



ISSN 2078-7138 (Print)
ISSN 2078-7146 (Online)
DOI: 10.56619/2078-7138-2025-168-2

АГРОПАНОРАМА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ РАБОТНИКОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

№ 2
апрель
2025

В номере:

Исследование процесса очистки зерновой смеси на плоских решетках с прямоугольными отверстиями

Об использовании высокочастотного тока в терминалах релейной защиты

Методы диагностирования зарождающихся эксплуатационных дефектов деталей автотракторных двигателей

Развитие логистики АПК в контексте цифровой трансформации национальной экономики Республики Беларусь



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ И
ПