оказывают минеральные частицы кварца и гранита (твердость НВ 7... 11 ГПа), являющиеся основной составной частью (36,6...70,8 %) многих песчаных почв [6]. Меньшей твердостью обладают частицы глинистых почв, поэтому интенсивность изнашивания рабочих органов на суглинистых и глинистых почвах ниже, чем на песчаных. Большинство твердых частиц имеют округлую форму, но также имеются и частицы с острыми гранями, способные деформировать и изнашивать контактируемые поверхности деталей рабочих органов. Определенная ориентация таких частиц относительно поверхности допускает их вдавливание в материал детали. Способность абразивной частицы вдавливаться в материал детали зависит не только от ее геометрической формы, но и от соблюдения условия, при котором

твердость абразивной частицы превышает твердость материала контактируемого поверхностного слоя деталей рабочих органов. В зависимости от указанных условий возможны варианты поведения абразивных частиц под действием нагрузки со стороны почвы:

- вдавливание в поверхностный слой металла;
- дробление на более мелкие фракции и последующее вдавливание в поверхностный слой;
- скольжение и (или) перекачивание по поверхности изнашивания, сопровождающееся упругой и пластической деформацией поверхностного слоя.

Поскольку в результате изнашивания абразивные частицы приобретают округлую форму в виде сферы или эллипсоида вращения, то из технологических методов повышения долговечности рабочих органов наиболее действенным представляется технология, которая может обеспечить величину коэффициента трения контактирующих поверхностей, близкую к коэффициенту трения почвы о почву или незначительно его превышающую [6, с. 14]. Одним из вариантов достижения такого эффекта может быть, с одной стороны, подбор износостойких материалов для нанесения на поверхность покрытия, а с другой стороны – создание на изнашиваемых участках рабочих органов такого профиля шероховатости, который при движении абразивных частиц по контактирующей поверхности способствует занятию ими устойчивого положения во впадинах неровностей (рис. 4). Нахождение во впадинах неровностей абразивных частиц округлой формы позволяет им из режима трения скольжения перейти в режим трения качения, что уменьшает коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Вдавленные во впадины неровностей на контактирующей поверхности твердые частицы, скрепленные глинистой составляющей почвы, создают абразивную прослойку, формирующуюся в результате самоорганизующегося процесса изнашивания и приближающую коэффициент трения контактирующих поверхностей к коэффициенту трения почвы о почву. При этом на участках контакта будет

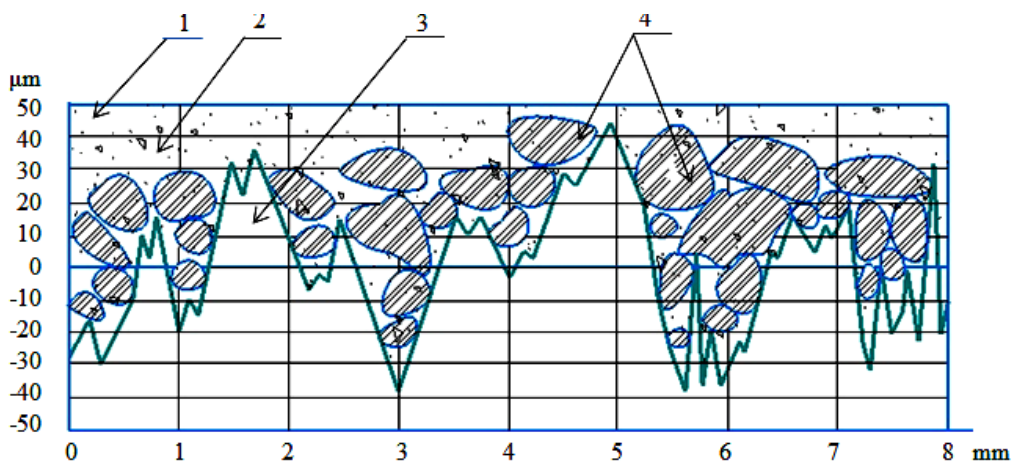


Рисунок 4. Схема заполнения впадин неровностей поверхности твердыми частицами почвы: 1 – слой почвы; 2 – абразивная прослойка; 3 – профиль шероховатости контактирующей поверхности рабочего органа; 4 – твердые (абразивные) частицы

проявляться эффект «залипания поверхности» и защиты ее от абразивного изнашивания.

Для реализации эффекта, представленного на рисунке 4, требуется создать градиент твердости поверхностного слоя, при котором у вершин неровностей величина твердости будет максимальной, а во впадинах – минимальной, а также шероховатость поверхности, при которой будет происходить перекатывание или проскальзывание твердых частиц грунта по вершинам неровностей и возможность их внедрения во впадины. Технологически обеспечить такое требование можно путем подбора необходимого износостойкого материала для покрытия и способа его нанесения на поверхность детали. Установлено [6, с. 21], что для повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих посевных агрегатов наибольшее влияние оказывает нанесение на изнашиваемые поверхности твердых покрытий на основе бора, вольфрама, титана и др.

Исследованиями установлено [5], что глинистые и суглинистые почвы обладают наименьшей изнашивающей способностью при 14...18 %-й абсолютной влажности. Обобщенным критерием оценки изнашивающей способности почв является содержание в них песка с размером частиц более 0,01 мм. Анализ минералогического состава почв, которые наиболее характерны для районов Беларуси, показывает ее неоднородность по механическому составу, размерам и форме незакрепленных абразивных частиц. Наиболее распространенными минералами в этих почвах являются кварц и гранит размером 1,0÷0,05 мм, составляющие 75÷85 % в структуре почв [3]. Песчаные и глинистые почвы состоят из мелких комочков размером 2,5÷10 мм. В каждом комочке частицы песка и глины прочно склеены и не размываются водой, а промежутки между ними заполнены воздухом. Такие почвы называют структурными, а почвы, в которых мелкие пылевидные частицы плотно прилегают друг к другу – бесструктурными. Бесструктурные почвы состоят из прочно склеенных комочков с размером частиц до 0,05 мм, в них мало газовых пор, а дождевая вода плохо проникает через почву, образуя вязкую массу, которая препятствует проникновению влаги в более глубокие слои, и вода стекает с поверхности почвы.

Поскольку главной причиной интенсивного изнашивания поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих машин является их многократное пластическое деформирование под действием твердых абразивных частиц, то в зонах наибольшей интенсивности трения исследователи [7, 8] предлагают наносить прерывистое покрытие из износостойких материалов в виде отдельных прямолинейных или дугообразных валиков, ширина которых меньше расстояния между ними. Прерывистое расположение износостойкого материала изменяет динамику контакта абразивных частиц, при которой за наплавленным слоем образуются зоны застоя почвы, и трение абразивных частиц происходит с поверхностью застойной зоны. За зонами застоя частицы контактного слоя почвы совершают смешанное перемещение, включая

вращение с проскальзыванием и их перекатывание, что снижает трение абразивных частиц почвы с поверхностью рабочего органа. Для реализации прерывистого нанесения покрытий наиболее перспективными являются технологии, основанные на использовании концентрированных в пространстве и во времени потоков энергии, например, света (лазерное упрочнение) и электромагнитного поля (электроискровое и магнитно-электрическое упрочнение). При использовании таких технологий кратковременный нагрев локальных участков поверхностных слоев не вызывает существенного повышения температуры деталей и их коробление из-за температурных деформаций.

К недостаткам покрытий, наносимых с использованием энергии электрических разрядов, относят неравномерность распределения по поверхности отдельных точечных вкраплений упрочняющего материала, что приводит как к снижению сплошности наносимого покрытия, так и к увеличению шероховатости поверхности $Ra \geq 12,5$ мкм (рис. 5). Поверхности с такой шероховатостью не могут работать в парах трения, поэтому требуется их последующая финишная обработка, например шлифование и (или) магнитно-абразивная обработка [9, с. 56-60]. Однако

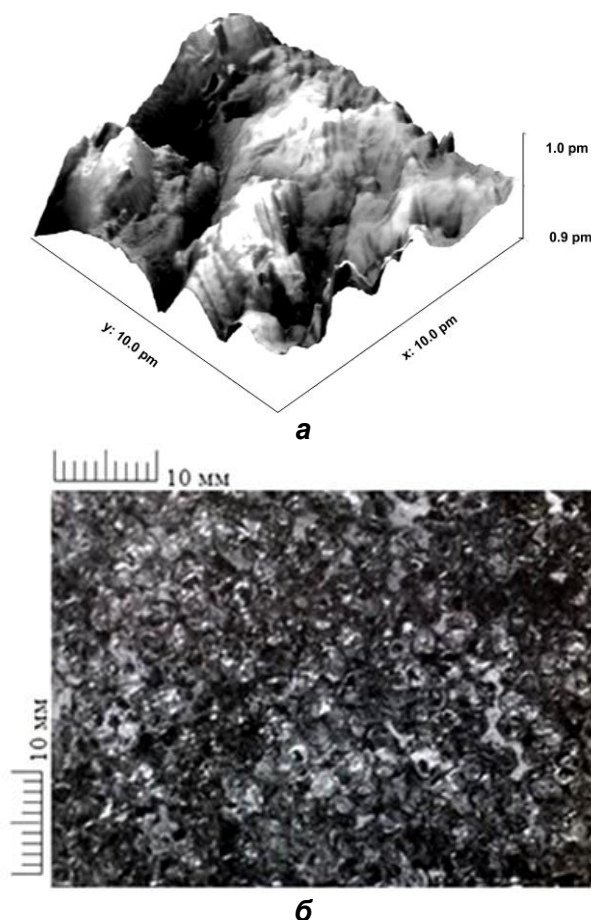


Рисунок 5. Топография покрытий: а – нанесенных электроискровой обработкой Т15К6 [10, с. 14]; б – магнитно-электрическим упрочнением ФБХ-6-2 [9, с. 144]

при этом с покрытия снимается самый твердый поверхностный слой, что для условий абразивного изнашивания является не лучшим решением.

Вместе с тем нанесение покрытий электроискровой обработкой формирует поверхности с прерывистым микропрофилем, твердость на вершинах которого превышает твердость во впадинах. Это создает благоприятные условия вдавливания абразивных частиц почвы в зонах между отдельными вкраплениями покрытия на контактируемой поверхности детали рабочих органов. Способность абразивных частиц вдавливаться в материал детали, называемая шаржированием, наблюдается не только при абразивном износе деталей машин в процессе их эксплуатации, но также и при некоторых видах абразивной обработки поверхностей деталей при их изготовлении, когда происходит дробление абразивных зерен режущего инструмента и их вдавливание в обрабатываемую поверхность. Профилограммы шероховатости поверхностей покрытий после электроискровой обработки разными способами представлены на рисунке 6.

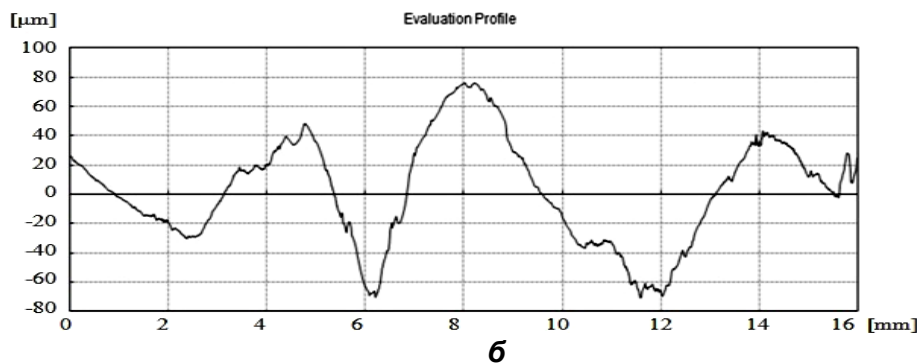
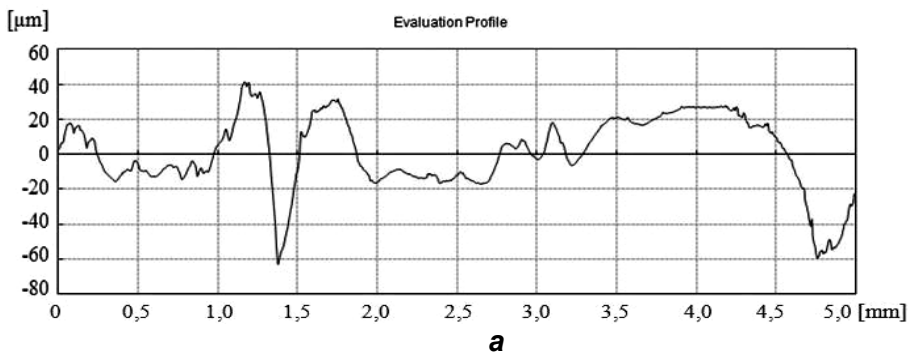


Рисунок 6. Профилограммы шероховатости поверхностей:
 а – диска сошников агрегата АПП-6 после электроискровой обработки сплавом ВК8 (материал основы – сталь 45 с закалкой ТВЧ 45...50 HRC); б – вилки шарнира привода переднего моста тракторов МТЗ после магнитно-электрического упрочнения порошком Fe-Ti (материал основы – сталь 40X, 40...45 HRC)

Анализ профилограммы (рис. 6а) показывает, что после электроискровой обработки сплавом ВК8 максимальная глубина впадин микронеровностей составляет 100 мкм, а их ширина находится в пределах от 0,2 мм до 0,7 мм. Расстояние между соседними впадинами (шаг впадин) находится в широких пределах (0,3÷3,0) мм.

Такие размеры образовавшихся впадин и их расположение на поверхности позволяют шаржировать поверхности механическими частицами глинистых и суглинистых почв, в которых размеры частиц песка не превышают 0,5 мм и прочно склеены глиной.

Профиль микронеровностей, образующийся при магнитно-электрическом упрочнении (рис. 6б), характеризуется увеличением глубины впадин микронеровностей до 150 мкм с шагом (4÷5) мм. Такие размеры впадин микронеровностей позволяют шаржировать поверхности механическими частицами песчаных почв, в которых размеры частиц песка превышают 0,5 мм. Вдавленные во впадины микронеровностей абразивные частицы почвы изменяют характер трения в зоне контакта и защищают поверхности рабочих органов от истирания.

На основании изложенного выше сформулирована гипотеза защиты поверхностей деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин, работающих в открытом грунте, от абразивного изнашивания, заключающаяся в формировании на контактируемых поверхностях градиентного по твердости упрочненного слоя, с шероховатостью, позволяющей шаржировать его твердыми (абразивными) частицами почвы.

В результате самоорганизации процесса изнашивания это приближает коэффициент трения в зоне контакта к коэффициенту трения почвы о почву. Одним из вариантов реализации гипотезы может быть комбинированная технология защиты от абразивного изнашивания поверхностей, на первом этапе которой наносят структурированное покрытие электроискровым или магнитно-электрическим упрочнением, позволяющее при контакте с почвой осуществлять в процессе трения второй этап упрочнения путем шаржирования поверхности твердыми частицами, используя при этом явление самоорганизации процесса изнашивания.

Экспериментальные исследования данной технологии, проведенные путем нанесения покрытия электроискровым упрочнением на рабочую часть диска сошников СПР-10.01 посевного агрегата АПП-6 на установке для восстановления и упрочнения ОВД-28339 и магнитно-электрическим упрочнением на цилиндрическую поверхность вилки шарнира привода переднего моста тракторов МТЗ 3022/3522 на установке модели УМЭУ-1, подтвердили

Экспериментальные исследования данной технологии, проведенные путем нанесения покрытия электроискровым упрочнением на рабочую часть диска сошников СПР-10.01 посевного агрегата АПП-6 на установке для восстановления и упрочнения ОВД-28339 и магнитно-электрическим упрочнением на цилиндрическую поверхность вилки шарнира привода переднего моста тракторов МТЗ 3022/3522 на установке модели УМЭУ-1, подтвердили

возможность шаржирования поверхности после электроискровой обработки.

По физической сущности механизма формирования покрытия электроискровое легирование и магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) являются родственными способами. Главное их отличие состоит в том, что при МЭУ нанесение покрытий осуществляется за счет многоэлектродного воздействия электрических разрядов [6, 7], повышающего производительность.

Если на поверхности рабочих органов почвообрабатывающих машин и агрегатов в зонах наибольшей интенсивности трения наносят прерывистое покрытие из износостойких материалов в виде отдельных прямолинейных или дугообразных валиков [7, 8] с определенным расстоянием между ними, то после нанесения покрытий целесообразно промежутки поверхности между валиками шаржировать по известным технологиям [11, 12] особо твердыми абразивными частицами (например, смесью частиц карбида кремния зеленого (64С) размером до 20 мкм и карбида кремния черного (53С) размером 200÷315 мкм).

Заключение

На основании анализа механизма самоорганизующегося процесса абразивного изнашивания сформулирована гипотеза защиты от истирания поверхностей деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин, заключающаяся в создании между контактируемой поверхностью абразивной прослойки, которая способствует перекачиванию твердых частиц почвы, что обеспечивает снижение коэффициента трения контактирующих поверхностей, приближая его к коэффициенту трения «почвы о почву».

Создание абразивной прослойки из твердых частиц возможно методом формирования на контактируемой поверхности градиентного по твердости упрочненного слоя с шероховатостью, позволяющей его шаржировать твердыми (абразивными) частицами путем их вдавливания во впадины неровностей и одновременным скреплением глинистой составляющей почвы при контакте с ней. При этом на участках контакта проявляется эффект «залипания поверхности» и защиты ее от абразивного изнашивания.

Экспериментально установлено, что одним из вариантов реализации выдвинутой гипотезы может быть комбинированная технология нанесения покрытий электроискровой упрочняющей обработкой и последующего их шаржирования твердыми частицами при контакте с почвой. Такая технология создает на металлической поверхности «эффект долговечности бульжных дорог».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чеботарев, М.И. Выбор оптимального способа восстановления изношенной поверхности детали:

учеб. пособие / М.И. Чеботарев, М.Р. Кадыров. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 91 с.

2. Полюшкин, Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие / Н.Г. Полюшкин. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2013. – 192 с.

3. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / М.М. Севернев [и др.]; под ред. М.М. Севернева. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 333 с.

4. Тавтилов, И.Ш. Основы теории трения и изнашивания: учеб. пособие / И.Ш. Тавтилов, В.И. Юршев, А.С. Кириленко. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2021. – 192 с.

5. Бартенев, И.М. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин / И.М. Бартенев, Е.В. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3. – С. 114-123.

6. Новиков, В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Новиков Владимир Савельевич; Московский гос. агроинж. ун-т им. В.П. Горячкина. – Москва, 2008. – 38 с.

7. Патент RU 2414337, МПК В23К 9/04, В23Р6/00. Способ получения износостойкой рабочей поверхности деталей почвообрабатывающих машин: № 2008137196/02: заявлено 16.09.2008: опубл. 20.03.2011 / Ожегов Н.М., Капошко Д.А., С. И. Будко; заявители: Ожегов Н.М., Капошко Д.А., С. И. Будко.

8. Ожегов, Н.М. Исследования методов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин и разработка автоматической установки для нанесения на них упрочняющих покрытий / Н.М. Ожегов, А.В. Добринов, В.А. Ружьев // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 3. – С. 28-31.

9. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.

10. Алимбаева, Б.Ш. Разработка и оптимизация износостойких покрытий на стальной подложке, синтезируемых методом электроискровой обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Алимбаева Ботагоз Шайдуловна; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2014. – 23 с.

11. Патент RU 2739047С1 МПК В24D18/00, В24 В5700. Способ получения поверхностей шаржированием абразивными частицами: № 2020109985: заявлено 10.03.2020: опубл. 21.12.2020 / Грядун С.С., Сиваков В.В.; заявители: ФГБОУВО «Брянский гос. инженерно-технологич. ун-т».

12. Патент RU 2583565С1 МПК В23Р 15/28, В24D18/00. Способ шаржирования металлорежущего инструмента: № 2014148813/02: заявлено 04.12.2014: опубл. 10.05.2016 / М.А. Скворцов, С.И. Пудков; заявители: АО «Научно-производственный центр газотурбостроения «Салют».

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.06.2025

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УСТАНОВКИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НАРУЖНОЙ МОЙКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

М.А. Бойко,

ст. преподаватель каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ

А.В. Крутов,

доцент каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.П. Мириленко,

доцент каф. моделирования и проектирования БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье предложен комбинированный многофункциональный аппарат очистки сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники с использованием электрохимической коагуляции и электромагнитной флотации загрязнений. На основе планирования эксперимента осуществлено математическое моделирование процесса очистки по удельным энергетическим затратам и показателю снижения наиболее трудноудаляемых углеводородных включений. Определены оптимальные технологические режимы электрообработки стоков в зонах электрохимической коагуляции, электрической и магнитной флотации. По допустимым показателям загрязнений очищенная вода пригодна для систем оборотного технического водоснабжения.

Ключевые слова: сточные воды, загрязнения, электрохимическая коагуляция, электро- и магнитная флотация, режимы электрообработки.

The article proposes a combined multifunctional wastewater treatment unit for external washing of agricultural machinery using electrochemical coagulation and electromagnetic flotation of contaminations. Based on the experimental planning, mathematical modeling of the wastewater treatment process was carried out in terms of specific energy costs and reduction of the most difficult-to-remove hydrocarbon inclusions. Optimal technological modes of electrical wastewater treatment in the zones of electrochemical coagulation, electric and magnetic flotation have been determined. According to acceptable pollution indicators, purified water is suitable for recycling water supply systems.

Key words: wastewater, contaminations, electrochemical coagulation, electro- and magnetic flotation, electrical treatment modes.

Введение

Машинные двory сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь потребляют значительные объемы воды на наружную мойку машин и техники. Неочищенные сточные воды постов мойки представляют угрозу гидросфере и другим объектам природопользования. Известен ряд устройств и способов очистки сточных вод, использующих механические, химические, электрофизические и другие методы их обезвреживания.

Совершенствованию установок очистки сточных вод электрофизическими методами с сочетанием различных функций в одном аппарате посвятили свои работы ученые Б.С. Ксенофонтов, Б.В. Дерягин, Е.В. Алексеев, В.С. Пашинин, С.С. Душкин и др. [1-5].

Одной из трудно решаемых проблем является снижение концентрации загрязнений сточных вод до

допустимых показателей, установленных для технической воды. В этом случае контролируются pH, запах, температура, общая жесткость воды, содержание взвешенных веществ, нефтепродуктов, железа, сухого остатка, тетраэтилсвинца, биохимическое (БПК₅) и химическое потребление кислорода (ХПК), санитарно-гигиеническое соответствие. В процессе электрохимической очистки сточных вод ряд перечисленных показателей обеспечивается легко. Однако такие параметры, как ХПК и содержание железа могут при определенных режимах электрообработки не соответствовать требованиям.

Цель работы – определить оптимальные электро-технологические режимы электрообработки сточных вод наружной мойки для снижения концентрации загрязнений до показателей качества, позволяющих использовать ее в системе оборотного технического водоснабжения.

Основная часть

В Белорусском государственном аграрном техническом университете разработано устройство очистки сточных вод и получен патент Республики Беларусь на изобретение №21229 «Трехпродуктовый гидроциклон для очистки сточных вод». В основу устройства положены электрохимическая очистка сточных вод в процессе их электролиза и разложения стального анода, электромагнитная флотация загрязнений и их удаление с помощью скребкового или другого устройства.

Установка очистки представляет собой комбинированный многофункциональный аппарат, включающий электрохимическую коагуляцию и электромагнитную флотацию загрязнений. Устройство включается в технологический процесс наружной мойки сельскохозяйственной техники, схема которого представлена на рисунке 1.

Вода с моечной площадки 1, стекает в резервуар 3, который оборудован перегородкой 4 для отделения песка, а затем насосом 5 подается в гидроциклон 6. В гидроциклоне за счет центробежных сил оставшиеся механические примеси выпадают в осадок. Далее вода поступает в зону электрохимической коагуляции. Здесь под действием электрического тока, протекающего между электродами, происходит разложение стального анода и образование хлорида железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Хлорное железо вступает в реакцию со щелочной средой, накапливаемой у катода с образованием хлопьев гидроксида железа (III). Хлопья на своей поверхности адсорбируют частицы эмульсии нефтепродуктов и других взвешенных веществ.

Выделяющиеся на катоде молекулы водорода и на аноде – кислорода захватывают хлопья и выносят их в зону электрофлотации 8. Здесь за счет сетчатого катода (увеличена кривизна его поверхности) более интенсивно выделяется водород и усиливает флотацию загрязнений. В зоне магнитной флотации 9 под

воздействием неоднородного магнитного поля траектория движения флотокомплекса (частицы загрязнения и присоединившиеся к ним пузырьки электролитических газов) меняется из-за различной магнитной восприимчивости жидкой фазы дисперсной среды и частиц загрязнений. Взвешенные частицы обладают магнитным моментом, так как содержат соединения железа. В процессе электрохимической коагуляции образуется не только гидроксид железа, но и оксиды железа, такие как, например, магнетит. Магнетит является ферромагнитным материалом и обладает значительными магнитными свойствами. По мере увеличения напряженности магнитного поля на частицы действует сила в направлении увеличения магнитной индукции. Таким образом, флотация загрязнений на поверхность происходит с их концентрацией в центре, если катушка индуктивности 10 выполнена в виде конуса, с уменьшением радиуса по направлению движения частиц. Происходит разделение потока на чистую воду и загрязнители. В зоне магнитной флотации предусмотрен отвод нефтешлама. Очищенная вода направляется в резервуар чистой воды 12, а флотошлам – в специальную емкость. Очищенная вода из резервуара 12 моечной машиной 2 используется повторно. Для устранения перелива воды через воздушное отверстие отвода электролитических газов предусмотрен датчик уровня 11, который регулирует работу насоса 5. Напряжение источника питания электромагнитной установки – 24 В.

С целью снижения электропотребления и уменьшения нагрева сточных вод [5, 6] в зоне электрохимической коагуляции катод размещен под углом к аноду, что создает неоднородное электрическое поле. В зоне магнитной флотации также создается неоднородное магнитное поле. Качество очистки сточной воды зависит от производительности установки (скорости движения жидкости в электромагнитном поле), напряженности электрического и магнитного поля, плотности тока на электродах и других

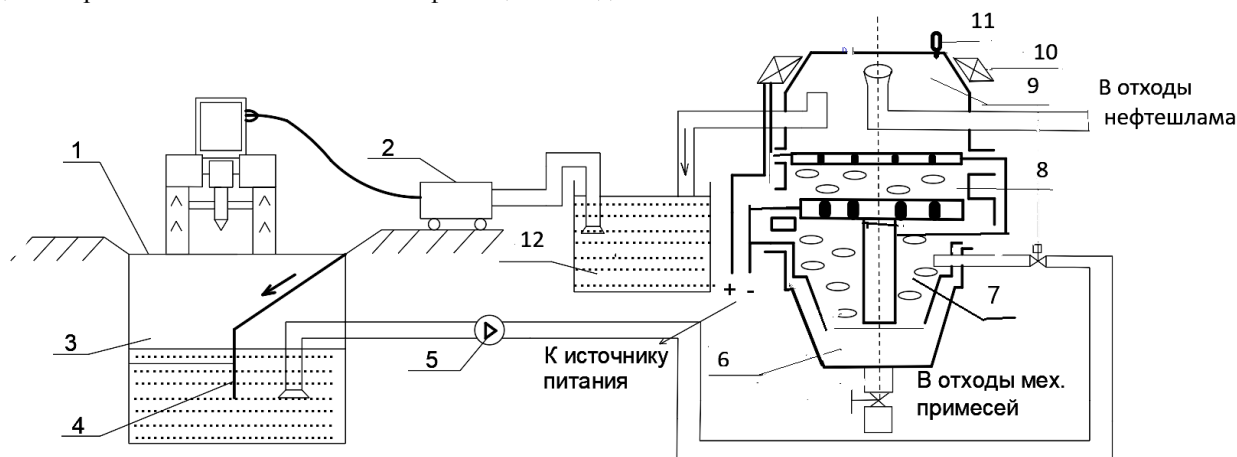


Рисунок 1. Технологическая схема наружной мойки сельскохозяйственной техники с очисткой сточных вод в электромагнитной установке: 1 – моечная площадка; 2 – моечная машина; 3 – резервуар сбора сточных вод; 4 – перегородка; 5 – насос; 6 – гидроциклон; 7 – зона электрохимической коагуляции; 8 – зона электрофлотации; 9 – зона магнитной флотации; 10 – коническая индуктивная катушка; 11 – датчик уровня; 12 – резервуар чистой воды

факторов. В источниках [7, 8] показано, что образующийся в процессе электролиза сточных вод гипохлорит натрия и другие окислители подавляют патогенную микрофлору и обеспечивают безопасные санитарно-гигиенические показатели воды.

Ранее, в источнике [9], обоснованы факторы, влияющие на энергетические затраты при очистке сточных вод от нефтепродуктов и конечную концентрацию загрязнений. Установлено, что процесс очистки, физическая модель которого реализована на лабораторной установке, зависит от следующих факторов:

X_1 – исходная концентрация загрязнений, мг/дм³;

X_2 – производительность очистки, дм³/с;

X_3 – плотность тока электрокоагулятора, А/м²;

X_4 – напряженность электрического поля в электрокоагуляторе, В/м;

X_5 – напряженность магнитного поля в магнитном флотаторе, А/м.

В целях снижения размерности факторного пространства на основе экспертных оценок проведено ранжирование названных факторов по степени их влияния на качество очистки. С учетом ранжирования и с целью упрощения математической модели факторы X_4 и X_5 не варьировали и зафиксировали на следующих уровнях: напряженность электрического поля в электрокоагуляторе $X_4 = 600$ В/м; напряженность магнитного поля магнитного флотатора $X_5 = 10$ кА/м.

Исследование зависимости удельных энергозатрат и конечной концентрации загрязнений от влияющих факторов проводилось с использованием метода планирования эксперимента в программе Statistika версии 10.0. Для этого сформирован трехуровневый план Бокса-Бенкена с добавлением дополнительных опытов в нулевом уровне для обеспечения более высокой предсказательной точности математической модели. По составленной матрице были проведены эксперименты с трехкратной повторностью. Интервалы варьирования управляющих факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни варьирования управляющих факторов

Уровни варьирования	Факторы		
	Исходная концентрация загрязнений, мг/дм ³	Производительность очистки, дм ³ /с	Плотность тока, А/м ²
	X_1	X_2	X_3
Основной (0)	2000	0,5	100
Верхний (+1)	2200	0,7	150
Нижний (-1)	1800	0,3	50
Интервал варьирования	200	0,2	50

Для аналитического описания удельных энергетических затрат на очистку стоков воды от нефтепродуктов Y_1 и их концентрации после очистки Y_2 выбраны математические модели второго порядка, включающие произведение между факторами

$$Y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (2)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}, b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коэффициенты регрессии; x_1, x_2, x_3 – кодированные значения факторов, соответственно, исходная концентрация нефтепродуктов в стоках, производительность установки, плотность тока.

В качестве исходных данных были использованы результаты 45-ти экспериментов, в которых значение факторов варьировалось в соответствии с матрицей предложенного плана их проведения. При расчетах значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента, и пошагово исключались сомножители, не являющиеся статистически значимыми коэффициентами. В итоге получена математическая модель, включающая первую степень переменной «уровень исходного загрязнения» и вторую степень переменной – «плотность тока». Пересчитанное для исходных натуральных показателей уравнение регрессии имеет вид:

$$Y_1 = 1,745 + 0,000625X_1 - 0,01X_3 + 0,00005X_3^2. \quad (3)$$

Подтверждена адекватность модели (3) путем использования анализа ANOVA и критерия Фишера. Поверхность отклика удельного расхода электроэнергии от исходной концентрации загрязнений и плотности тока представлена на рисунке 2.

Получена также математическая модель Y_2 – концентрация загрязнений в очищенной воде, мг/дм³. При составлении этой математической модели оказались значимы только коэффициенты при x_1, x_1^2, x_2 и x_3^2 . После оценки уровня значимости коэффициентов регрессии с помощью критерия Стьюдента и оценки адекватности модели по критерию Фишера получено пересчитанное уравнение для исходных показателей в следующем виде:

$$Y_2 = 4,0994 - 0,0009125X_1 - 8,1667X_2 - 0,002667X_3 + 0,004083X_1X_2 + 0,00001333X_3^2. \quad (4)$$

Поверхности отклика конечной концентрации загрязнений с учетом варьируемых уровней показателей «производительность установки X_2 » и «плотность тока X_3 » при фиксированных значениях исходной концентрации загрязнений представлены на рисунках 3-5.

Полученная математическая модель удельных затрат электроэнергии на очистку сточных вод имеет выпуклую поверхность, минимумов нет. В зависимость удельного расхода энергии вошли – исходная концентрация и плотность тока в электрокоагуляторе. При проведении экспериментов исходная концентрация загрязнений принята максимальная – 2200 мг/дм³. При этом обеспечена очистка от нефтепродуктов до требуемых минимальных показателей – менее 3 мг/дм³. На практике исходная концентрация загрязнений может колебаться в широких пределах, обычно она составляет 300-700 и не превышает 1000 мг/дм³. При концентрации исходных загрязнений (1000 мг/дм³) поверхность отклика конечной концентрации загрязнений представлена на рисунке 6.

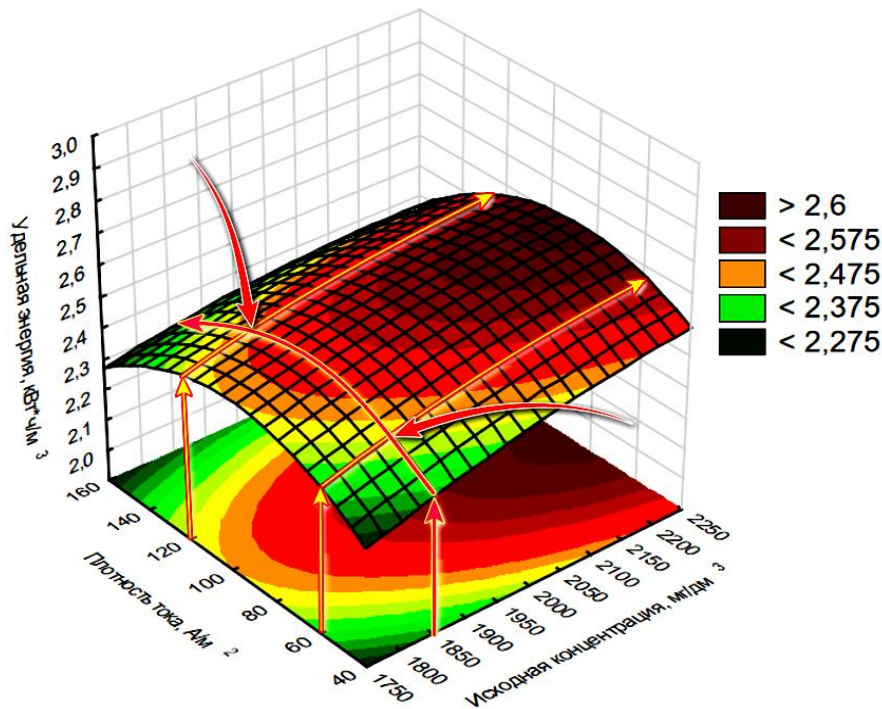


Рисунок 2. Поверхность отклика удельных затрат энергии от исходной концентрации загрязнений и плотности тока на аноде

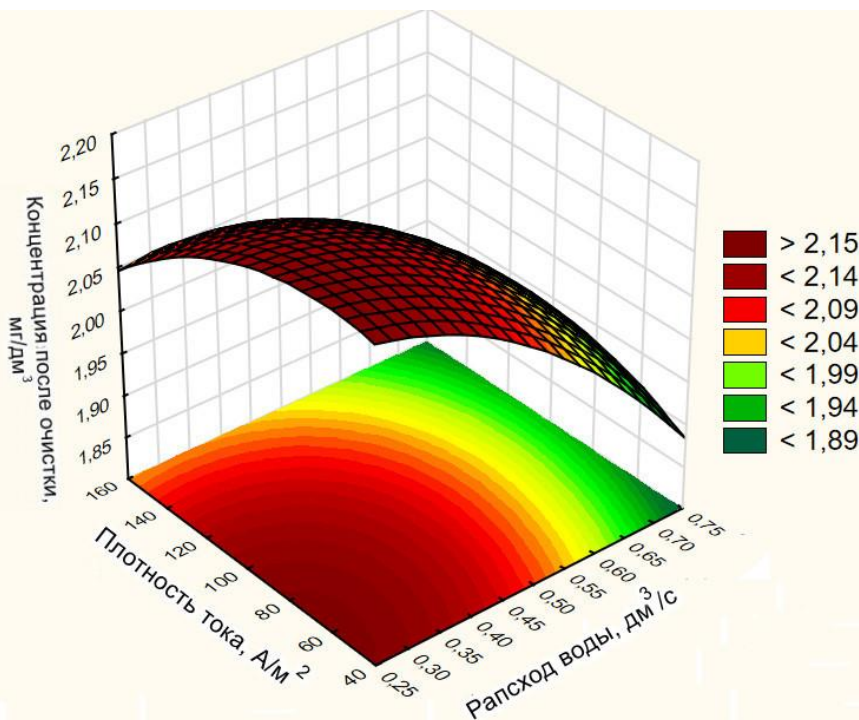


Рисунок 3. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и уровни варьирования плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений 1800 мг/дм³

Как показывает поверхность отклика на рис. 6, при малой производительности очистки (0,3 дм³/с) конечная концентрация загрязнений превышает 3,6 мг/дм³. Это можно объяснить тем, что при низкой производи-

тельности очистки сточные воды дольше подвергаются электрохимической коагуляции. Дисперсная среда перенасыщается коагулянтom – гидроксидом железа, а это, в свою очередь,

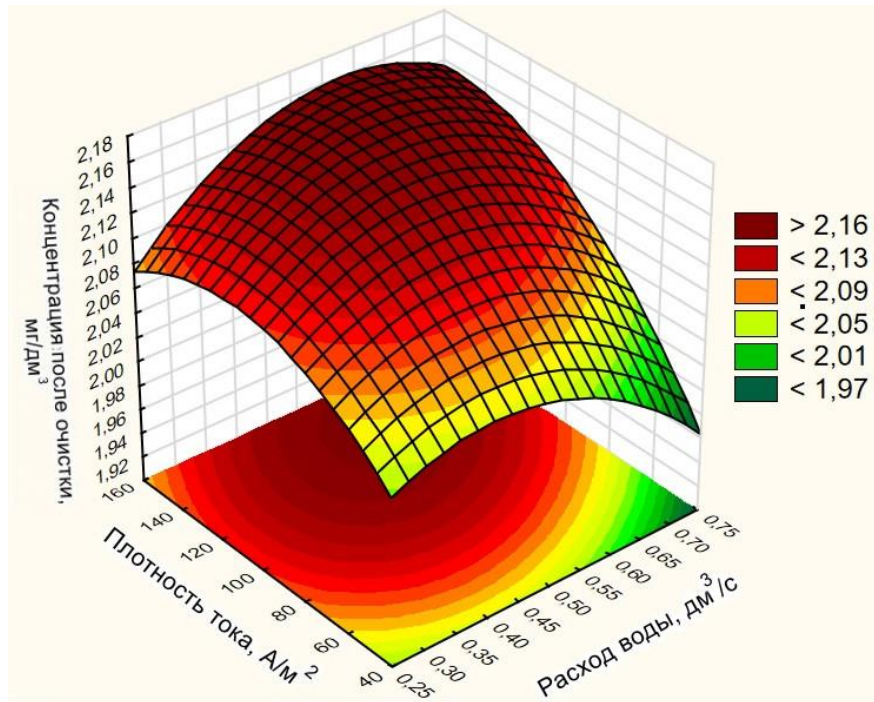


Рисунок 4. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и уровни варьирования плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений 2000 мг/дм³

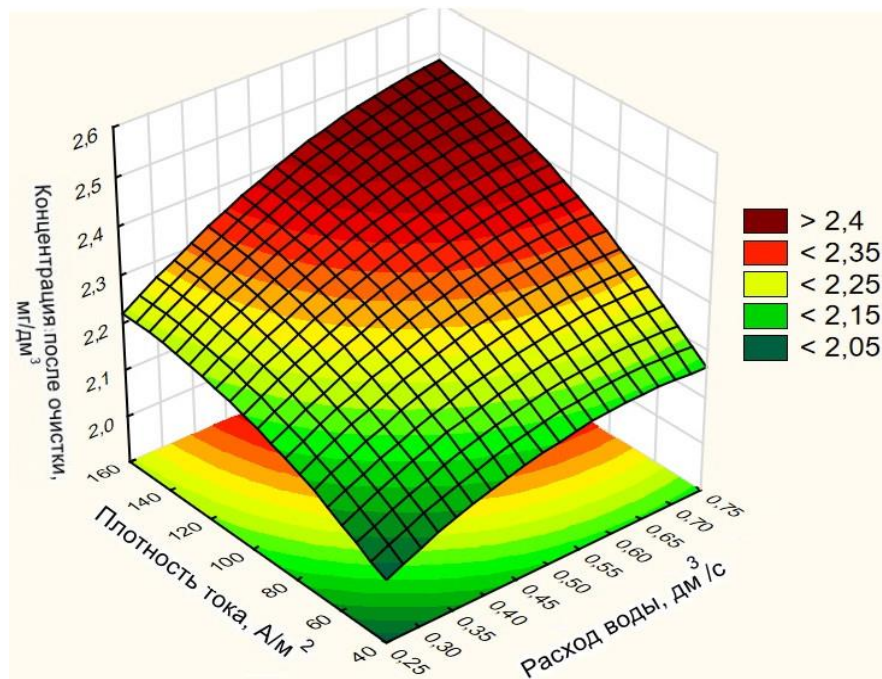


Рисунок 5. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и уровни варьирования плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений 2200 мг/дм³

приводит к обратному процессу – пептизации. Крупные хлопья начинают распадаться на множество мелких. Это явление хорошо известно в коллоидной химии. Проведенные исследования

по электрофлотации загрязнений показали, что при высокой плотности тока (более 120 А/м²) начинается бурное выделение пузырьков электролитических газов, которые не только флотируют хлопья загрязнений, но и

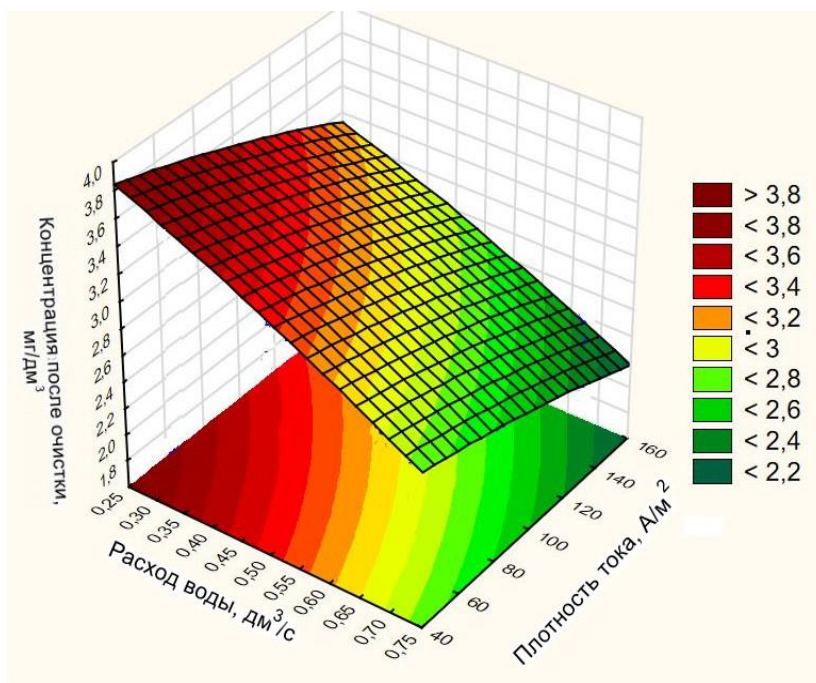


Рисунок 6. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений и уровни варьирования плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений 1000 мг/дм^3

разрушают их. Наступает пептизация. Также установлено [10], что при электрообработке сточных вод с увеличением удельного количества электричества свыше 150 Кл/дм^3 (плотность тока более 120 А/м^2) растут показатели БПК и ХПК в очищенной воде (биохимическое и химическое потребление кислорода).

С учетом полученных зависимостей и введением ограничения технологических параметров очистки сточных вод сформулирована задача поиска экстремума целевой функции с ограничениями. В качестве целевой функции принят минимальный удельный расход электроэнергии на очистку.

$$\begin{cases} \min \Theta(c_1, g, j) = 1,755 + 6,25 \cdot 10^{-4} c_1 - 0,01 j + \\ + 5,0 \cdot 10^{-5} j^2; \\ c_1 = c_0 \in (700; 1850); \\ c_2 = 4,1 - 9,1 \cdot 10^{-4} c_1 - 8,17 g - 2,67 \cdot 10^{-3} j + \\ + 4,1 \cdot 10^{-3} c_1 g + 1,33 \cdot 10^{-5} j^2; \\ c_2 \leq 3; \\ 60 \leq j \leq 120; \\ 0,4 \leq g \leq 0,7, \end{cases} \quad (5)$$

где $\min \Theta$ – целевая функция для нахождения минимального удельного потребления электроэнергии на очистку сточных вод, кВтч/м^3 ;

c_1 – область определения исходного параметра концентрации, мг/дм^3 .

Исходя из требований по допустимой концентрации нефтепродуктов, приняты ограничения по $c_2 \leq 3 \text{ мг/дм}^3$ (концентрация загрязнений сточных вод нефтепродуктами после очистки). Из-за возможного

наступления пептизации коагулянта введены ограничения по наибольшей плотности тока и образованию допустимой дозы коагулянта – по наименьшей, т.е. $60 \leq j \leq 120 \text{ А/м}^2$ (рис. 2), а также по производительности очистки по показателям предельно допустимой концентрации загрязнений после очистки – $0,4 \leq g \leq 0,7 \text{ дм}^3/\text{с}$ (рис. 6, 7).

Целевая функция (5) задана полиномом второго порядка, поэтому у нее могут существовать только глобальные экстремумы при отсутствии локальных. Для решения данной задачи применяли прямой поиск с оценкой целевой функции на границе области определения факторов и выбором минимального значения. В нашем случае целевая функция связана с двумя факторами, поэтому ее можно отобразить как трехмерную поверхность и найти экстремум визуально. С учетом ограничений наблюдаем локальный минимум на границах области при значении плотности тока 60 А/м^2 . Проверка по уравнению (3) регрессии для исходной концентрации до 1850 мг/дм^3 показывает, что минимум удельных энергозатрат соответствует этому значению плотности тока и составляет $2,42 \text{ кВтч/м}^3$ (рис. 2). Проверка ограничений для плотности тока 60 А/м^2 показывает, что при этом соответствуют два локальных минимума конечной концентрации загрязнений, с производительностью очистки $0,4$ и $0,7 \text{ дм}^3/\text{с}$ и выполняется условие, когда $c_2 \leq 3 \text{ мг/дм}^3$. Поэтому целесообразно выбрать параметр с большей производительностью. Поверхность отклика удельных энергозатрат с оптимальными технологическими параметрами обработки сточной воды представлена на рисунке 7.

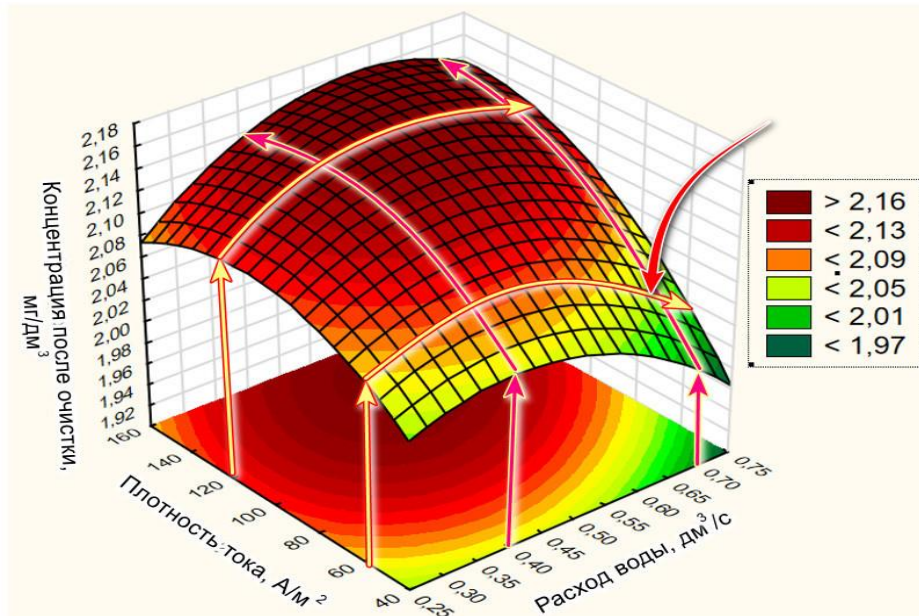


Рисунок 7. Поверхность отклика конечной концентрации загрязнений при оптимальных значениях плотности тока и производительности установки при исходной концентрации загрязнений до 1850 мг/дм³

Заключение

1. На основе экспериментальных данных получены математические модели зависимости удельных энергетических затрат очистки сточных вод от нефтепродуктов при варьировании показателей их исходной концентрации и плотности тока, а также конечной концентрации загрязнений при тех же факторах и производительности очистки. Установлено, что для минимизации потребления электроэнергии при исходной концентрации загрязнений от 700 до 1850 мг/дм³ целесообразно выбрать следующие технологические параметры: плотность тока – 60 А/м²; производительность очистки – 0,7 дм³/с; напряженность электрического поля и напряженность магнитного поля – в среднем 600 В/м и 10 кА/м соответственно.

2. Приведенные технологические параметры могут быть положены в основу инженерного расчета электромагнитной установки по конструктивным размерам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ксенофонтов, Б.С. Флотационная очистка жиро-содержащих сточных вод / Л.А. Дулина, Б.С. Ксенофонтов, М.Н. Моисеев // Безопасность жизнедеятельности. – 2002. – № 12. – С. 19-22.
2. Дерягин, Б.В. Микрофлотация / Б.В. Дерягин и [и др.]. – М.: Химия, 1986. – 112 с.
3. Алексеев, Е.В. Основы технологии очистки сточных вод флотацией: монография / Е.В. Алексеев. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 136 с.
4. Пошилин, В.С. Блочно-модульная установка для очистки сточных вод / В.С. Пошилин, М.А. Коваленко // Мир транспорта. – 2014. – № 2. – С. 168-179.

5. Душкин, С.С. Ресурсосберегающие технологии очистки сточных вод: монография / С.С. Душкин, А.Н. Коваленко, М.В. Дектябрь, Т.А. Шевченко. –Х.: ХНАГУ, 2014. – 146 с.

6. Крутов, А.В. Повышение эффективности электрокоагуляции топливно-смазочных фракций в сточных водах моек сельскохозяйственной техники путем их обработки в неоднородном электрическом поле / А.В. Крутов, М.А. Бойко // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 5. – С. 153-158.

7. Крутов, А.В. Обеззараживание сточных вод машинных дворов продуктами электрохимической активации / А.В. Крутов, М.А. Бойко // Перспективы и направления развития энергетики АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 ноября 2007 г. / Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т; под ред. М.А. Прищепова. – Минск: БГАТУ, 2007. – С. 246-249.

8. Бойко, М.А. Повышение степени очистки и обеззараживания стоков постов мойки автотракторной техники электротехнологическими методами / М.А. Бойко // Агропанорама. – 2024. – № 1. – С. 29-33.

9. Крутов, А.В. Оптимизация процесса очистки сточных вод постов мойки автотракторной техники по энергетическим затратам / А.В. Крутов, М.М. Дечко, М.А. Бойко // Наука и техника. – 2019. – № 5. – С. 436-442.

10. Бойко, М.А. Механизм коагуляции загрязнений при электрохимической очистке сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники / М.А. Бойко, А.В. Крутов // Агропанорама. – 2025. – № 2. – С.17-24.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 21.07.2025

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОЙ СМЕСИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

И.А. Павлович,

ст. преподаватель каф. практической подготовки студентов БГАТУ

Исследование посвящено разработке и применению эффективных грунтозамещающих композиций (гидрогель-графит) для заземляющих устройств в высокоомных грунтах. Разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать состав смесей. Экспериментально подтверждено снижение сопротивления на 40-60 % и стабилизация электрофизических параметров заземления. Результаты показывают уменьшение сезонных колебаний в 2-3 раза.

Ключевые слова: заземляющие устройства, удельное сопротивление грунта, гидрогель, графит, электрофизические свойства, математическое моделирование, оптимизация.

The research is focused on developing and utilizing effective soil substitute compositions (hydrogel-graphite) for grounding devices in high-resistance soils. The mathematical model was created to improve the composition of mixtures. An experimental confirmation of a 40-60% decrease in resistance and stabilization of the electrophysical parameters of the grounding was obtained. The results show a decrease in seasonal fluctuations by 2-3 times.

Key words: grounding devices, soil resistivity, hydrogel, graphite, electrophysical properties, mathematical modeling, optimization.

Введение

Заземляющие устройства электроустановок должны обеспечивать безопасность людей и животных, защиту электрооборудования любого напряжения, а также надежность работы в различных эксплуатационных режимах, включая защиту от атмосферных перенапряжений (грозозащиту). При этом они должны соответствовать нормативным требованиям к электрофизическим параметрам на протяжении всего срока службы электроустановки. Однако на грунтах с высоким удельным сопротивлением и низкой влажностью достижение и стабильность этих условий становится сложной технической задачей [1].

Значительное влияние на электрофизические параметры заземления оказывает удельное сопротивление грунта [2]. Оно зависит от множества факторов, включая температуру, влажность, тип грунта, его плотность и структуру [3]. Наибольшее влияние оказывают температура [4] и влажность [5], так как они напрямую связаны с климатическими условиями. Исследования показывают, что при снижении температуры с 0°C до -10°C удельное сопротивление грунта на глубине 0,3 м увеличивается в 10 раз, а на глубине 0,5 м – в 3 раза. Это связано с дифференцированным промерзанием грунтовых слоев, где поверхностные слои более подвержены температурным колебаниям [6]. В свою очередь, увеличение влажности грунта приводит к уменьшению его удельного сопротивления, то есть увеличивает его электрическую проводимость.

Структура грунта, особенно в местах с высоким уровнем грунтовых вод, определяется его пористо-

стью, влагоемкостью и капиллярными свойствами [7]. Однако глубина залегания грунтовых вод варьируется по площади [8], что затрудняет обеспечение равномерной влажности по всей длине заземлителя. Поэтому при проектировании заземляющих устройств необходимо учитывать особенности грунтовых условий и местности для обеспечения оптимального контакта заземлителя с грунтом и закладывать запас площади переходного контакта земля-грунт [9].

Актуальность данной работы заключается в разработке метода обработки грунта, который позволяет снизить удельное сопротивление и стабилизировать влажность в околоэлектродной зоне за счет применения специальных грунтозамещающих композиционных смесей (ГКС) [10]. Использование таких смесей способствует уменьшению сопротивления заземляющих устройств и уменьшению коэффициента сезонности [11]. Это также позволяет сократить капитальные затраты на монтаж за счет уменьшения металлоемкости конструкции, площади, отводимой под заземление, и объема земляных работ.

Проблемы надежности работы заземляющих устройств и обеспечения электробезопасности освещались в работах А.И. Яковса, Л.М. Веденеевой, А.В. Чудинова, Д.Е. Кучеренко, Д.Н. Грищенко, В.А. Михайловой, В.Г. Андруша, А.И. Федорчука, М.А. Короткевич.

Целью данной статьи является разработка и экспериментальное обоснование применения грунтозамещающей композиционной смеси для повышения эффективности работы и снижения затрат на сооружение заземляющих устройств.

Основная часть

На практике применяют различные методы снижения сопротивления заземления, каждый из которых имеет свои особенности. Стабилизация влажности грунта через искусственное увлажнение или дренаж минимизирует сезонные колебания [11], а глубинные заземлители меньше зависят от температурных изменений благодаря установке, ниже зоны промерзания [9; 12].

Эффективным решением является увеличение числа электродов [13] и химическая обработка грунта, хотя последняя требует регулярного обновления из-за вымывания солей [14-16]. Заземлители в бетонной оболочке обладают повышенной проводимостью и коррозионной стойкостью, но нуждаются в точном расчете состава [17]. Наиболее перспективны грунтозаменяющие композиционные смеси с проводящими компонентами, обеспечивающие стабильность параметров при температурных колебаниях [6; 13,14; 18-19]. Однако такие смеси могут влиять на природные свойства грунта [20, 21], их эффективность зависит от влажности и требует мониторинга [22, 23], а применение связано с дополнительными затратами, что требует экономического обоснования.

Методика проведения исследований

Конструктивные особенности заземляющих устройств (ЗУ) определяют методы расчета их параметров [24]. Электролитические заземлители характеризуются электрофизическими процессами в пористых средах, где проводимость зависит от объема природного и искусственного электролита, а также пористости грунта [25].

Расекание тока в грунте обусловлено ионной проводимостью электролита [26], однако существующие модели не учитывают структурно-фазовые изменения грунта при эксплуатации [27, 28]. Традиционные методы расчета сопротивления ЗУ не адаптированы для ГКС, в которых удельное сопротивление зависит от насыщения электролитом [7].

Согласно теории перколяции, электролит в ГКС заполняет поры почвы, формируя непрерывные токопроводящие пути между слоями [28]. При воздействии высокочастотных токов заземляющий стержень характеризуется распределенной эквивалентной схемой, включающей последовательные элементы R и L , шунтированные C (рис. 1).

Формулы для определения этих параметров имеют следующий вид [29]:

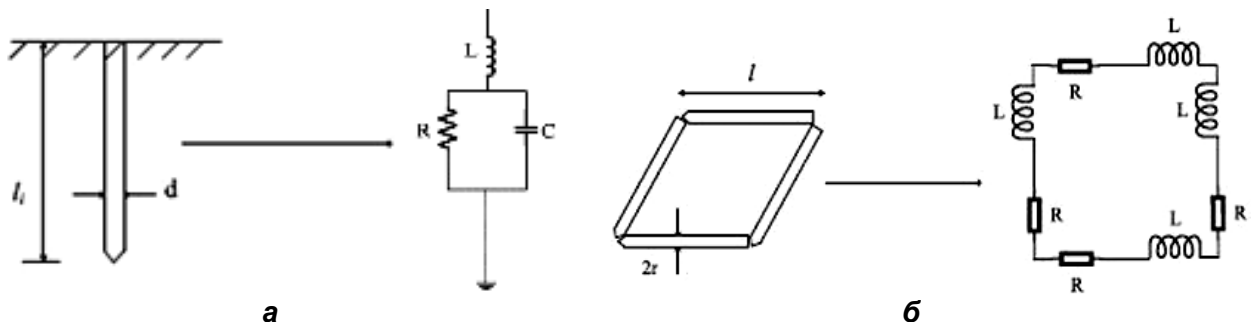


Рисунок 1. Эквивалентная схема заземления

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \log \frac{2l}{r}, \tag{1}$$

где R – сопротивление грунта, Ом;
 ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;
 l – длина электрода, м;
 r – радиус электрода, м;

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\log \frac{2l}{r}}, \tag{2}$$

где C – емкость грунта, Ф;
 ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;
 ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость грунта, Ф/м;

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \log \frac{2l}{r}, \tag{3}$$

где L – индуктивность грунта, Гн;
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

На рисунке 1 представлены эквивалентные схемы для разных частотных диапазонов (рис. 1а – для частот ниже 100 кГц; рис. 1б – для более высоких частот). Граничная частота 100 кГц обусловлена изменением характера реакции сопротивления заземления, которое на высоких частотах становится распределенным с резонансными пиками.

Импеданс системы заземления описывается следующими уравнениями, выведенными на основе представленных эквивалентных схем:

$$Z = j\omega L + \frac{R \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}, \tag{4}$$

где Z – импеданс системы заземления, Ом;
 $j\omega$ – комплексная угловая частота, рад/с;
 ω – угловая частота, рад/с.

$$Z = \frac{R}{1 + (\omega RC)^2} + j \left(\omega L - \frac{\omega R^2 C}{1 + (\omega RC)^2} \right); \tag{5}$$

$$|Z| \sin \phi = \omega L - \frac{\omega R^2 C}{1 + (\omega RC)^2}. \tag{6}$$

Таким образом, при очень низкой частоте или

постоянном токе импеданс заземления равен сопротивлению R

$$Z_0 = R_0. \quad (7)$$

На резонансной частоте доминирует только действительная составляющая импеданса ($\omega \neq 0$)

$$Z = \frac{R}{1 + (\omega RC)^2}. \quad (8)$$

При этом резонансная частота возникает, когда мнимая составляющая импеданса равна нулю

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC - (RC)^2}}; \quad (9)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC - (RC)^2}}. \quad (10)$$

Как показано в исследованиях [30, 31], модель Коула-Коула эффективно описывает комплексное удельное сопротивление грунта, учитывая частотную зависимость его диэлектрической проницаемости. Этот подход позволяет точно моделировать электромагнитные процессы в широком частотном диапазоне, объединяя анализ проводимости и диэлектрических свойств.

Данные выводы подчеркивают, что при проектировании заземления систем электроснабжения с промышленной частотой тока 50 Гц достаточно учитывать только проводимость грунта, что упрощает моделирование [30, 31].

Проведенные эксперименты по определению зависимости удельного сопротивления ГКС от влажности при различной температуре, результаты которых представлены на рисунке 2, выявили критическое влияние влажности на сопротивление грунта, особенно в диапазоне $-5^\circ\text{C} \dots -3^\circ\text{C}$, где наблюдается характерный перегиб на кривой, связанный с фазовым переходом воды [11]. Как указано в источнике [10], зола требует в 2,5 раза большего объема для достижения аналогичного эффекта.

Эти данные подчеркивают необходимость комплексного учета влажностных и температурных факторов, а также состава грунта при проектировании. На рисунке 3 показана зависимость удельного сопротивления смеси от количества внесенного графита, а

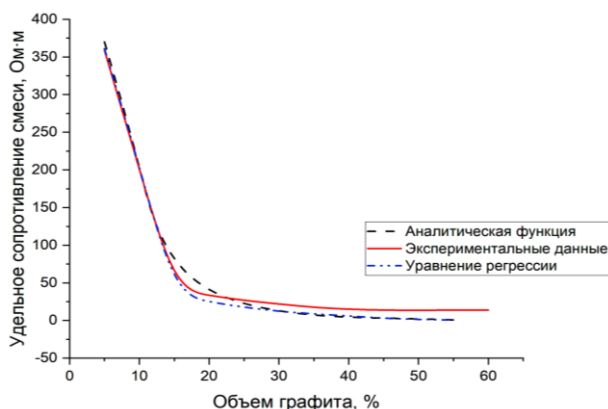


Рисунок 3. Анализ функции зависимости удельного сопротивления ГКС от объема внесения графита

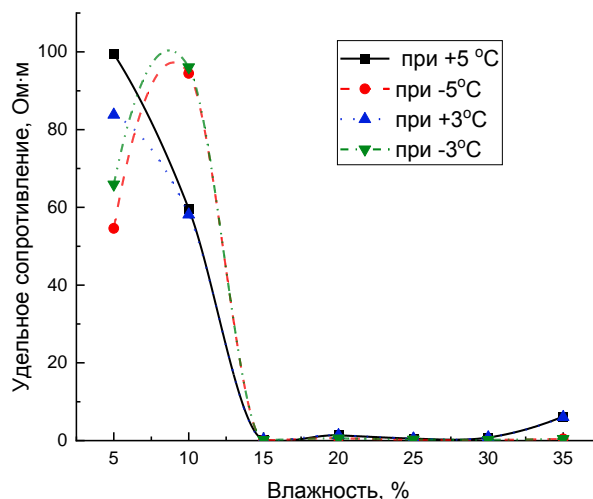


Рисунок 2. Зависимости удельного сопротивления смеси от влажности при различных температурах

также результаты математического моделирования экспериментальных и аналитических функций.

Зависимость удельного сопротивления ГКС от объема внесения графита описывается следующей формулой:

$$y = A2 + \frac{(A1-A2)}{(1 + \exp((x-x0)/dx))}. \quad (12)$$

Определим коэффициенты $A1=374,78305 \pm 1,37826$ и $A2=1,49554 \pm 0,73221$ для данного уравнения. Однако это уравнение слишком громоздкое для его использования при расчетах.

На основании анализа экспериментальных данных установлено, что зависимость $\rho(C)$ носит экспоненциальный характер

$$\rho(C) = \rho_0 \cdot e^{(-k \cdot C)}, \quad (13)$$

где $\rho(C)$ – удельное сопротивление смеси при содержании графита, Ом·м;

ρ_0 – 50 Ом·м – сопротивление исходного грунта;

k – коэффициент эффективности графита;

C – массовая доля графита, %;

Определим коэффициент эффективности графита k в данной смеси. Для этого проведем расчет при массовой доле графита $C=15\%$ ($\rho=18$ Ом·м)

Model	Boltzmann
Equation	$y = A2 + (A1-A2)/(1 + \exp((x-x0)/dx))$
Plot	Удельное сопротивление смеси, Ом·м
A1	$374,78305 \pm 1,37826$
A2	$1,49554 \pm 0,73221$
x0	$10,27241 \pm 0,01766$
dx	$1,2136 \pm 0,05122$
Reduced Chi-Sqr	1,03586
R-Square (COD)	0,99999
Adj. R-Square	0,99996

$$18 = 50 \cdot e^{(-k \cdot 15)}$$

$$k = -\ln(18/50) / 15 \approx 0,068^{-1}$$

Окончательный вид формы, показывающей зависимость сопротивления от количества графита

$$\rho(C) = 50 \cdot e^{(-0,068 \cdot C)}$$

Исследования, проведенные в работе [10], подтверждают эффективность углеродных добавок (графита ГЛС и древесной золы до 45% массы) для модификации грунтов заземляющих контуров. При 0°C замерзание влаги вызывает рост удельной проводимости (рис. 4а), однако графитовая добавка обеспечивает электронную проводимость, компенсируя этот эффект (рис. 4б).

Экспериментальные исследования [11] выявили принципиальные различия в поведении материалов: в естественном грунте ледяные линзы и прослойки (рис. 4а) существенно увеличивают сопротивление, создавая барьеры для тока, тогда как разработанная смесь демонстрирует уникальную температурную зависимость (рис. 4б). При нагреве смеси наблюдается кратковременный рост сопротивления, связанный с фазовым переходом влаги, после чего значение стабилизируется около 5 Ом·м. Полученные данные свидетельствуют о значительном снижении температурного влияния на удельное сопротивление в приэлектродной зоне, что подтверждается графическими зависимостями (рис. 4б) и имеет важное практическое значение для проектирования заземляющих устройств.

Проведенные нами исследования позволяют описать уменьшение удельного сопротивления грунта в месте монтажа заземляющего устройства, как величину, зависящую от изменения удельного сопротивления грунта, на основе экспериментальных данных, следующим выражением (14):

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_3 \cdot 0,98^{\frac{d_{\text{смеси}}}{d_3}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho_3} \right)^{\frac{1}{3\pi}}, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{экв}}$ – искомое расчетное удельное сопротивление, Ом·м;

ρ_3 – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$d_{\text{смеси}}$ – диаметр области вокруг электрода, заполненной смесью, м;

d_3 – диаметр заземлителя, м;

$\rho_{\text{смеси}}$ – удельное сопротивление смеси, Ом·м;

$$d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{V_{\text{смеси}}}{l}}, \quad (15)$$

где $V_{\text{смеси}}$ – объем вносимой смеси, м³;

l – длина электрода заземления, м.

Экспериментальная проверка разработанной модели на образцах с различным составом ГКС показала преимущество разработанной формулы (14) в точности описания влияния смеси на сопротивление заземления. Для подтверждения результатов была применена расчетная методика [32], учитывающая сопротивление глубинного заземлителя без компенсирующей смеси и коэффициент сезонности для Минской области [1].

С учетом того, что измеренное удельное сопротивление грунта составляет 526 Ом·м. и подставив в выражение величины, получим: $R_B=146,4$. Полученное значение подтверждается экспериментом, описанным выше, в котором среднее значение сопротивления глубинного заземлителя составляет 152,6 Ом.

Для оценки эффективности ГКС применим расчетную формулу из исследования [33], позволяющую разделить сопротивление глубинного заземлителя с учетом оптимизированных электрофизических характеристик.

$$d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{0,02}{3}} + 0,012 = 0,082 + 0,012 = 0,094 \text{ м.}$$

$$\rho_{\text{экв}} = 526 \cdot 0,98^{\frac{0,1}{0,012}} \cdot \left(\frac{50}{526} \right)^{\left(\frac{1}{3\pi} \right)} = 349,75 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Полученное при расчетах формулы (3) из работы [33] значение 66,5 близко к экспериментальным, составившим 69,0 Ом.

Определенный интерес представляет обратный расчет «мнимого» диаметра заземлителя при использовании ГКС. Полученные данные покажут эффективность применения смеси совместно с глубинным заземлителем. Для этого из формулы (14) выразим значение d_3 , эффективный диаметр такого заземлителя:

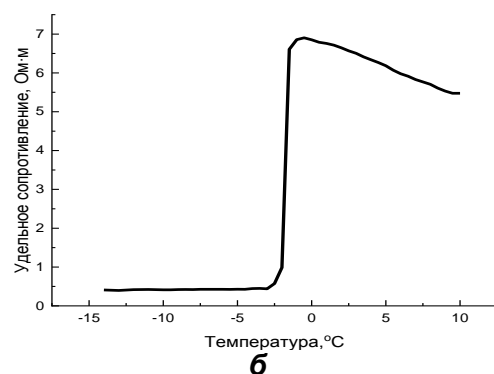
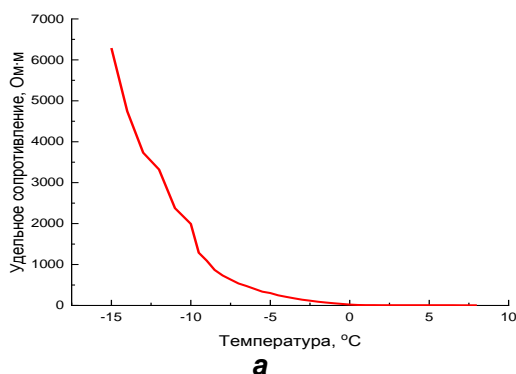


Рисунок 4. Зависимость удельного сопротивления грунта (а) и экспериментальной смеси (ГКС) (б) от температуры при влажности 35 %

$$d_3 = \frac{2 \cdot l}{e^b} \cdot \frac{B}{V}; \quad (16)$$

$$b = \frac{R_B - \frac{\varphi \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \frac{B}{V}}{\frac{\varphi \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \frac{B}{V}}, \quad (17)$$

где R_B – сопротивление вертикального заземлителя, Ом;

φ – экспериментальный коэффициент сезонности для смеси;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l_B – длина вертикального заземлителя, м;

t – расстояние до середины длины вертикального стержня от поверхности грунта, м.

Подстановка в данное выражение значения R_B , полученного при расчете формул (15) и (16) из работы [33], показывает, что эффективная зона влияния увеличивается с 0,05 м до 0,95 м. Это связано с формированием стабильной влагонасыщенной зоны, которая снижает переходное сопротивление [33]. Традиционные методы расчета в этом случае будут недостаточно точными из-за нелинейного характера изменения сопротивления под влиянием внешних факторов.

Для более точного анализа был применен метод электроимпедансной томографии с использованием конечно-элементного моделирования (31 757 треугольных элементов). Детализированная сетка (рис. 5) позволила точно смоделировать распределение потенциалов в заземляющей системе 3×3 площадью 18×18 м.

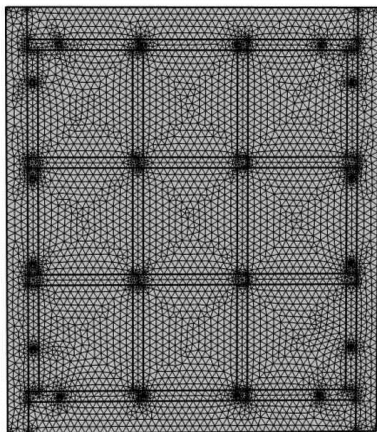


Рисунок 5. Принципиальная схема сегментации модели сетки заземления

В двумерном квазистатическом поле граничная задача поля сетки заземления может быть эквивалентна вариационной задаче. Общая площадь S поля преобразуется в сумму площадей разделенных треугольных единиц, а граничная задача может быть записана следующим образом:

$$F(\varphi) = \int_s \frac{1}{2} \sigma \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy =$$

$$= \sum_{n=1}^{n_0} \int_{s_n} \frac{1}{2} \sigma \int_s \frac{1}{2} \sigma \left[\left(\frac{\partial \varphi_n}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_n}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (18)$$

где σ – электропроводность среды, Ом·м;
 φ – распределение электрического потенциала, В;
 n_0 – общее число дискретных элементов;
 s_n – площадь n -го элемента, м².

Матрицы локальных коэффициентов объединяются в глобальную матрицу K [34], формируя систему уравнений МКЭ: $K\varphi = 0$.

При моделировании заземляющей сети:

1. Входной/выходной ток I прикладывается к узлам m и n .
2. Опорный узел ($\varphi=0$) выбирается для устранения неопределенности.
3. Остальные узлы остаются свободными.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & 0 & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & 0 & \dots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{m1} & K_{m2} & \dots & 0 & \dots & K_{mN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & 0 & \dots & K_{nN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{l1} & K_{l2} & \dots & 1 & \dots & K_{lN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{N1} & K_{N2} & \dots & 0 & \dots & K_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_m \\ \vdots \\ \varphi_n \\ \vdots \\ \varphi_l \\ \vdots \\ \varphi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \\ \vdots \\ -I \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Для решения системы уравнений применяется метод исключения Гаусса, позволяющий определить узловые потенциалы.

Параметры рассчитываются по уравнениям (1) для сопротивления и (2) – для индуктивности. Эквивалент вертикального и горизонтального элементов заземлителя, модель ячейки (рис. 1), сопротивление заземляющего устройства и емкость относительно земли определяются по формулам (1) и (2) соответственно, причем индуктивность и емкость при переходных процессах пренебрежимо малы, как показано ранее. Поэтому ключевым параметром, влияющим на расчеты, является удельное сопротивление почвы (ρ), характеризующее ее проводимость

$$R_i = \frac{\rho}{l_i} \left(\ln \frac{\varepsilon_r l_i}{d} - 1 \right), \quad (20)$$

где l_i – общая длина заземляющего стержня, м;
 ε_r – относительная проницаемость твердого тела, Ф/м.
 d – диаметр заземляющего стержня, м;

В результате расчета получаем значение, равное 64,6, что близко к значению, полученному при расчете по формуле (3), предложенной в источнике [34].

Заключение

Проведенные исследования выявили влияние состава ГКС на их удельное сопротивление. Установлено, что гидрогель стабилизирует влажность, нормализуя электрофизические свойства грунта и снижая сопротивление заземления. На основе полученных данных выведены зависимости сопротивления от температуры, влажности и содержания компонентов, что позволяет оптимизировать состав смесей для различных условий.

Разработана методика расчета сопротивления заземляющих устройств с применением ГКС.

Создана математическая модель оптимизации параметров заземления с учетом характеристик ГКС. Полученные результаты подтверждают перспективность применения таких смесей для повышения эффективности систем заземления в различных климатических условиях. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение добавок ингибиторов коррозии и гидросорбов для оптимизации состава ГКС.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Грант № T25УЗБ-024).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ

1. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339-2022 (33240). – Введ. 20.12.2022. – Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2022. – 593 с.
2. IEEE Std 142 -2007 IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. – Approved 7 June, 2007. – 225 p.
3. Веденева, Л.М. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств / Л.М. Веденева, А.В. Чудинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 89-100.
4. Unde, M.G. Grounding grid performance of substation in two layer soil – a parametric analysis / M.G. Unde, B.E. Kushare // International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. – 2012. – Vol. 1, № 2. – P. 69-76.
5. Coelho Wilson, L. The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems / L. Coelho Wilson, A. Piantini, A.D. Almaguer Hugo [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2015. – Vol. 118. – P. 76-82.
6. Зайцева, Н.М. Определение температуры грунта на глубине заземлителей / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова, М.Я. Клецель // Электричество. – 2011. – № 7. – С. 19-24.
7. Веденева, Л.М. Исследование влияния влажности и пористости грунтов на величину их проводимости / Л.М. Веденева, А.В. Чудинов // Вестник ПНИПУ. Безопасность и управление рисками. – 2016. – № 5. – С. 119-130.
8. Леонович, И.И. Глубина промерзания грунтов – важнейший фактор водно-теплового режима земляного полотна / И.И. Леонович, Н.П. Вырко // Строительная наука и техника. – 2011. – № 5. – С. 27-35.
9. Ротанова, Н.М. Глубинная электропроводность Земли / Н.М. Ротанова, А.Н. Пушков. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
10. Павлович, И.А. Способ внесения смесей для оптимизации заземления при монтаже вертикальных составных заземлителей / И.А. Павлович, С.М. Барайшук, М. Муродов, М. Набиев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2024. – Т. 67, № 6. – С. 475-487.
11. Dependence of Soil Parameters on Frequency: Experimental Results, Predictive Formula, and Impact on Grounding Impulse Response / S. Visacro [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – Vol. 27, № 2. – P. 927-935.
12. Nettleton, L.L. Geophysical Prospecting for Oil / L.L. Nettleton. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1940. – 444 p.
13. Alipio, R. Frequency dependence of soil parameters: effect on the lightning response of grounding electrodes / R. Alipio, M.H.M. Vale, C. Visacro // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55, № 1. – P. 132-139.
14. Akbari, M.A.M. Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters and Its Effect on the Lightning Performance of Grounding Systems / M.A.M. Akbari, A. Shayegani, M. Mirzaie // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55, № 4. – P. 739-746.
15. Kavka, D. Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems / D. Kavka // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2014. – P. 1-11.
16. Visacro, S. Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results / S. Visacro, R. Alipio, A. Schroeder // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2015. – Vol. 57, № 1. – P. 1-7.
17. Androvitsaneas, V.P. Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds / V.P. Androvitsaneas, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 139. – P. 109-115.
18. El-Shamy, A. M. Effect of moisture contents of bentonitic clay on the corrosion behavior of steel pipelines / A.M. El-Shamy, M.F. Shehata, A.I. M. Ismail // Applied Clay Science. – 2015. – Vol. 114. – P. 461-466.
19. Yutthagowith, P. Design of Counterpoise Grounding Electrodes for Transmission Towers in High Soil Resistivity Area / P. Yutthagowith, A. Kunakorn // 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2018). – Rzeszow, Poland, 2018. – P. 1-5.
20. Kulin, D. Numerical analysis of electromagnetic effects in measurements of partially dependent soil elec-

trical properties / D. Kulin // Progress in Electromagnetics Research M. – 2019. – Vol. 79. – P. 179-189.

21. Characterization of frequency-dependent electrical properties of sandy soil with variable grain size and water content / Z.G. Dasios [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – Vol. 26, № 5. – P. 1629-1636.

22. EMT-compatible wideband model of grounding electrodes buried in frequency-dependent soil / B. Salari [et al.] // International Conference on Power Systems Transients (IPST2019). – 2019.

23. IEEE Xplore Digital Library. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org> (date of access: 05.05.2025).

24. Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2007. – 75 с.

25. Ichwan, B. Coconut husk biochar application on increasing growth and yield of maize plant / B. Ichwan // Systematic Reviews in Pharmacy. – 2020. – Vol. 11, № 2. – P. 187-192.

26. Eduful, G. Palm kernel oil cake as an alternative to earth resistance-reducing agent / G. Eduful, J.E. Cole // IEEE Conference Publications. – 2009. – P. 1-4.

27. Kostic, M. B. Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud / M.B. Kostic [et al.] // IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution. – 1999. – Vol. 146, № 1. – P. 1-6.

28. Буданов, П.Ф. Модель перколяции проводимости процесса электролитического заземления /

П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк // Озброєння і військова техніка. – 2012. – Вип. 2 (30) – С. 8-17.

29. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP / W.H. Pelton [et al.] // Geophysics. – 1978. – Vol. 43, № 3. – P. 588-609.

30. Han, Y.A. Unified inversion scheme to process multifrequency measurements of various dispersive electromagnetic properties / Y. Han, S. Misra // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. – 151. – P. 23-39.

31. García-Fiscal, S. Sensitivity of galvanic and inductive Induced Polarization methods to the Cole-Cole parameters / S. García-Fiscal, C. Flores // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 158. – P. 1-10.

32. Временные руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 3 – 750 кВ. – М.: Энергосетьпроект, 1979. – 102 с.

33. Павлович, И.А. Методики расчета сопротивления заземляющего устройства, выполненного с применением грунтозамещающей смеси, для оптимизации электрофизических параметров грунта / И.А. Павлович, В.М. Барайшук, В.В. Богданович // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2023. – № 4 (106). – С. 146-157.

34. Research on grounding grid electrical impedance tomography algorithm based on Tikhonov and TV hybrid regularization / X. Yan [et al.] // Chinese Journal of Scientific Instruments. – 2021. – Vol. 42. – P. 160-171.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.06.2025

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 2-е полугодие 2025 года: для индивидуальных подписчиков - 49,62 руб., ведомственная подписка - 52,71 руб.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКОЙ БАЗЫ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ, ВЕЙВЛЕТНЫХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ ВИБРОСИГНАЛОВ ФОРСУНОК

В.Е. Тарасенко,

зав. каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

О.Ч. Ролич,

ведущ. инженер-программист ООО «ЮНИК-ЛАБ», канд. техн. наук, доцент

А.А. Жешко,

ведущ. науч. сотр. лаборатории системы машин и технического использования машинно-тракторного парка РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук, доцент

На основании результатов научно-исследовательской работы по испытанию форсунок CRIN2 автотракторных двигателей различной наработки на диагностическом стенде и анализа их вибрационных характеристик выполнено разложение исходного сигнала на уровни и регистрация амплитуд колебаний, определены характерные частоты колебания элементов форсунки. В совокупности массив данных спектрограмм, полученных с использованием математического пакета MATLAB, формирует теоретико-практическую базу результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов вибросигналов форсунок поколения CRIN2.

Ключевые слова: форсунка, стенд, метод, износ, датчик, сигнал, спектр.

Based on findings of experimental research involving vibration analysis of CRIN2 injectors of automotive and tractor engines with varying operating hours using a dedicated diagnostic test bench, original signal decomposition into constituent levels was performed, vibration amplitudes were recorded and characteristic vibration frequencies of injectors' components were identified. In total, the data array of spectrogram obtained with the use of the MATLAB mathematical package form the theoretical and practical basis for the results of analyzing the dynamics of spectral, wavelet and statistical images of vibration signals of CRIN2 generation injectors.

Key words: injector, stand, method, wear, sensor, signal, spectrum.

Введение

При вибрационном диагностировании форсунок поколения CRIN2 с электромагнитным управлением важно установить связь параметров выходного вибрационного сигнала со структурным параметром объекта, например, зазором в сопряжении иглы и корпуса распылителя, непосредственно характеризующим техническое состояние форсунки. Вибрационный процесс, возникающий при работе форсунки в соответствии с управляющими импульсами группы магнитов, является в основном следствием ударных взаимодействий импульсного характера. Ударный процесс имеет свой спектр, составляющие которого можно оценить, измеряя максимальные величины выходного сигнала, пропускаемого через ряд узкополосных фильтров с близкими частотами. Искажение спектра входного воздействия, вызываемое реакцией колебательной упругой системы топливной форсун-

ки, передающей сигнал к вибропреобразователю, а также влияние на сигналы исследуемого сопряжения других сопряжений затрудняют поиск однозначной связи параметров сигнала с параметрами технического состояния диагностируемых механизмов [1].

При диагностировании топливной аппаратуры эффективным является использование характеристик виброакустического диапазона [2, 3] в связи с небольшими искажениями спектра и приемлемым отношением сигнал/помеха. Поскольку интенсивность удара определяется его кинетической энергией, то для повышения информативности диагностирования целесообразно связать параметры диагностического сигнала с энергией виброударного процесса [1].

Современные MEMS датчики, как и широко используемые пьезоакселерометры, имеют высокую чувствительность к ускорению колебаний. Фильтрацию колебательного процесса следует производить в узкой полосе ультразвукового диапазона частот. Это-

му требованию в максимальной степени соответствует область резонанса акселерометра.

Несмотря на малую интенсивность высокочастотных составляющих спектра воздействия, сигнал на выходе фильтра после вибропреобразователя составляет десятки и сотни милливольт даже при начальных состояниях механизмов (рис. 1). С увеличением зазоров в кинематических парах уменьшается длительность соударения, что ведет к перераспределению энергии в спектре воздействия и увеличению интенсивности высокочастотных составляющих и повышает чувствительность метода [1; 4].

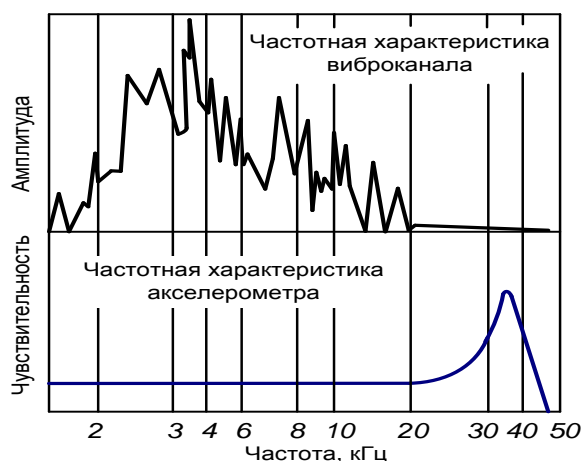


Рисунок 1 Формирование выходного вибрационного отклика от ударного воздействия в механизме

Широкую известность получил метод диагностирования механизмов двигателя по параметрам виброударных импульсов, разработанный сотрудниками лаборатории автоматизированных систем диагностирования и прогнозирования машин ГОСНИТИ В.И. Соловьевым, В.И. Беляевым и В.А. Мачневым, а также сотрудниками ОКБМ при заводе «Эллар» А.К. Берзиньш и Л.Ф. Захаренко под общим руководством В.М. Михлина [1]. Особенности диагностирования поршневых двигателей внутреннего сгорания изучались М.Д. Генкиным, А.Г. Соколовой, Ф.Я. Балицким [5, 6]. Механизм возникновения виброакустических процессов в работающей форсунке рассмотрен в работах Е.А. Никитина, Л.В. Станиславского, Э.А. Улановского и других. [7]. Известны также работы последних лет по цифровой обработке вибрационных сигналов [8, 9].

Целью настоящей работы является формирование теоретико-практической базы результатов анализа динамики спектральных и статистических образов вибросигналов форсунок CRIN2 с электромагнитным управлением.

Основная часть

В лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем БГАТУ с использованием многоканальной измерительной системы с гибкой структурой (рис. 2) [4; 10, 11], диагностических стендов CR-JET 4E компании Dieselland и

Поток SMART CRI-2F (ООО «Автоприбор») выполнен комплекс экспериментальных работ по измерению вибрации топливных форсунок на всех режимах нагружения [12]. Объектами исследования выступали форсунки CRIN2 автотракторных дизельных двигателей с электромагнитным управлением (Bosch, типовой номер 0445120141) различной наработки со следами изнашивания наиболее ответственных деталей [12, 13], а также две новые форсунки. В дальнейшем выполнялся анализ их вибрационных характеристик.

Тестирование форсунок CRIN2 осуществлялось в соответствии с проверочными режимами программного обеспечения диагностического стенда при давлении впрыска в них 25, 100 и 160 МПа. При этом вибродатчики MPU9150 и MPU9250 крепили жестко на корпусе форсунок (изначально клейкой лентой и дополнительно специальным стяжным хомутом). Для акустических исследований была создана возможность использования цифрового миниатюрного MEMS-микрофона INMP621.

В ходе исследования была значительно усовершенствована многоканальная измерительная система с гибкой структурой (далее – диагностический прибор), которая отображает в режиме реального времени вибросигналы относительно системы координат хуэ, создает амплитудно-частотную характеристику быстрым преобразованием Фурье. Разработан программный многоканальный драйвер цифровых датчиков вибрации [14], входящих в состав диагностического прибора. Создана возможность считывания и записи данных одновременно с трех датчиков вибрации. Выполнение данной операции позволяет реализовать временной период применяемого датчика

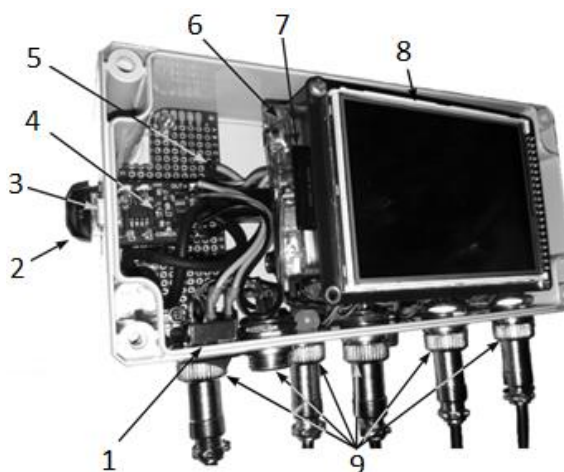


Рисунок 2. Детализированный вид многоканальной измерительной системы со стороны пользователя: 1 – выключатель; 2 – USB-разъем для flash-диска и связи с внешними устройствами; 3 – microUSB-разъем внешнего питания и заряда аккумулятора; 4 – модуль внешнего питания и заряда аккумулятора; 5 – разъем загрузки программ и отладки; 6 – литий-полимерный аккумулятор; 7 – SD-карта; 8 – дисплейный модуль с сенсорной панелью; 9 – разъемы подключения датчиков вибрации

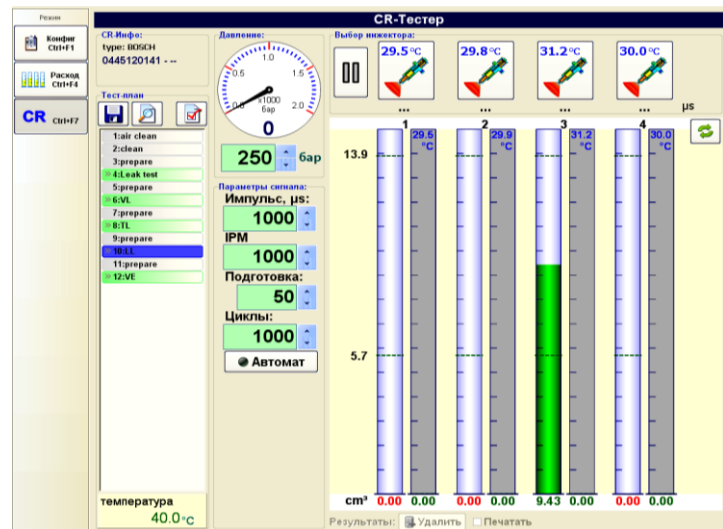
MPU9150 / MPU9250 с предельной частотой обновления данных, равной 1000 отсчетов/с. Датчик вибрации можно подсоединять «на ходу» при работающем диагностическом приборе, а сохраняемый на USB flash-диске файл данных имеет стандартный общеизвестный wav-формат, легко обрабатываемый любым современным программно-математическим пакетом. Диагностический прибор сохраняет сигналы для их последующей вейвлет-обработки. Фиксировали также температуру форсунок, а непосредственно вибросигналы записывали в wav-файл [3; 15].

На каждом этапе нагружения форсунки формировался соответствующий протокол тестирования. Визуализация данных рабочих окон программы стенда в привязке к отдельным этапам тестирования представлена на рисунке 3.

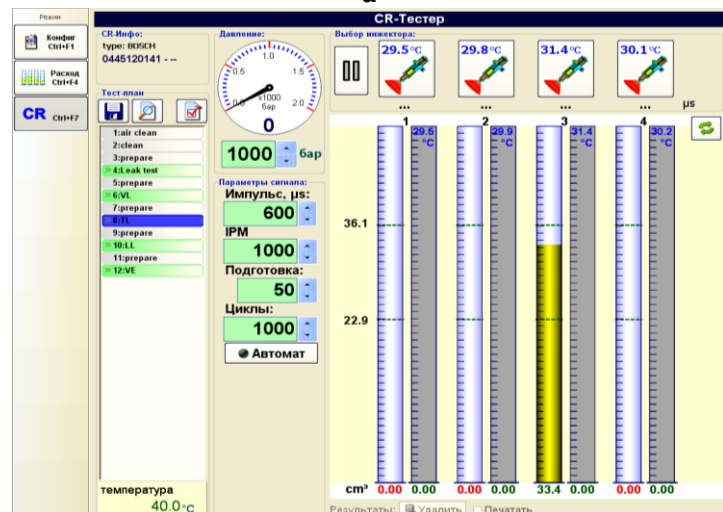
Во избежание разности подачи тестовой жидкости при нагружении одновременно тестированию подвергалась одна форсунка. На всех представленных рисунках активной является секция под номером три (рис. 3), фактическое значение расхода тестовой жидкости указывается непосредственно под столбцом (к примеру, на рисунке 3а значение расхода составляет 9,43 см³, а на рисунке 3б – 33,4 см³/1000 циклов). На рабочем окне каждого из представленных этапов тестирования указаны пределы значений расхода, которые соответствуют нормальной работе исправной форсунки и рекомендованы производителем топливной аппаратуры данного поколения. На режиме тестирования LL таковыми пределами являются значения от 5,7 до 13,9 см³/1000 циклов, на режиме TL – значения от 22,9 до 36,1 см³/1000 циклов и так далее [12].

При тестировании форсунки со следами изнашивания цилиндрической поверхности штока управляющего клапана (мультипликатора) и посадочного места шарика запорного клапана [12] на режиме VL (рис. 3в) значение подачи тестовой жидкости составляет 214 см³/1000 циклов и не попадает в установленные допустимые пределы (220,2-241,2 см³/1000 циклов). Значение расхода тестовой жидкости через магистраль обратного слива при таких же условиях нагружения составляет 32,9 см³/1000 циклов, что полностью соответствует допустимым значениям, равным (10,0-80,0 см³/1000 циклов).

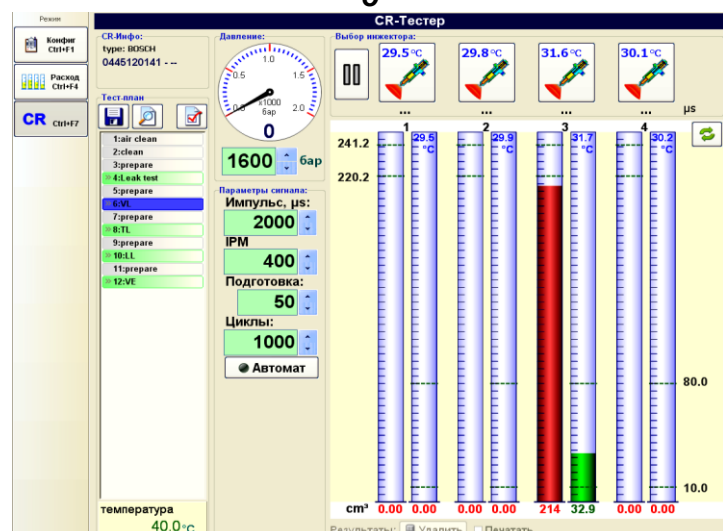
Следует отметить, что при эксплуатации дизельного двигателя, на котором



а



б



в

Рисунок 3 Рабочее окно программы стенда на режиме тестирования LL (а), режиме TL (б) и режиме VL (в)

установлены форсунки подобного технического состояния, какие-либо весомые отклонения в работе наблюдаться не будут. Однако форсунка, на ответственных деталях которой выявлены следы такой невысокой степени изнашивания, явилась предметом нашего исследования с целью раннего и достоверного определения технического состояния и фиксации зарождающихся дефектов, как на поверхности ответственных деталей топливной аппаратуры, так и внутренних дефектов в структуре металла.

На основании проведенных исследований сформирован массив данных в виде лабораторного журнала (фрагмент таблицы данных при тестировании форсунки CRIN2 в режиме холостого хода (LL) представлен в таблице 1). Массив вибросигналов вводился в таблицу: первые три её столбца – амплитуды вибраций форсунки относительно осей X Y Z, а четвертый – значения опорной гармоники, предназначенной для подтверждения неразрывности множества полученных данных.

Все измерения проводилось многократно, получено множество бинарных файлов сигналов акселерометров, как для форсунок, на ответственных деталях которых выявлены следы изнашивания, так и для форсунок без следов изнашивания. Предобработка сигналов проводилась в системе Mathcad (рис. 4, 5), а последующий спектральный анализ и вейвлет-преобразования – с использованием пакета программ MATLAB.

По видам спектрограмм различимы режимы диагностирования: VL, TL, LL. Наиболее явные изменения спектров в сравнении с исправной (новой) и изношенной форсунок наблюдаются на режимах VL (самая весомая разница) и TL (рис. 4, 5). На представленных в

одном ряду изображениях указаны подписи PSX, PSY и PSZ, где важен последний символ, указывающий на ось X, Y или Z. Это обусловлено использованием при исследовании трехосевого акселерометра.

Элементы массива упорядочены в зависимости от режима нагружения исследуемой форсунки с представлением проекций полученного сигнала на оси пространственной декартовой системы координат [12]. Для каждого элемента набора данных выполнено преобразование Фурье, что позволяет выявить характерные изменения спектра сигнала для исправных и изношенных форсунок.

Для данных тестирования при максимальной нагрузке дополнительно выполнены вейвлет-преобразования и математическая обработка сигналов вибрации новой форсунки и форсунки, на ответственных деталях которой отмечены следы изнашивания. В совокупности массив данных лабораторного журнала и спектрограмм, полученных с использованием математического пакета MATLAB, формируют теоретико-практическую базу результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов виброакустических сигналов форсунок поколения CRIN2.

Основные пики вибросигналов форсунки, на ответственных деталях которой выявлены следы изнашивания, находятся в частотах 150 и 300 Гц. Пиковых импульсов меньше, чем у новой форсунки, а амплитуды в них более высокие (более 800 ед). Для новой форсунки пики по частотам распределены равномерно, а амплитуды меньше на 200 ед.

Таблица 1. Фрагмент таблицы данных по результатам тестирования форсунки CRIN2 (0445120141) в режиме холостого хода (LL), мкм/мкс

Проекция сигнала на оси декартовой системы координат			Гармоника
X	Y	Z	
0,554229736328125	-0,109527587890625	-0,0380249023437500	-0,00152587890625000
0,499755859375000	-0,0623779296875000	0,0321350097656250	0,0816345214843750
0,499755859375000	-0,0623779296875000	0,0321350097656250	0,0816345214843750
0,507751464843750	-0,0152893066406250	0,0868225097656250	0,0804748535156250
0,484313964843750	-0,0152282714843750	0,102447509765625	0,0804748535156250
0,484313964843750	-0,0152282714843750	0,102447509765625	0,0792846679687500
0,491973876953125	-0,0545043945312500	0,0477600097656250	0,0780944824218750
0,507476806640625	-0,0782470703125000	-0,0303649902343750	0,0780944824218750
0,507476806640625	-0,0782470703125000	-0,0303649902343750	0,0769042968750000
0,499694824218750	-0,0704345703125000	-0,0303649902343750	0,0756835937500000
0,460540771484375	-0,101531982421875	0,00869750976562500	0,0756835937500000
0,460540771484375	-0,101531982421875	0,00869750976562500	0,0744628906250000
0,491912841796875	-0,0701293945312500	0,0477600097656250	0,0744628906250000
0,491912841796875	-0,0701293945312500	0,0477600097656250	0,0732116699218750
0,476470947265625	-0,0231018066406250	0,0868225097656250	0,0719909667968750
0,468688964843750	-0,0152893066406250	0,0868225097656250	0,0719909667968750
0,468688964843750	-0,0152893066406250	0,0868225097656250	0,0707092285156250
0,468536376953125	-0,0544433593750000	0,0633850097656250	0,0694580078125000
0,499755859375000	-0,0547485351562500	-0,0147399902343750	0,0694580078125000
0,499755859375000	-0,0547485351562500	-0,0147399902343750	0,0681762695312500
0,515350341796875	-0,0626220703125000	-0,0303649902343750	0,0681762695312500
0,484100341796875	-0,0702819824218750	0,00869750976562500	0,0668640136718750

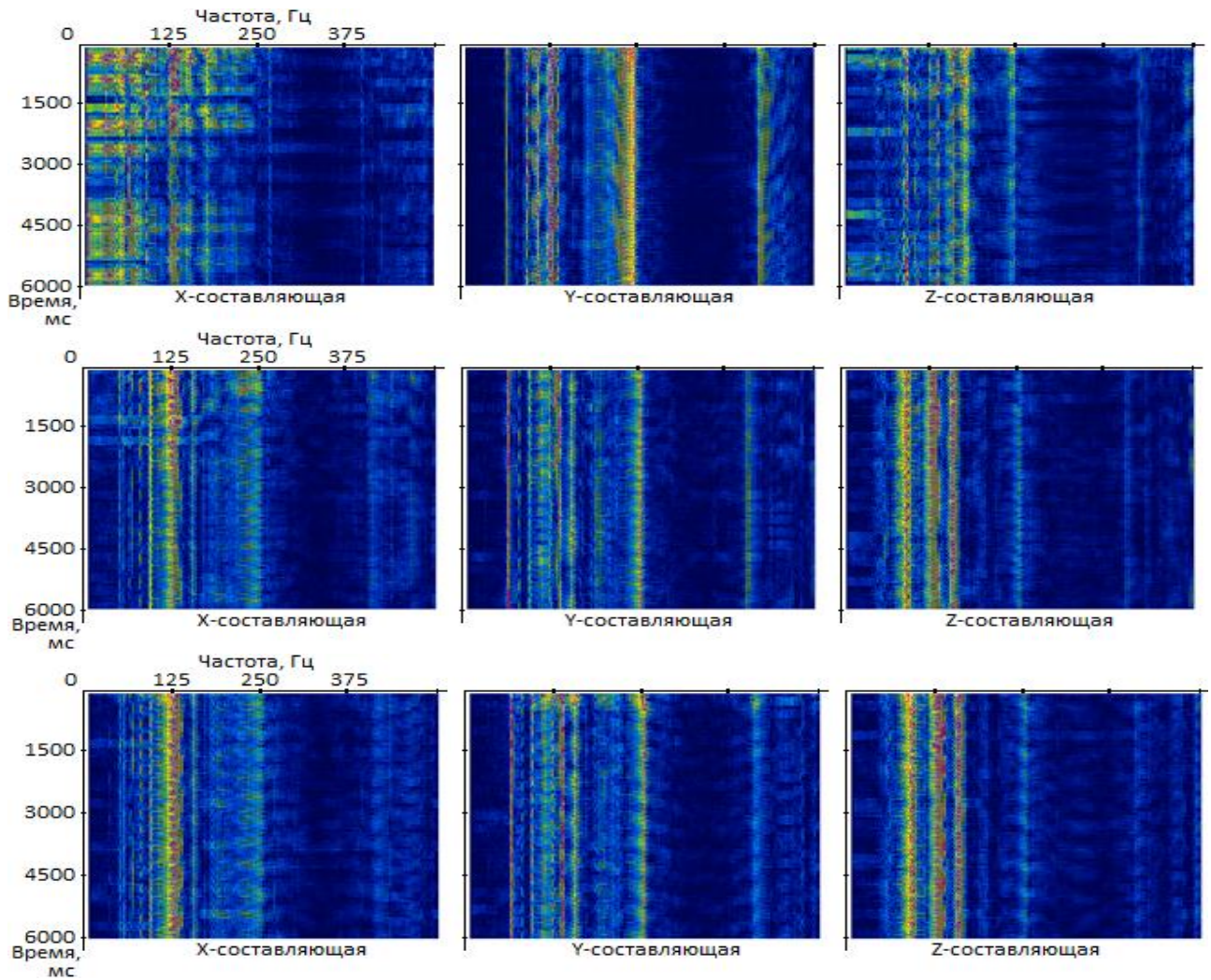
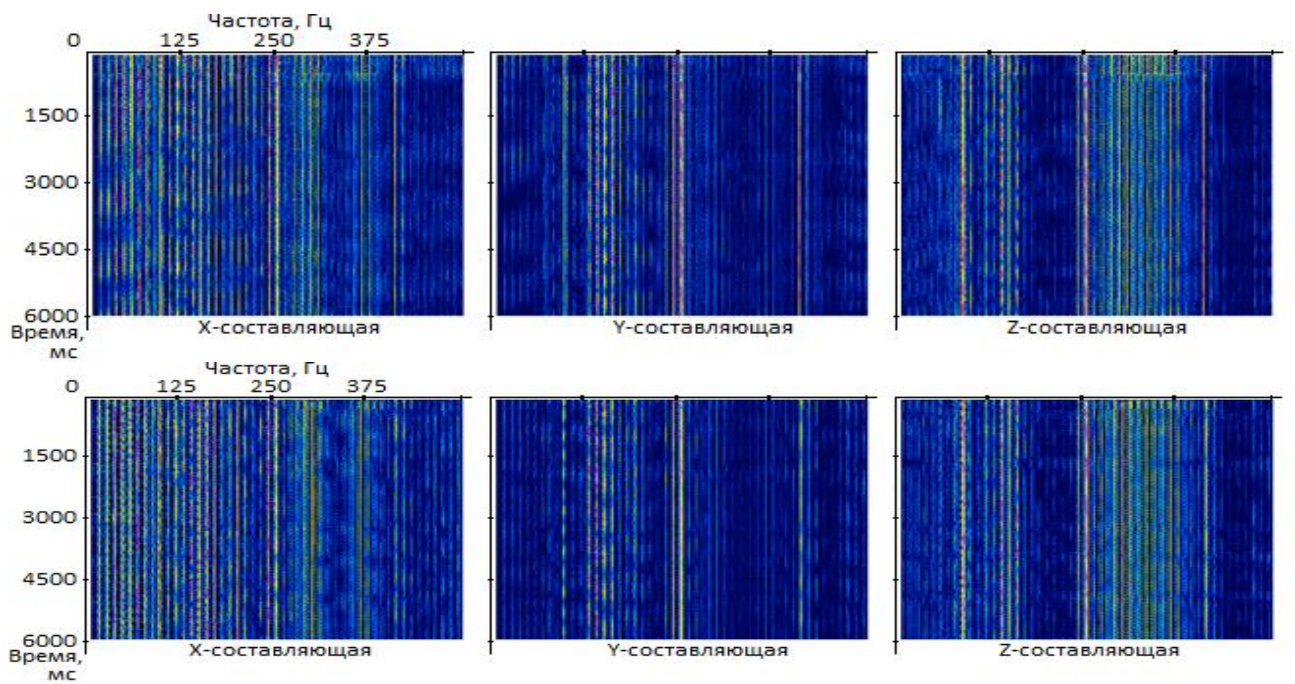


Рисунок 4. Спектрограммы форсунки с износом запорного конуса клапана и конуса распылителя на режиме VL



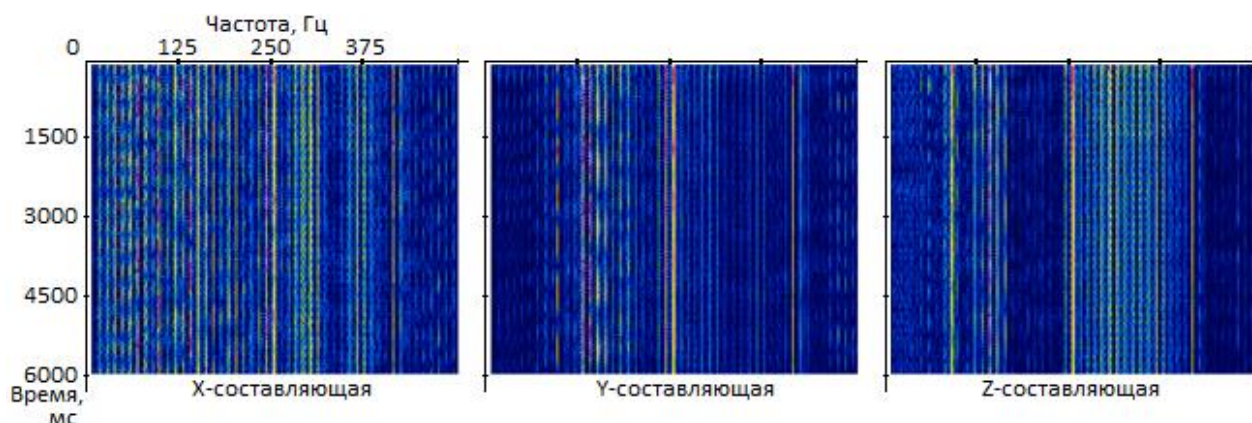


Рисунок 5 Спектрограммы форсунки с износом запорного конуса клапана и конуса распылителя на режиме TL

Дальнейшим шагом программного диагностирования топливных форсунок выступает выявление в вибросигнале выраженных гармоник с контролем их поведения. Новизна подхода при контроле подтверждена патентом на изобретение [16]. Суть данного решения сводится к обработке спектрограмм (скейлограмм) как изображений методами цифровой обработки многомерных сигналов.

Модель идентификации дефектов объекта форсунки по сигналу контролирующего датчика состоит в вычислении множества математических параметров сегментированных фрагментов, выделенных из совокупности образов преобразований исходного сигнала, именуемая аналитическим ансамблем.

Аналитический ансамбль сигнала представляет собой совокупность образов его преобразований, в качестве которых могут выступать: спектрограмма, гистограмма, рангограмма, скейлограмма, коррелограмма и др. Для априори периодического или квазипериодического процесса, к которым в частности относятся физические процессы в топливной форсунке, в качестве образа соответствующего сигнала логично использовать спектрограмму, динамика изменений которой порождает спектральный аналитический ансамбль.

В анализе случайной составляющей процесса, как правило, применяется гистограмма распределения плотности уровней сигнала, динамика изменений которой формирует статистический аналитический ансамбль.

Использование иных типов преобразований и соответствующих им аналитических образов зависит от природы процесса.

За основу модели идентификации дефектов форсунки CRIN2 принимается спектрально-статистический аналитический ансамбль, в состав которого, кроме спектрограммы и гистограммы, входят рангограмма как инструмент статистического анализа и скейлограмма, которая в большей степени относится к сфере спектрального анализа.

Заключение

Разработан программный многоканальный драйвер цифровых датчиков вибрации, входящих в состав многоканальной измерительной системы с гибкой

структурой. С использованием последнего, а также диагностического стенда CR-JET 4E и Поток CR2 выполнен комплекс экспериментальных работ по измерению вибрации топливных форсунок CRIN2 (0445120141) с электромагнитным управлением на всех режимах нагружения. На основании проведенных исследований сформирован массив данных, представленный в виде лабораторного журнала. Элементы массива упорядочены в зависимости от режима нагружения исследуемой форсунки с представлением проекций полученного сигнала на оси пространственной декартовой системы координат. Для каждого элемента набора данных выполнено преобразование Фурье, что позволяет выявить характерные изменения спектра сигнала для исправных форсунок и форсунок, на ответственных деталях которых выявлены следы изнашивания.

Приведенные этапы научно-исследовательской работы позволили разработать методику формирования теоретико-практической базы результатов анализа динамики спектральных, вейвлетных и статистических образов вибросигналов форсунок поколения CRIN2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технология вибрационного диагностирования дизельных двигателей / В.И. Соловьев, В.И. Беляев, В.А. Мачнев [и др.]. – ГОСНИТИ. – М., 1979. – 41 с.
2. Тарасенко, В.Е. Исследование вибрации форсунок с помощью многоканальной системы с гибкой структурой / В.Е. Тарасенко, А.А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомственный тематический сборник / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2020. – Вып. 54. – С. 185-191.
3. Жешко, А.А. Диагностирование многоканальной измерительной системой с гибкой структурой форсунок фирмы BOSCH / А.А. Жешко, В.Е. Тарасенко, О.С. Ролич, А.В. Дунаев // Технический сервис машин. – 2021. – Т. 59, № 1 (142). – С. 55-64.
4. Тарасенко, В.Е. Особенности диагностирования форсунок с электромагнитным управлением /

В.Е. Тарасенко, С.К. Карпович // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 16-17 октября 2024 г.: в 2 ч. / редкол.: Н.Н. Романюк [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – Ч. 2. – С. 28-31.

5. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

6. Балицкий, Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова [и др.]. – М.: Наука, 1984. – 119 с.

7. Никитин, Е.А. Диагностирование дизелей / Е.А. Никитин, Л.В. Станиславский, Э.А. Улановский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

8. Бранцевич, П.Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов / П.Ю. Бранцевич. – Минск: Бест-принт, 2022. – 297 с.

9. Гундина, М.А. Спектральный анализ сигнала в системе Wolfram Mathematica / М.А. Гундина // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 173-178.

10. Ролич, О.Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко // Агропанорама. – 2019. – № 5 (135). – С. 42-45.

11. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники / В.П. Миклуш [и др.]; Мин-во сельского хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь; Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск: БГАТУ, 2019. – 392 с.

12. Тарасенко, В.Е. Методы диагностирования зарождающихся эксплуатационных дефектов деталей авто-тракторных двигателей / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.А. Жешко // Агропанорама. – 2025. – № 2 (168). – С. 25-31.

13. Тарасенко, В.Е. Исследование состояния топливных форсунок CRIN2 дизельных двигателей / В.Е. Тарасенко, О.О. Мухля, А.В. Михолап // Агропанорама. – 2024. – № 6 (166). – С. 22-28.

14. Тарасенко, В.Е. Программный драйвер цифровых датчиков вибрации, входящих в состав многоканального прибора интегрированного виброакустического и теплового диагностирования / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – 2025. – Вып. 58. – С. 305-312.

15. Тарасенко, В.Е. Анализ вибрационных характеристик форсунок CRIN2 автотракторных дизелей / В.Е. Тарасенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса: материалы респуб. науч.-практ. конференции. «Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО-2024»; редкол.: В.А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2024. – С. 254-257.

16. Патент BY23682, МПК G01M 15/00, G06K 9/62 (2006.01). Способ идентификации дефектов двигателя внутреннего сгорания транспортной или тяговой машины: № а 20200037; заявлено 03.02.2020; опубл. 28.01.2022 / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич; заявитель: Бел. гос. аграрн. техн. ун-т.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 05.05.2025

Радиоволновой влагомер зерна

Предназначен для непрерывного измерения влажности зерна в процессе сушки на зерносушильных комплексах.

Влагомер обеспечивает непрерывный контроль влажности зерна в потоке и автоматическую коррекцию результатов измерения при изменении температуры материала, имеет аналоговый выход – 4-20 мА, а также интерфейс – RS-485.



Основные технические данные

Диапазон измерения влажности зерна	от 9 до 25 %
Основная абсолютная погрешность	не более 0,5 %
Температура контролируемого материала	от +5 до +65 °С
Цена деления младшего разряда блока индикации	0,1 %
Напряжение питания	220 В 50 Гц
Потребляемая мощность	30 ВА

АГРОТУРИЗМ КАК ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ВИД ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ЭЛЕМЕНТ СОЦИАЛЬНО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КИТАЯ

Ли Хунся,

доцент профессионально-технического колледжа Сельскохозяйственного университета
Внутренней Монголии, аспирант БГСХА (Китай)

В статье определены ключевые этапы формирования нормативной правовой базы, регулирующей агротуризм в Китае на современном этапе. Выделены особенности действующей модели исследуемого вида экономической деятельности с учетом трансформации агропромышленного комплекса (АПК) и социально-экономической системы страны. В качестве предложений, обеспечивающих дальнейшее устойчивое развитие агротуризма, обоснован передовой опыт Республики Беларусь по реализации проекта «Деревня будущего» и функционированию системы дополнительного образования взрослых.

Ключевые слова: агротуризм, вид экономической деятельности, модель, промышленная интеграция, система дополнительного образования взрослых, эффективность.

The article defines the key stages of the formation of the regulatory framework governing agrotourism in China at the current stage. The features of the current model of the economic activity type under investigation are highlighted, focusing on the changes in the agro-industrial complex (AIC) and the socio-economic system of the country. The best practices of the Republic of Belarus in implementing the “Village of the Future” project and the functioning of the system of additional education for adults are substantiated as proposals to ensure further sustainable development of agrotourism.

Key words: agritourism, type of economic activity, model, industrial integration, system of additional education for adults, efficiency.

Введение

Развитие агротуризма в Китае происходит на фоне институциональных преобразований в национальной экономике и повышения потребительского спроса на такого рода услуги. В 2014 г. Государственный совет о содействии реформированию и развитию индустрии туризма впервые включил сельский туризм в национальную стратегию, предусматривающую переход к стадии индустриализации и инновационности. В 2021 г. Законом Китайской Народной Республики «О содействии возрождению сельских районов» определены направления всестороннего осуществления стратегии развития сельских районов и содействия возрождению сельской промышленности, культуры, созданию экологически чистой среды, интеграции городских и сельских территорий. На 2025 г. принят документ под названием «Мнения ЦК КПК и Государственного совета о дальнейшем углублении реформ в сельских районах и основательном продвижении всестороннего возрождения сел», который включает задачи по укреплению и совершенствованию базовой системы управления в сельской местности на основе повышения результативности внедрения научно-технических инноваций [1, 2].

Под влиянием проводимой государственной экономической политики значительно выросли показатели эффективности национального рынка агроту-

ризма. Если в 2014 г. количество туристов в исследуемой сфере составило 1,23 млрд человек, что позволило обеспечить доход отрасли в размере 320 млрд юаней, то в 2024 г. данные показатели достигли 3,45 млрд человек и 1 980 млрд юаней соответственно [3]. В настоящее время для Китая характерно внедрение инновационных и ресурсосберегающих технологий при оказании услуг, переход на комплексное обслуживание клиентов на основе цифровых решений, разработка и реализация экологических проектов. При этом темп роста агротуризма значительно превышает общий уровень развития внутреннего туристического рынка за аналогичный период.

Исходя из этого и понимая важность агротуризма для Китая, следует выделить особенности его развития как интегрированного вида деятельности АПК, а также обосновать приоритетные направления функционирования в контексте трансформации социально-экономической политики Китая. Это в совокупности и определило цель данной научной статьи.

Материалы и методы

Научное исследование базировалось на изучении и обобщении научных трудов ученых в области туризма, нормативной правовой базы, научных исследований и мониторингах специализированных организаций Китая. Используются методы системного и сравнительного анализа.

Основная часть

Агротуризм в Китае, представляя собой интегрированный вид деятельности АПК и элемент социально-экономической политики страны, демонстрирует устойчивое развитие [4-6]. В соответствии с принятой в мировой практике классификацией его продукты делятся на сельские природные пейзажи, сельский отдых и спорт, сельские виллы для отдыха, сельскохозяйственные экскурсионные сады, а также сельские объекты питания и размещения. В данном контексте сформирована современная модель агротуризма страны, базирующаяся на комплексном и системном подходе развития, предусматривающем кооперационные и интеграционные процессы взаимодействия с другими элементами социально-экономической системы Китая. В ее основу положены фермерские дома, сельскохозяйственные новые деревни, высокотехнологичные сельскохозяйственные туристические парки, сельскохозяйственные пейзажи, развитие древних деревень, старых, молодых, приграничных и бедных районов, а также современные бизнес-курорты. Каждая из представленных составляющих модели имеет свои специфические особенности, которые учитываются при планировании туристической деятельности, разработке управленческой, маркетинговой, логистической, информационной и цифровой стратегии.

Выполненный анализ позволил установить, что агротуризм внес изменения в систему социально-экономических ценностей населения на основе активного внедрения промышленной интеграции и функционального расширения продуктов и услуг [7, 8]. К настоящему времени сформировалась замкнутая цепочка создания стоимости «сельскохозяйственное производство – переработка – обслуживание». Так, в 2024 г. объем продаж переработанной сельскохозяйственной продукции через туристические каналы достиг 582 млрд юаней, что составило 18,6 % от общего объема продаж отрасли. Примером могут служить: проект «Сельскохозяйственный опыт», который позволил увеличить время пребывания туристов на 1,8 дня и долю вторичного потребления до 39 %; проект интеграции чайного туризма в Аньци обеспечил рост продаж билетов на посещение объекта на 41 %. В масштабах Китая отмечается повышение уровня производительности труда в сельском хозяйстве, увеличение производства туристических продуктов и услуг с высокой добавленной стоимостью, рост их продаж через электронные площадки, обеспечение прибыльности и финансовой устойчивости субъектов бизнеса [9].

Важным аспектом является то, что агротуризм усовершенствовал структуру занятости в сельской местности за счет расширения производственно-сбытовой цепочки и накопления человеческого капитала. Согласно докладу Национальной комиссии по развитию и реформам «Отчет об оценке эффекта стимулирования занятости в сельском туризме», в 2024 г.

непосредственно в агротуризме было занято 11 млн человек, что составило 4,2 % от общего числа занятых в сельской местности. При этом еще 55 млн человек косвенно принимали участие в производственно-сбытовой и экспортной туристической деятельности. В целом общий коэффициент вклада занятости данного вида экономической деятельности составил 32,7 %.

Согласно отчету Национального исследования занятости в сельском туризме, в разрезе регионов страны отмечаются значительные различия (таблица). Так, в Западном Китае на 10 000 юаней доходов от туризма создается 3,1 рабочих места, что на 47,6 % выше, чем в Восточном Китае. Это связано с наличием Специального плана развития сельского туризма в Западном регионе на 2021-2025 гг.

Таблица. Сравнение мультипликаторов занятости в агротуризме по регионам Китая, 2024 г. [3]

Регион Китая	Мультипликатор занятости, чел./тыс. юань	Индекс интенсивности инструментов политики	Индекс человеческого капитала
Восточный	2,1	0,63	0,78
Центральный	2,5	0,71	0,65
Западный	3,1	0,89	0,57

По данным Национального ежегодника статистики распределения благ в сельской экономике Китая, располагаемый доход на душу населения фермеров, участвующих в агротуризме в 2023 г., достиг 25 000 юаней, что на 9,6 % выше, чем у не участвующих, сформировав новую структуру «бизнес-лидерства» (рис. 1).

Агротуризм способствует выравниванию городских и сельских объектов за счет внутренних и внешних инвестиций, ориентированных на растущий спрос (рис. 2). Согласно мониторингу Национальной комиссии по развитию и реформам Китая, интенсивность инвестиций в инфраструктуру в модельных агротуристических деревнях в 3,2 раза выше, чем в обычных деревнях.

Установлено, что агротуризм выстраивает цепочку культурных ценностей «сохранение – активация – добавленная стоимость» для развития сельских территорий. Так, за последнее десятилетие вырос уровень цифрового архивирования достопримечательностей в селе с 12 % до 89 % за счет применения технологии реставрации с использованием искусственного интеллекта. Это позволило сформировать модель симбиоза «наследник + предприятие + сообщество». С целью дальнейшего сохранения культурного наследия автором публикации предлагается в качестве примера использовать основные принципы построения проекта «Деревня будущего», который реализуется в Республике Беларусь. Он предусматривает создание агрогородков нового уровня с модернизированной социальной инфраструктурой и высоким

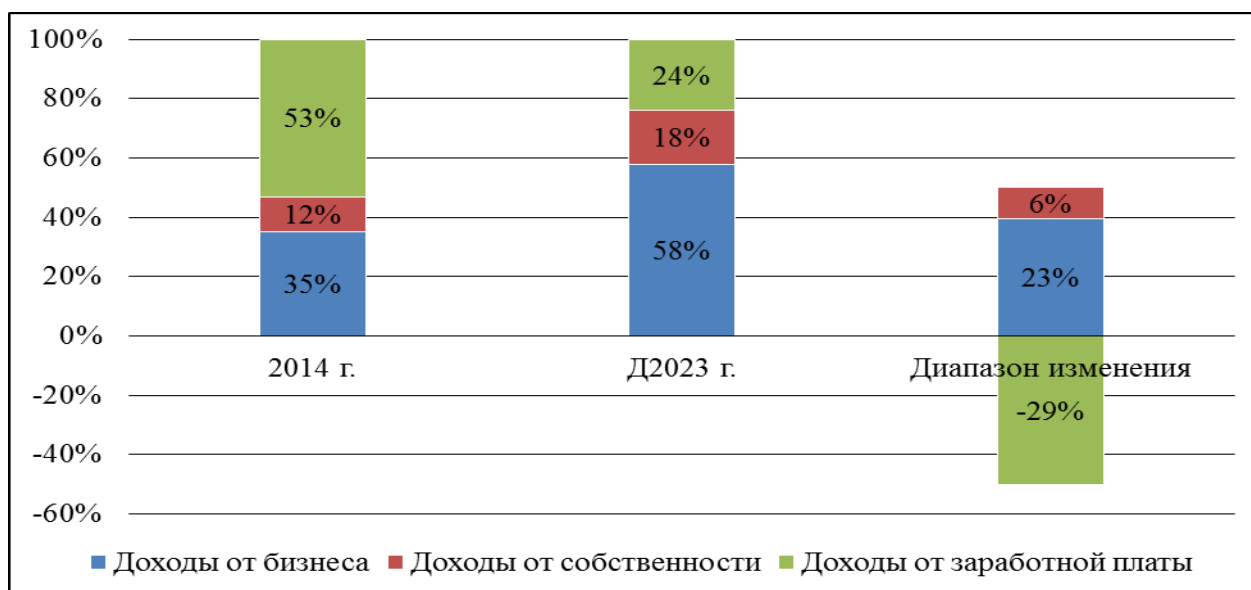


Рисунок 1. Динамика изменения структуры доходов фермерских хозяйств Китая, занимающихся агротуризмом, 2014–2023 гг., % [3]

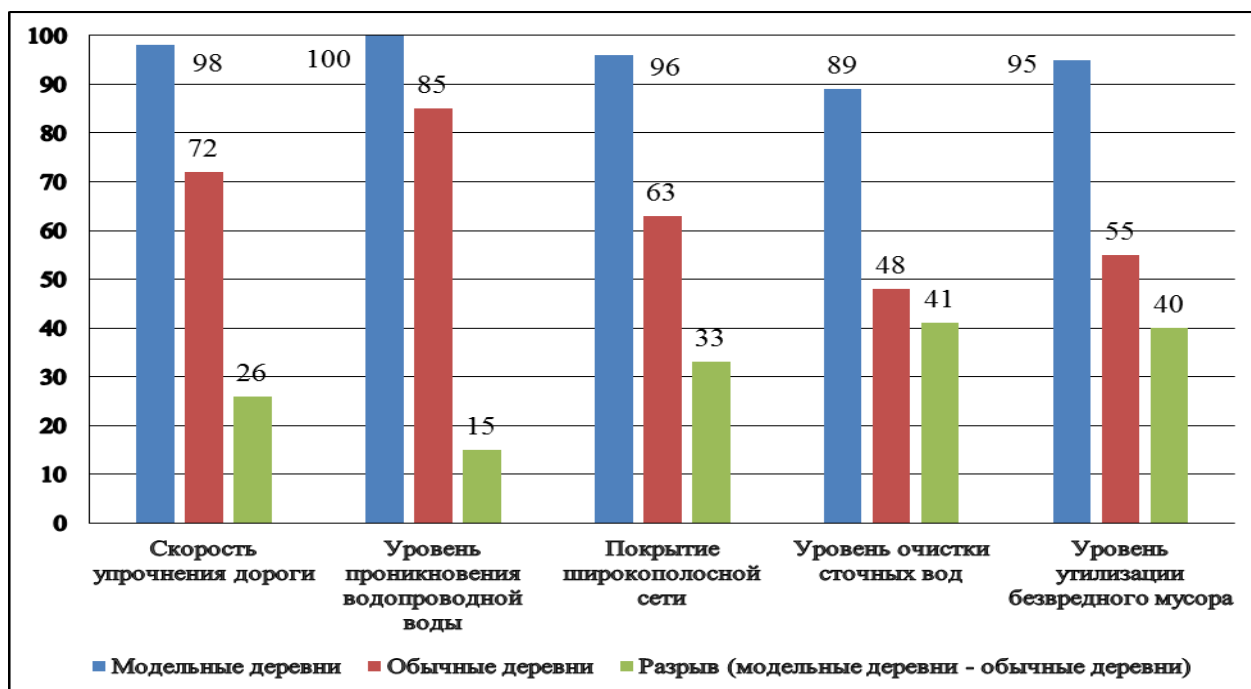


Рисунок 2. Сравнение инфраструктуры в модельных агротуристических деревнях и обычных деревнях Китая, 2023 г., % [3]

уровнем благоустройства, когда в пределах одного населенного пункта есть не только необходимый минимум сервисов, но и дополнительные [10, 11].

Определенный интерес вызывает проводимая в Китае трансформация сельской сферы услуг по принципу «цифровизация + качество». Анализ показал, что данный процесс основывается на совершенствовании системы предоставления туристических услуг (доход с одного продаваемого номера сельских пансионов достиг 182 юаней, что на 24 % выше, чем в

городских бюджетных отелях) и индустрии общественного питания (68 % сельских гостиниц используют системы управления товарными запасами и заказов), внедрении цифровой инфраструктуры (интеллектуальные гиды, технология «цифрового двойника», др.), методов и стратегий цифрового маркетинга (социальные сети, on-line мероприятия, Интернет-реклама, т.д.). Все это в совокупности обеспечило повышение эффективности распределения факторов производства, включая земельные, трудовые, матери-

альные и другие ресурсы, а также уровень цифровой зрелости субъектов.

В сфере агротуризма создается эффективная система образования, позволяющая получить широкий спектр актуальных знаний, умений и компетенций по планированию, организации и реализации туристических проектов. Данные мониторинга Национального исследования занятости в сельском туризме показали, что в 2024 г. уровень охвата обучением цифровым навыкам работников в возрасте до 45 лет достиг 72 % (для сравнения: в традиционном сельском хозяйстве только 23 %). С целью дальнейшего развития образовательной системы в сфере агротуризма Китая предлагается использовать передовой опыт Республики Беларусь по формированию системы дополнительного образования взрослых, в основу которой положено практикоориентированное обучение в короткий период времени. Такой подход способствует повышению профессионального уровня подготовки, приобретению новых специализированных компетенций, удовлетворению культурных и социальных потребностей [10, 11].

Таким образом, агротуризм занимает важное место в АПК и социально-экономической системе Китая. Его кооперация и интеграция с отраслями сельского хозяйства и другими видами экономической деятельности формируют устойчивую основу для реализации стратегии модернизации аграрной сферы и возрождения сельских районов в стране.

Заключение

Изучение особенностей агротуризма как интегрированного вида деятельности АПК, а также обоснование приоритетных направлений функционирования в контексте трансформации социально-экономической системы Китая позволили сделать следующие выводы:

1. Агротуризм рассматривается как приоритетное направление развития сельских территорий, которое сочетает в себе элементы отдыха, познания и взаимодействия с природой, а также предоставляет возможность туристам познакомиться с сельским образом жизни и традициями. Анализ показал, что в последние годы возрастает роль агротуризма в Китае в контексте обеспечения устойчивого развития сельской местности, создания новых рабочих мест и повышения доходов местных жителей.

2. Проводимая государственная политика Китая направлена на развитие сельских территорий и повышение эффективности ведения агротуризма. Ключевой задачей является создание новых рабочих мест, расширение туристических продуктов и услуг, инновационное и цифровое обеспечение, маркетинговое и логистическое сопровождение отрасли. Китай реализует активную политику по государственному регулированию и поддержке агротуризма. Результаты исследований и мониторингов специализированных отечественных организаций подтверждают конструк-

тивный и плодотворный курс общей социально-экономической политики государства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Закон Китайской Народной Республики о содействии возрождению сельских районов. – URL: http://www.moa.gov.cn/gk/zcfg/fl/202105/t20210507_6367254.htm (дата обращения: 11.05.2025).
2. Центральный комитет ЦК Коммунистической партии Китая: [официальный сайт]. – URL: <http://cpc.people.com.cn/20th/n1/2022/1017/c448334-32546342.html> (дата обращения: 11.05.2025).
3. Национальное бюро статистики Китая: [официальный сайт]. – URL: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/nds/2024/indexeh.htm> (дата обращения: 11.05.2025).
4. Оришев, А.Б. Аграрный туризм в Китае / А.Б. Оришев, В.Н. Тарасенко // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2019. – № 1-1. – С. 125-133.
5. Янь, Цюцзюй. Исследование мультимодальных метафор сельских языковых ландшафтов в рамках стратегии возрождения сельской местности Китая / Янь Цюцзюй, Цзяо Минь // Политическая лингвистика. – 2023. – № 1 (97). – С. 157-167.
6. Ли Хунся. Современное развитие агротуризма в Китае: закономерности и тенденции / Ли Хунся // Вестник БГСХА. – 2025. – № 1. – С. 16-19.
7. Lingyu, Li. Sustainable evolution of China's provincial new quality productivity based on three dimensions of multi-period development and combination weights / Lingyu, Li, Zhichao Liu // Sustainability. – 2024. – № 16 (24). – P. 1-17.
8. Киреенко, Н.В. Механизм трансформации производственно-сбытовой системы АПК Республики Беларусь в условиях цифровой экономики / Н.В. Киреенко, К.В. Борель // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2025. – Т. 63, №2. – С. 95-114.
9. Цзоу, Юнгуан. Оценка эффективности сельского туризма в содействии возрождению села и пути его совершенствования / Цзоу Юнгуан, Чжун Хаоин, Цуй Ифу // Экономическая география. – 2024. – Т. 44, № 8. – С. 201-210.
10. Механизмы устойчивого инновационного развития аграрного бизнеса Республики Беларусь / Н.В. Киреенко [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – 204 с.
11. Киреенко, Н. В. Инновационные подходы в системе дополнительного образования взрослых при подготовке руководящих работников и специалистов АПК Республики Беларусь / Н.В. Киреенко // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16-17 октября 2024 г. : в 2 ч.; редкол.: Н.Н. Романюк [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – Ч. 2. – С. 155-157.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.07. 2025

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИКИ В АПК РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

А.Л. Косова,

зав. каф. экономической теории и права БГАТУ, канд. экон. наук, доцент

В статье представлены этапы развития научных концепций логистической системы в агропромышленном комплексе с учетом интеграции звеньев товародвижения. Обоснованы теоретико-методические основы концепции интегрированной логистики, включающие цель, принципы и ключевые компоненты. Проанализирован зарубежный опыт применения моделей планирования и организации агрологистической деятельности, базирующихся на эффективных практиках интегрированной логистики. Выработаны направления системного внедрения исследуемой концепции в организациях агропромышленного комплекса Республики Беларусь.

Ключевые слова: логистика, концепция, интегрированная логистика, система управления потоковыми процессами, агропромышленный комплекс, эффективность.

The article presents the stages of the development of scientific concepts of the logistics system in the agro-industrial complex taking into account the integration of goods movement links. The theoretical and methodological foundations of integrated logistics concept, including its purpose, principles, and key components, are validated. The foreign experience of applying models of planning and organization of agrologistic activities based on effective integrated logistics practices is analyzed. Directions for the systematic implementation of the concept under study in organizations of the agro-industrial complex of the Republic of Belarus are developed.

Key words: logistics, concept, integrated logistics, flow process management system, agro-industrial complex, efficiency.

Введение

В современных условиях, связанных с цифровой трансформацией экономических процессов, ускорением научно-технологического прогресса и скорости распространения цифровых технологий, переходом к новому технологическому циклу, расширением торгового и коммерческого взаимодействия, появлением новых видов производства товаров и услуг, логистика выступает ключевым элементом эффективного управления организаций агропромышленного комплекса Республики Беларусь (АПК). В проекте Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года в качестве главного вектора долгосрочного развития определено совершенствование организации производства на новых принципах управления, включающего интегрированную логистику [1]. Последняя представляет собой систему управления потоковыми процессами, которая предполагает межфункциональную интеграцию и оптимизацию совокупности взаимосвязанных и взаимозависимых видов производственно-хозяйственной деятельности.

Термин «интегрированная логистика» был введен в оборот в 1980-х гг. XX в. и рассматривался как продвижение продукции через непрерывный и последовательный процесс пошагового добавления стоимости с приобретением товаров и услуг в необходи-

мое время, в нужном количестве и форме [2]. Дополнительная стоимость означала, что каждый участник логистической цепи, выполняя определенные действия, повышает стоимость продукта для тех, кто в итоге будет приобретать товар.

В настоящее время отечественными учеными (Л.Ф. Догий, И.А. Еловой, И.А. Лебедева, Т.Г. Зорина, В.Э. Зубков, Р.Б. Ивуть, Н.В. Киреевко, О.В. Мясникова [3-8]), а также зарубежными учеными и практиками (Д. Дж. Бауэрсокс, Д. Дж. Клосс, В.В. Дыбская, Е.И. Зайцев, В.И. Сергеев, А.Н. Стерлигова, Е.В. Пустынникова, Д. Уотерс [2; 9-11]) концепция интегрированной логистики рассматривается в качестве новой инновационной и цифровой парадигмы, которая пришла на смену экономической концепции, концепции общих затрат и бизнес-логистики. Для АПК Республики Беларусь новое направление позволит обеспечить внедрение и практическое применение эффективных логистических моделей с использованием информационных и коммуникационных технологий, снижение затрат на доставку сельскохозяйственного сырья и продовольствия, повышение уровня удовлетворенности потребностей потребителей аграрной продукции.

Необходимость решения обозначенной научной и практической проблемы определили цель данной статьи – обоснование теоретических и методических аспектов концепции интегрированной логистики и их

эффективное применение в условиях АПК Республики Беларусь.

Материалы и методы

Исследование базировалось на изучении и обобщении специальных литературных источников отечественных и зарубежных авторов, а также нормативно-правовой базы Республики Беларусь. В ходе исследований применялись методы – монографический, системного и сравнительного анализа, графический, факторного анализа, экспертных оценок.

Основная часть

Изучение исторических этапов развития логистической системы в АПК показало, что к настоящему времени сформировались 4 научные концепции (экономическая и интегрированная концепции, концепции общих затрат и бизнес-логистики), каждая из которых характеризуется количеством участников агрологистической интеграции, специфичными для данных структур методами организации производства и материального обеспечения, уровнем квалификации персонала предприятий, качеством взаимодействия внутри компаний, эффективностью работы с органами управления (табл.) [12, 13].

Так, преимуществом экономической концепции стало применение отдельных логистических функций для уменьшения затрат при производстве, транспортировке и складировании аграрной продукции, что способствовало созданию предпосылок развития агропромышленной отрасли и появлению первых логисти-

ческих организаций. Концепция общих затрат послужила базисом, на котором строилась методология принятия логистических решений. Ее сущность состоит в перегруппировке затрат (дистрибуции), позволяющей уменьшить общий уровень расходов на продвижение товаров от производителей к потребителям. В отдельных случаях изменение схемы транспортировки дает возможность сэкономить на складировании и содержании запасов. В связи с этим при увеличении издержек на транспортировку товаропроизводители одновременно добиваются уменьшения общих затрат.

Развитию бизнес-логистики и интегрированной концепции способствовали глобализация мировой экономики, происходящее в мире углубление торговой экономической интеграции, интернационализация национальных хозяйственных связей, появление новой в государственном регулировании экономической инфраструктуры, широкое использование методов всеобщего управления качеством, а также создание на внутреннем и внешнем аграрном рынке комплексных логистических цепей [14].

На современном этапе развития субъектами АПК приоритет отдается интегрированной логистике, которая объединяет различные этапы и функции логистической цепи, такие как перевозки, управление складами и транспортом. При этом основной ее принцип заключается в активном взаимодействии между всеми участниками агрологистической цепи. Это в совокупности обеспечивает повышение эффективности деятельности организации за счет снижения издержек, оптимизации логистических процессов (выбор опти-

Таблица. Эволюция научных концепций развития логистической системы в АПК с учетом интеграции звеньев товародвижения (в авторской трактовке)

Название периода, временной интервал	Основные участники агрологистической интеграции						
	Поставщик с.-х. сырья	Внешний транспорт по доставке с.-х. сырья	Предприятие – потребитель сельскохозяйственного сырья			Внешний транспорт по доставке продовольствия	Потребитель продовольствия
Склад сырья			Переработка	Склад готовой продукции			
	Экономическая концепция рассматривает логистику как интегральный инструмент, обеспечивающий снижение общих затрат на производство и реализацию продукции в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности, управление материальными потоками в аграрном бизнесе						
Фрагментация, 1930-1960-е гг.	-	-	-	-	+	+	-
	Концепция общих затрат определяет роль затрат на производство, прогресс в компьютерных и информационных технологиях, изменения в стратегии запасов						
Становление, 1970-1980-е гг.	-	-	-	-	+	+	+
	Концепция бизнес-логистики рассматривается как интегральный инструмент управления и координации спроса и предложения на конкретное сельскохозяйственное сырье и продовольствие, поставляемые в определенное место и в заданный период времени						
Развитие, 1980-1990-е гг.	+	+	+	-	+	+	+
	Интегрированная концепция обеспечивает создание полной внутренней и внешней логистической цепи с минимальными общими затратами						
Интеграция, с 1990-х гг. по настоящее время	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. Участие звена в интеграции отмечено знаком (+).

мальных маршрутов доставки, планирование запасов на складе, улучшение системы управления оборотным капиталом), управления ценами и др. (рис. 1).

Для АПК Республики Беларусь интегрированная логистика представляет собой сложный процесс, который требует взаимодействия различных участников и звеньев агрологистической цепи. Учитывая, что в рамках проекта Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года предусмотрено формирование развитой цифровой инфраструктуры АПК, включая автоматизацию процессов, связанных с производством, обработкой, хранением и продажей сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, то требуется создание системы, способной объединить все компоненты и обеспечить их согласованную работу для достижения наилучших результатов [1].

В данном контексте определяющими принципами интегрированной логистики в АПК должны стать:

1) интеграция всех логистических функций и про-

цессов внутри предприятия, обеспечивающая оптимальное использование ресурсов и повышение эффективности работы всей агрологистической системы;

2) комплексный подход к управлению транспортными и складскими операциями, который предполагает учет и координацию всех этапов поставки товара – от приобретения и хранения до доставки потребителю аграрной продукции. Такой подход позволяет ускорить обработку заказов, уменьшить запасы на складах и снизить затраты на перевозки;

3) оптимизация логистических процессов за счет использования различных методов и инструментов, таких как контроль качества, анализ данных и применение современных информационных систем;

4) управление рисками (анализ и учет рисков, связанных с транспортировкой и хранением товаров), что позволяет своевременно реагировать на возможные проблемы и минимизировать их влияние на работу организации АПК.

Немаловажное значение имеют основные компо-



Рисунок 1. Теоретико-методические основы концепции интегрированной логистики

ненты интегрированной логистики в АПК, а именно: транспорт; склады; управление перевозками. Каждый из представленных компонентов на рисунке играет важную роль в обеспечении национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь на основе управления товарными потоками и эффективной работы логистической системы. Правильная организация транспорта, эффективное управление складами и оптимизация перевозок помогают снизить затраты на производство и расходы на реализацию, повысить скорость сырьевых и товарных поставок.

Изучение зарубежного опыта показало, что организациями АПК применяются различные модели планирования и организации логистической деятельности, выбор которых обусловлен спецификой вида экономической деятельности. Так, одной из распространенных практик интегрированной логистики является использование концепции «Just-in-Time» – система управления товарно-материальными запасами точно в срок, т. е. способ организации поставок производителю, при которой время и объемы поступления сырья, материалов и комплектующих согласуются с графиками производства. Данная концепция популярна как среди крупных корпораций, так и среди малых предприятий, поскольку ее применение способствует увеличению денежного потока и уменьшению объема финансовых ресурсов, необходимых для ведения бизнеса [2; 15].

Еще одной практикой интегрированной логистики является использование системы управления складскими запасами (Warehouse Management System, WMS), которая выполняет комплекс важнейших функций, направленных на совершенствование складской логистики:

- обеспечивает четкий учет движения товаров на всех этапах их пребывания на складе;
- способствует оптимальному размещению товаров, учитывая их габариты, вес, условия хранения, частоту востребованности, а также планировку самого склада;
- ускоряет процессы комплектации и сборки заказов, обеспечивая для персонала наиболее эффективные маршруты перемещения по складу;
- минимизирует человеческий фактор и снижает количество ошибок при приемке, комплектации и отгрузке товарно-материальных ценностей;
- дает возможность проводить инвентаризацию без полной остановки повседневной деятельности склада;
- предоставляет руководителям инструменты для организации работы складского персонала, мониторинга их производительности и распределения рабочих задач [16].

В развитие этого нами определены направления системного внедрения исследуемой концепции в организациях АПК Республики Беларусь как неотъемлемой части современного бизнеса. Важное значение имеют цифровые технологии управления земледелием на всех этапах производства, системы управления и диагностики сельскохозяйственной техники на ос-

нове больших данных. Кроме того, актуальны инструменты интеллектуального планирования сельскохозяйственных работ, системы дифференцированного внесения удобрений, цифровые решения по мониторингу и прогнозированию распространения вредителей и болезней с применением алгоритмов раннего выявления в сельскохозяйственных культурах.

Для эффективного применения концепции интегрированной логистики требуется создание платформ электронной торговли продуктами питания, мобильных приложений для розничных покупателей, оптовых распределительных центров с современными цифровыми технологиями товародвижения и возможностью формирования электронных торгов и заказов. Это позволит сформировать устойчивые модели продвижения сельскохозяйственной продукции и продовольствия на внутреннем и внешних рынках, включая национальные электронные торговые площадки, торговые павильоны, представительства.

В целом внедрение принципов и практик интегрированной логистики позволяет оптимизировать процессы и снизить затраты, что в свою очередь способствует повышению конкурентоспособности организации АПК и укреплению их конкурентных преимуществ на рынке.

Заключение

Выполненное обоснование теоретических и методических аспектов концепции интегрированной логистики в АПК Республики Беларусь позволило получить следующие результаты.

1. Интегрированная логистика в АПК обеспечивает эффективное управление всеми этапами агрологического процесса, позволяя контролировать движение ресурсов и готовой продукции, оптимизировать транспортные перевозки, а также управлять запасами на складах. Благодаря интеграции информационных систем, аграрные субъекты получают актуальную и достоверную информацию о состоянии всех агрологистических процессов и оперативно принимают рациональные управленческие решения.

2. Мировой опыт показывает, что практическое применение основных компонентов интегрированной логистики в деятельности аграрных организаций обеспечивает гибкость и адаптивность управления к условиям быстро меняющегося аграрного рынка. При этом построение системы логистического управления основывается на основных ее принципах, в том числе оптимизации, комплексности и эффективности. Использование этих принципов позволяет организациям АПК достичь результативной работы и стать более конкурентоспособными на рынке.

3. Основными направлениями системного внедрения концепции интегрированной логистики в организациях АПК Республики Беларусь должны быть:

- 1) использование цифровых технологий управления земледелием на всех этапах производства, системы управления и диагностики сельскохозяйственной техники на основе больших данных;

2) внедрение инструментов интеллектуального планирования сельскохозяйственных работ;

3) создание платформ электронной торговли продуктами питания, мобильных приложений для розничных покупателей, оптовых распределительных центров с современными цифровыми технологиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проект Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года. URL:

<https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/proekt-Natsionalnoj-strategii-ustojchivogo-razvitija-na-period-do-2040-goda.pdf> (дата обращения: 03.07.2025).

2. Бауэрсокс, Д.Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок / Д.Дж. Бауэрсокс, Д.Дж. Клосс; пер с англ. – 2-е изд. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005. – 640 с.

3. Догиль, Л.Ф. Управление затратами при формировании и трансформации логистических систем на различных этапах трансформационных преобразований и адаптационных процессов / Л.Ф. Догиль, С.Н. Беликов // Логистические системы и процессы в условиях экономической нестабильности: материалы VI Междунар. заочной науч.-практ. конф., г. Минск, 5-6 дек. 2018 г. / Ин-т бизнеса БГУ. – Минск, 2019. – С. 54-65.

4. Интегрированные логистические системы доставки ресурсов: теория, методология, организация: монография / И.А. Еловой, И.А. Лебедева; под науч. ред. чл.-корр. НАН Беларуси В.Ф. Медведева. – Минск: Право и экономика, 2011. – 461 с.

5. Зорина, Т.Г. Современная парадигма логистического потенциала региона / Т.Г. Зорина, В.Э. Зубков // Научные труды Белорусского государственного экономического университета; редкол.: В.Н. Шимов [и др.] / М-во образования Респ. Беларусь; Белорус. гос. экон. ун-т. – Минск: БГЭУ, 2019. – Вып. 12. – С. 200-209.

6. Ивуть, М.А. Развитие облачных технологий и их влияние на хранение данных и информационные системы / М.А. Ивуть, Н.И. Белодед // Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС: сб. статей VI Междунар. науч.-технич. конф. «Минские научные чтения – 2023», г. Минск, 06-08 дек. 2023 г. – Минск: БГТУ, 2023. – Т. 1. – С. 209-214.

7. Киреенко, Н.В. Механизм совершенствования логистической системы в АПК Беларуси в условиях региональной торгово-экономической интеграции / Н.В. Киреенко, А.Л. Косова // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2019. – Т. 57. – № 2. – С. 162-178.

8. Мясникова, О.В. Принципы формирования производственно-логистических систем в современных условиях / О.В. Мясникова // Бизнес. Инновации. Экономика: сб. науч. ст. / Ин-т бизнеса БГУ. – Минск, 2020. – Вып. 4. – С. 178-185.

9. Логистика: интеграция и оптимизация логистических бизнес-процессов в цепях поставок: учебник (полный курс МБА) / В.В. Дыбская, Е.И. Зайцев, В.И. Сергеев, А.Н. Стерлигова. – М.: Эксмо, 2009. – 940 с.

10. Пустынникова, Е.В. Интегрированная логистика: электронное издание / Е.В. Пустынникова. – Ульяновск: УлГУ, 2016. – 130 с.

11. Уотерс, Д. Логистика. Управление цепью поставок / Д. Уотерс; пер. с англ. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 156 с.

12. Косова, А.Л. Научные концепции и основы построения логистической системы в АПК / А.Л. Косова // Аграрная экономика. – 2018. – № 3. – С. 51-59.

13. Косова, А.Л. Механизм совершенствования логистической системы в АПК Беларуси в условиях региональной торгово-экономической интеграции / А.Л. Косова / Под науч. ред. Н.В. Киреенко. – Минск: Ин-т системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – 179 с.

14. Косова, А.Л. Развитие логистики АПК в контексте цифровой трансформации национальной экономики Республики Беларусь / А.Л. Косова // Агропанорама. – 2025. – № 2. – С. 38-43.

15. Управление системой Just In Time на предприятиях / А.С. Селиверстов, В.В. Постнов, Д.Ю. Уткин [и др.] // Молодой ученый. – 2019. – № 41 (279). – С. 179-181.

16. Бобков, О. WMS-система: что это такое, как пользоваться программой автоматизации и управления складом. URL: <https://www.cleverence.ru/articles/biznes/chto-takoe-wms-sistema-kak-polzovatsya-programmoy-dlya-upravleniya-skladom/> (дата обращения: 03.07.2025).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 07.07. 2025

УДК 664:658.56

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-170-4-44-48>

ПЛАНИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Е.З. Ловкис,

начальник отдела по подтверждению соответствия РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», канд экон. наук

В статье предложен механизм достижения и формирования качества и конкурентоспособности продуктов здорового питания, состоящий из государственного обеспечения, научного сопровождения, потребительских предпочтений, производственных возможностей и товаропроводящих путей. Изложены порядок действий и методика анализа достигнутого формирования качества.

Ключевые слова: конкурентоспособность, пищевая промышленность, механизм, здоровое питание, продукты питания, маркетинг.

The article proposes a mechanism of achievement and formation of quality and competitiveness of healthy food products, consisting of public provision, scientific support, consumer preferences, production capabilities and commodity distribution routes. The procedure and methodology of analysis of achieved quality are presented.

Key words: competitiveness, food industry, mechanism, healthy nutrition, food products, marketing.

Введение

Пищевая промышленность Республики Беларусь в системе АПК представляет собой совокупность разнопрофильных отраслей, которые обеспечивают страну высококачественными продуктами питания в объемах и ассортименте, достаточном для формирования правильного и сбалансированного рациона питания.

На рынке продовольствия Евразийского экономического союза, Содружества Независимых Государств и других регионов белорусская продукция имеет устойчиво высокие показатели качества и безопасности. Успешная работа на рынке обеспечивается за счет постоянного совершенствования управления качеством на наднациональном, национальном и местном уровнях (агропромышленные объединения, производители сырья и ингредиентов и др.).

Вопросами достижения качества и контроля качества пищевых продуктов в РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» занимались ученые З.В. Ловкис, И.М. Почижкая, Е.М. Моргунова, Н.В. Комарова и другие. Управлению качеством в системе АПК уделяли первостепенное внимание академик В.Г. Гусаков в Республиканском научном унитарном предприятии «Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси» и его ученики П.В. Расторгуев, С.А. Кондратенко и др.

Вместе с тем конкуренция на рынке продовольствия постоянно усиливается, что ставит перед товаропроизводителями и отраслевыми органами управления новые актуальные задачи по повышению конкурентоспособности отечественной продукции и наиболее полной реализации ее экспортного потенциала. Повышение качества и конкурентоспособности агропродовольственной продукции является одной из приоритетных задач в области достижения и обеспечения

продовольственной безопасности, при этом качество является стратегически важным фактором, определяющим ее конкурентные преимущества на рынке [1, 2].

Целью работы является научное обоснование формирования системы достижения и контроля качества пищевого продукта на уровне его разработки и планирования производства.

Основная часть

Категория «качество продукции» неразрывно связана с понятиями конкуренции и конкурентоспособности [3]. Конкуренция на рынке товаров и услуг вынуждает производителей непрерывно совершенствовать свое производство и наращивать инновационный потенциал [1]. Устойчивая конкурентоспособность характеризует совокупность потребительских свойств продукции, необходимых и достаточных для того, чтобы она в определенный момент времени могла быть реализована по социально приемлемым ценам на конкретном рынке. В условиях стабильного насыщения рынка продуктами питания для разных групп населения (дифференцированных и специализированных по состоянию здоровья, возрасту, приверженности здоровому образу жизни и др.) борьба за предпочтения потребителя постоянно усиливается, все больше возрастает роль неценовых форм конкуренции, в том числе за счет конкуренции в области качества.

В настоящее время товаропроизводители имеют возможность использовать современный мировой опыт в области управления качеством продукции, включая концепции международных стандартов ISO серий 9000 и 22000, статистические методы, инструменты контроля качества, методологию развертывания функции качества QFD, подход «Шесть сигм» и отечественный опыт (например, квалиметрическое прогнозирование и методологию квалиметрической

оценки). Согласно разделу «Основные положения и словарь», качество продукции и услуг организации определяется способностью удовлетворять потребителей, а также ожидаемым или непредусмотренным влиянием на другие заинтересованные стороны. Качество продукции и услуг включает в себя не только заложенные в них функции и параметры, но также восприятие потребителем их ценности и пользы.

Фундаментальную основу процессов составляют принципы «триады качества», согласно которому управление качеством осуществляется с помощью трех процессов:

1. Планирование качества (на этапе разработки необходимо планировать и проектировать качество продукции и процессов, удовлетворяющее установленным требованиям);

2. Контроль качества (практически на всех этапах следует проводить контроль для определения необходимости проведения корректировки процесса);

3. Улучшение качества (предполагает осуществление деятельности по определению оптимальных путей совершенствования процессов).

Направленное повышение качества продукции основывается на использовании в практике результатов последних и известных общественности научных исследований в области здорового питания (например, после открытия и распространения в СМИ информации о пользе антиоксидантов покупатель хочет видеть продукцию с антиоксидантами); анализа изменений пищевых привычек потребителей; учета возрастающей роли дополнительных гарантий качества и безопасности продукции, требуемых потребителями и государственными органами.

В РУП «Научно-Практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» на основании Доктрины национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь разработаны [2; 4]:

– концепция Государственной политики в области здорового питания населения Республики Беларусь на период по 2030 года;

– методические рекомендации «Достижение продовольственной конкурентоустойчивости»;

– стратегия повышения качества и безопасности пищевой продукции в Республике Беларусь до 2030 года.

Создана система достижения качества и безопасности пищевой продукции, в которую входят Национальный технический комитет по стандартизации (НТК-16), Республиканский контрольно-испытательный комплекс по качеству и безопасности продуктов питания (РКИК), Орган по сертификации сырья и пищевых продуктов, система центральных дегустационных комиссий (ЦДК), система мониторинга пищевой продукции по качеству и безопасности (конкурсы, дни качества).

Начиная с 2020 года, в Республике Беларусь действует Программа «Качество 2021-2025», которая предусматривает реализацию комплекса важнейших направлений мероприятий.

Нас рисунке 1 представлена модель системы до-

стижения и формирования качества продуктов питания.

Система формирования качества продуктов питания зависит от позиции государства, состояния научного сопровождения, возможностей производства и требований потребителя. Государство обеспечивает продовольственную безопасность, управляет национальной политикой в области качества продуктов питания и здоровья нации, обеспечивает развитие АПК и пищевой промышленности, гарантирует соблюдение стандартов качества и безопасности путем создания национальных программ развития и необходимых стандартов, осуществляет информационное обеспечение, управление продовольственным рынком и подтверждение соответствия продукции.

Механизм государственного и правового регулирования на предприятиях, производящих продукты питания, включает:

– таможенную, налоговую, правовую защиту конкурентоспособных отечественных предприятий;

– государственное регулирование (включая «замораживание» цен на продукцию естественных монополий);

– создание законодательно-правового механизма гарантий инвесторам, как отечественным, так и зарубежным;

– формирование организационно-правовой системы привлечения валютных ресурсов;

– формирование современной правовой и информационной инфраструктуры рынка ценных бумаг.

Государством формируется социальная политика и среда для обеспечения здоровья каждого человека и нации, в том числе и за счет «здорового» питания.

Все социальные факторы, способствующие развитию пищевой промышленности, концентрированно рассматриваются в группированных схемах, как социальная политика и социальная среда предприятия [5].

Под социальной политикой понимается комплекс мероприятий, направленных на определение форм, задач и содержания деятельности общества, проводимых государственными органами власти различных уровней, которые направлены на улучшение качества и уровня жизни социальных групп населения, финансируемых из средств государственного, местного и собственного бюджета. Социальная политика является неотъемлемой частью стратегии государства, относящейся к общественной сфере общества.

Важнейшими направлениями социальной политики предприятия являются: политика доходов, политика управления, политика сотрудничества с профсоюзами, политика социального обеспечения (защиты, помощи, поддержки) [5-9].

Научное сопровождение системы формирования качества продуктов питания предусматривает современную подготовку и переподготовку кадров, разработку и реализацию отраслевых программ по созданию инновационных технологий и продуктов, своевременное внесение стандартов качества и безопасности, мониторинг макро- и микронутриентного состава, контроль показателей качества и безопасности, доклинические и клинические испытания.

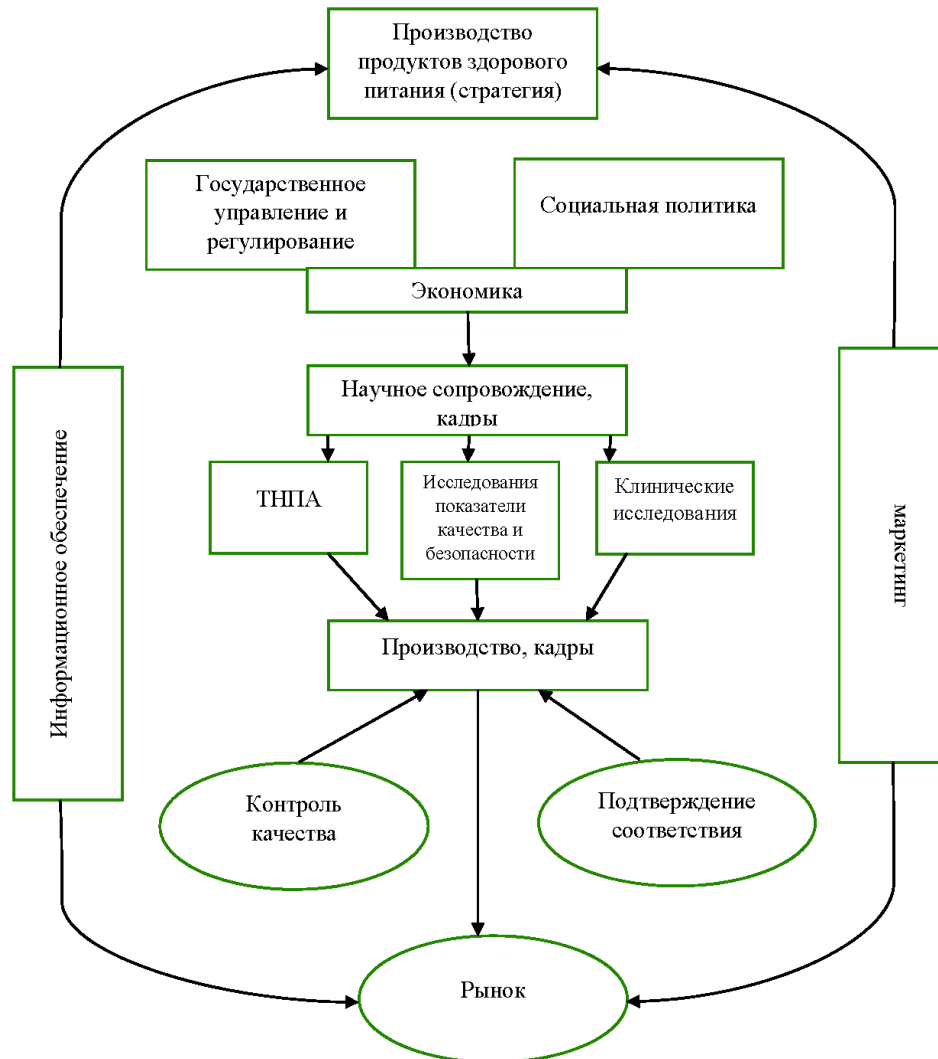


Рисунок 1. Блок-схема системы достижения и формирования качества продуктов здорового питания

Научное обеспечение предусматривает инновации, как путь достижения качества и конкурентоспособности. Технологические инновации касаются разработки и внедрения технологий, позволяющих получить продукты здорового питания, увеличить срок хранения готовой продукции без потери качества, применения ресурсосберегающих технологий, совершенствования технологических процессов, с целью сокращения времени производственного цикла, совершенствования тары, упаковки и логистики перевозок.

Механизм формирования качества и безопасности продукта и его качества изначально закладываются в стандартах и регламентах на сырье и продукты. Согласно требованиям к сырью и готовому продукту по показателям качества и безопасности, специалистами РУП «НПЦ НАН Беларуси по продовольствию» разрабатываются методы испытаний, методики определения показателей, используются существующие приборы и создается новое оборудование [10].

При производстве пищевых продуктов для здорового питания используют сырье животного и рас-

тительного происхождения, не поврежденное механически и сельскохозяйственными вредителями и болезнями, не увядшее и не проросшее, не загрязненное и не замороженное. Сырье по органолептическим показателям и показателям качества должно соответствовать требованиям ТНПА, действующим в Республике Беларусь.

Все молочное, зерновое, мясное, фруктово-овощное и другое сырье, используемое в производстве продуктов здорового питания, по содержанию токсичных элементов микротоксинов, пестицидов, нитратов, радионуклидов должно соответствовать установленным нормам технического регулирования в странах ЕАЭС. Выполнение требований безопасности направлено на предупреждение возникновения у потребителей болезней пищевого происхождения: пищевых инфекций и пищевых отравлений микробной и немикробной природы. Особенно важно соблюдение безопасности при производстве продуктов здорового питания.

Для каждой группы пищевых продуктов установлены допустимые уровни показателей пищевой ценно-

сти: массовая доля сухих и растворимых веществ, титруемых кислот, спирта, углеводов, в том числе добавленного сахара, белков, поваренной соли, минеральных веществ: калия, магния, натрия. Показатели качества и пищевой ценности по каждой группе продукции приводятся согласно допустимым уровням СанПиН и техническим регламентам Таможенного союза.

Кроме того, производимые в Республике Беларусь продукты здорового питания, по органолептическим и физико-химическим показателям должны соответствовать требованиям стандартов по группам продуктов. Для получения заключения о достоверных данных и влиянии продуктов питания на здоровье человека проводятся доклинические и клинические исследования.

Подтверждение соответствия продуктов здорового питания предусматривает оценку соответствия пищевой продукции в форме декларирования на соответствие требованиям Технических регламентов. Заявитель принимает декларацию о соответствии, используя собственные доказательства и/или результаты испытаний, полученные в сотрудничестве с аккредитованной испытательной лабораторией, в зависимости от выбранной схемы декларирования. Этот документ, зарегистрированный аккредитованным органом по сертификации по заявлению изготовителя (или уполномоченного лица), удостоверяет соответствие продукции требованиям технических регламентов ЕАЭС.

Маркетинговые исследования предусматривают анализ рынков сбыта и поиск новых потребителей, поиск и создание информации о возможной конкурентной среде и потребительских свойствах товаров конкурирующих фирм, поиски партнеров по внедрению и финансированию инновационного проекта [11, 12].

Все успехи в развитии любого предприятия АПК зависят от кадровой политики и кадрового потенциала: квалификации и компетентности кадров, специализации, возраста, стабильности, текучести, владения техническими и методическими средствами. Эти и другие показатели являются прямыми аргументами возможности внедрения новых технологий и продуктов. Высокопрофессиональный, работоспособный и мотивированный персонал становится основным преимуществом, так как именно качество кадрового состава, его грамотная расстановка и надлежащая мотивация позволяют обеспечивать постоянный рост производительности труда, повышение качества продукции и увеличение объемов ее выпуска. Для разработки кадровой политики предприятия необходимо учитывать ситуацию на рынке труда, состояние жизненного цикла и бизнеса предприятия, сырьевой базы и окружающей среды, вид стратегии развития и персонализированности.

Грамотная кадровая политика подразумевает последовательную и планомерную реализацию в несколько этапов: сбор и анализ информации, определение стратегических целей и приоритетов, разработка на их основе принципов кадровой политики компании, оценка кадрового состава, планирование потребности в персонале нужной квалификации и их переподготовке.

Производители пищевой продукции в условиях жесткой конкуренции и непредсказуемости экономи-

ческого развития соседних стран (эпидемии, экологические и политические катастрофы) обязаны обеспечить устойчивое развитие предприятия, рентабельность, рациональное использование трудовых ресурсов, отечественного сырья и ингредиентов, внедрять новые проекты, в том числе и за счет постановки на производство продуктов здорового питания.

Только инновационное развитие позволяет перерабатывающему предприятию увеличивать свой экономический потенциал и достигать поставленных целей путем стратегических изменений. Оценка оптимальности изменений является достаточно сложным этапом инновационного развития.

При планировании перехода предприятия на производство новых инновационных продуктов здорового питания возникает необходимость проведения анализа и оценки возможности обеспечения производственной мощности, особенности технической модернизации, необходимости приобретения нового оборудования и его автоматизации.

Для достижения намеченных планов предприятия перерабатывающей промышленности должны обеспечить конкурентоспособность продукции на рынке товаров и услуг; выявить новых потребителей; расширить ассортимент выпускаемых продуктов здорового питания; улучшить обслуживание оптовых покупателей; расширить рынок продаж.

При планировании производства пищевых продуктов всем участникам системы формирования качества необходимо обеспечить:

- производственный процесс (поиск необходимых поставщиков сырья, оборудования, технологий);
- реализацию произведенной продукции (формирование устойчивых коммерческих связей с оптовыми покупателями всех видов, развитие логистических связей на мировом продовольственном рынке);
- разработку ассортиментной политики (создание продукта, обладающего коммерческими свойствами и высокой конкурентоспособностью).

Особое значение приобретает разработка рациональной структуры ассортимента выпускаемой продукции, так как предприятие должно одновременно:

- руководствоваться принципами социальной ориентации при формировании ассортимента;
- сохранять продукцию прошлых лет, пользующуюся устойчивым спросом у потребителей;
- организовывать выпуск пробных партий новой продукции, продвижение ее на товарном рынке, одновременно изучать покупательский спрос о новинках и вносить соответствующие коррективы в производственный процесс;
- внедрять новые виды упаковки и транспортной тары продовольственных товаров.

Торгово-проводящие сети (товаропроводящие сети) на основании потребительских предпочтений и маркетинговых исследований реализуют продукцию, рекомендованную Министерством здравоохранения и установленную на законодательном уровне корзину потребителя.

Потребители пищевых продуктов обеспечивают

свое рациональное питание с учетом получаемой информации, рекомендаций и с целью улучшения состояния здоровья и качества жизни, предпочитая продукты отечественных производителей, так как они доступны по цене и обладают высоким качеством.

Заключение

Опыт стран с развитым сельским хозяйством и перерабатывающей промышленностью показывает, что успехи обеспечиваются за счет постоянного поиска инноваций и их внедрения. Инновационная стратегия – это в настоящее время наиболее действенный и мощный рычаг, с помощью которого предстоит насытить рынок разнообразной конкурентоспособной продукцией.

На основании исследований предложена система достижения и формирования качества продуктов питания, основанная на следующих факторах: организационном, экономическом, научного обеспечения, социальном, кадровом, производственном, получения продуктов здорового питания, информационного обеспечения, реализации продуктов, способности анализа управления из развития конкурентоспособности и комплексного подхода к повышению качества конкурентоспособности на перерабатывающем предприятии.

Внедрение инновационной технологии получения продуктов здорового питания (функционального, профилактического, персонализированного) высокого качества позволит перерабатывающему предприятию завоевать доверие потребителя и обеспечить конкурентоспособность на рынке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гусаков, В.Г. Конкурентоспособное развитие производства продуктов здорового питания в предприятиях пищевой промышленности Беларуси / В.Г. Гусаков, А.В. Пилипук / Нац. акад. наук Беларуси; Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси. – Минск: Беларус. навука, 2018. – 367 с.
2. Ловкис, З.В. Инновационная система национальной продовольственной конкурентоспособности: теория, методология и практика / З.В. Ловкис,

Ф.И. Субоч, Е.З. Ловкис / Национальная академия наук Беларуси; РУП «НПЦ НАН Беларуси по продовольствию». – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 384 с.

3. Захарова, С.В. Некоторые аспекты механизма управления конкурентоспособностью предприятия / С.В. Захарова // Вестник. – 2006. – № 13 (2). – С. 27-30.

4. Ловкис, З.В. Стратегия повышения качества и безопасности пищевой продукции Республики Беларусь до 2030 года / З.В. Ловкис, Е.М. Моргунова, Е.З. Ловкис // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2017. – № 1 (35). – С. 8-17.

5. Гапоненко, А.Л. Общий и специальный менеджмент / А.Л. Гапоненко, А.П. Панкрухин. – М.: РАГС, 2001. – 568 с.

6. Ансофф, И. Стратегическое управление / И. Ансофф. – М.: Экономика, 1989. – 519 с.

7. Чижова, Е.Н. Рационализация деятельности предприятия: монография / Е.Н. Чижова. – СПб.: Химиздат, 2002. – 342 с.

8. Ильина, И.Е. Конкурентоспособность хозяйствующих субъектов. Сферы исследований и разработки: сущность и основные элементы / И.Е. Ильина, Е.Н. Жарова, А.Е. Скворцов // Вектор Науки ТГУ. Серия: Экономика и управление. – 2016. – № 4 (27). – С. 37-42.

9. Meyer, E. Contemporary Management / E. Meyer, M. Ashleigh, J.M. George, G.R. Jones; Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. – European edition. – New York, 2007. – 674 p. (McGraw – Hill International Edition).

10. Ловкис, З.В. Новые технологии и продукты питания / З.В. Ловкис, А.В. Мелещеня, К.И. Жакова [и др.]; под общ. ред. З.В. Ловкиса. – Минск: ИВЦ Минфина, 2025. – 272 с.

11. Dalgic, E. Handbook of Niche Marketing: principles and applications / E. Dalgic; Library of Congress Cataloging-in-Publication 5 Data. – New York; London; Oxford: Food Products Press, 2006. – 256 с.

12. Slavin, S.L. Economics: Principles, Problems and Policies / S.L. Slavin. – New York; London, 2008. – 833 p. (McGraw – Hill International Edition).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 28.07.2025

Правила для авторов

1. Журнал «Агропанорама» помещает достоверные и обоснованные материалы, которые имеют научное и практическое значение, отличаются актуальностью и новизной, способствуют повышению экономической эффективности агропромышленного производства, носят законченный характер. Статьи публикуются на русском языке.

Приказом ВАК от 4 июля 2005 г. № 101 (в редакции приказа ВАК от 2.02.2011 г. № 26) журнал «Агропанорама» включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным (зоотехния) наукам.

2. Объем научной статьи, учитываемой в качестве публикации по теме диссертации, должен составлять, как правило, не менее 0,35 авторского листа (14000 печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.), что соответствует 8 стр. текста, напечатанного через 2 интервала между строками (5,5 стр. в случае печати через 1,5 интервала).

Рукопись статьи, представляемая в редакцию, должна удовлетворять основным требованиям современной компьютерной верстки. К набору текста и формул предъявляется ряд требований:

1) рукопись, подготовленная в электронном виде, должна быть набрана в текстовом редакторе Word версии 6.0 или более поздней. Файл сохраняется в формате «doc»;

2) текст следует сформатировать без переносов и выравнивания правого края текста, для набора использовать один из самых распространенных шрифтов типа Times (например, Times New Roman Cyr, Times ET);

3) знаки препинания (.,!?:;...) не отделяются пробелом от слова, за которым следуют, но после них пробел обязателен. Кавычки и скобки не отделяются пробелом от слова или выражения внутри них. Следует различать дефис«-» и длинное тире «—». Длинное тире набирается в редакторе Word комбинацией клавиш: Ctrl+Shift+«-». От соседних участков текста оно отделяется единичными пробелами. Исключение: длинное тире не отделяется пробелами между цифрами или числами: 1991-1996;

4) при наборе формул необходимо следовать общепринятым правилам:

а) формулы набираются только в редакторе формул Microsoft Equation. Размер шрифта 12. При длине формулы более 8,5 см желательнее продолжение перенести на следующую строчку;

б) буквы латинского алфавита, обозначающие переменные, постоянные, коэффициенты, индексы и т.д., набираются курсивом;

в) элементы, обозначаемые буквами греческого и русского алфавитов, набираются шрифтом прямого начертания;

г) цифры набираются шрифтом прямого начертания;

д) аббревиатуры функций набираются прямо;

е) специальные символы и элементы, обозначаемые буквами греческого алфавита, использованные при наборе формул, вставляются в текст только в редакторе формул Microsoft Equation.

ж) пронумерованные формулы пишутся в отдельной от текста строке, а номер формулы ставится у правого края.

Нумеруются лишь те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.

3. Рисунки, графики, диаграммы необходимо выполнять с использованием электронных редакторов и вставлять в файл документа Word. Изображение должно быть четким, толщина линий более 0,5 пт, размер рисунка по ширине: 5,6 см, 11,5 см, 17,5 см и 8,5 см.

4. Цифровой материал должен оформляться в виде таблиц. Каждая таблица должна иметь заголовок и номер (если таблиц несколько). Рекомендуется установить толщину линии не менее 1 пт. В оформлении таблиц и

графиков не следует применять выделение цветом, заливку фона.

Фотографии и рисунки должны быть представлены в электронном виде в отдельных файлах формата *.tif или *.jpg с разрешением 300 dpi.

Научные статьи, публикуемые в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, должны включать:

индекс УДК;

название статьи;

фамилию и инициалы, должность, ученую степень и звание автора (авторов) статьи;

аннотацию на русском и английском языках;

ключевые слова на русском и английском языках;

введение;

основную часть, включающую графики и другой иллюстративный материал (при их наличии);

заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;

список цитированных источников;

дату поступления статьи в редакцию.

В разделе «Введение» должен быть дан краткий обзор литературы по данной проблеме, указаны не решенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована цель работы.

Основная часть статьи должна содержать описание методики, аппаратуры, объектов исследования и подробно освещать содержание исследований, проведенных авторами.

В разделе «Заключение» должны быть в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения.

Дополнительно в структуру статьи может быть включен перечень принятых обозначений и сокращений.

5. Литература должна быть представлена общим списком в конце статьи. Библиографические записи располагаются в алфавитном порядке на языке оригинала или в порядке цитирования. Ссылки в тексте обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

6. Статьи из научно-исследовательских или высших учебных заведений направляются вместе с сопроводительным письмом, подписанным директором и приложенной экспертной справкой по установленной форме.

7. Статьи принимаются в электронном виде с распечаткой в одном экземпляре. Распечатанный текст статьи должен быть подписан всеми авторами. В конце статьи необходимо указать полное название учреждения образования, организации, предприятия, ученую степень и ученое звание (если есть), а также полный почтовый адрес и номер телефона (служебный или домашний) каждого автора.

8. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, опубликованных ранее или принятых к печати другими изданиями.

9. Плата за опубликование научных статей не взимается.

10. Право первоочередного опубликования статей предоставляется лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения.

Авторские материалы для публикации в журнале «Агропанорама» направляются в редакцию по адресу:

220012, г. Минск, пр-т Независимости, 99, корп. 5, к. 602; 608. БГАТУ

Система поддержки принятия решений по оптимизации структуры сырьевого конвейера для обеспечения хозяйств кормами

В составе программного комплекса имеются следующие приложения:

- расчет годовой потребности хозяйства в кормах;
- оптимизация структур посевов кормовых культур;
- отображение информации о заготовке, хранении и расходовании кормов;
- расчет кормового баланса хозяйства;
- оптимизация загрузки машинно-тракторного парка;
- модуль работы с картографическими данными.

Разработанный программный комплекс позволяет автоматизировать работу по планированию и производству кормов в хозяйстве.

Расчет сбалансированного суточного рациона

Новый рацион | Копировать рацион | Взять заготовку из базы | Закрыть рацион | Сохранить в базу | Печать

Расчет 1

Название рациона: Рацион молочные коровы 550кг удой 14к. лактирующие нормы РБ

Группа: молочные коровы | Стадия лактации: Лактирующая

Нормы кормления: РБ | Масса животного: 550 | Удой суточный: 14

Число голов: 1 | Планируемая масса: | Удой за лактацию: |

Начало кормления: 11.05.2017 | Структура рациона: по СВ

Окончание кормления: 11.05.2017 | Отображение масс кормов: в кг. сух. в-ва

Корма	% структура	Масса СВ, кг
Сено бобовых культур, клеверное	15,4	4,000
Сенаж из злаковых культур, ежа сборная	26,9	7,000
Барда ржаная, сушеная	3,8	1,000
Зерно кукуруза	7,7	2,000
Комбикорм пш.выращивания и откорма КРС, КР-3	46,2	12,000

Компонент	Норма	В рационе	Отклонение
Корм. ед	18,15	17,165	-0,9848 -5,4 %
ОЗ, МДж	216	179,82	-36,183 -16,8 %
Сух. в-во, кг	22,5	26	3,5 15,6 %
Сыр. прот., г	2782,5	2111,7	-670,79 -24,1 %
Перев. прот., г	1827	1466,2	-360,82 -19,7 %
Сыр. жир, г	589,5	529,25	-60,25 -10,2 %
Сыр. клетч., г	5475	1769,4	-3705,6 -67,7 %
Крахмал, г	3220,5	5068,8	1848,3 57,4 %
Сахар, г	1215	432,81	-782,19 -64,4 %
Кальций, г	123	126,75	3,752 3,1 %
Фосфор, г	87	75,12	-11,88 -13,7 %

Корма: Включить в рацион | Исключить из рациона

[Весь список] | Зеленые | Зерно | Комбикорма | Корнек.лубнеплоды | Микроэлементы | Минеральные добавки | Молочные корма | Не определена | Отходы производства | Сенаж | **Сено** | Силос | Солома

Название	Цена, р./кг.СВ	Корм. ед	СВ, кг.	ОЗ, МДж	Сыр. прот., г.	Перев. прот., г.
Сено злаково-бобовое	0	0,38226	0,831	6,01644	81,6042	51,4389
Сено бобовых культур, клеверное	0	0,406	0,812	5,67588	110,432	68,4516
Сено бобовых культур, клеверо-тимофеечное	0	0,34486	0,802	5,46162	75,9494	49,0022
Сено бобовых культур, люцерновое	0	0,41307	0,843	6,17076	127,293	83,2884
Сено злаковое	0	0,35552	0,808	5,55904	54,944	28,28
Сено злаковых культур, ежи сборной	0	0,3348	0,837	5,36517	70,308	35,991
Сено злаковых культур, лисохвост	0	0,33374	0,814	5,50264	67,562	34,188
Сено злаковых культур, овсяницы луговой	0	40,373	0,859	6,03018	83,323	42,95

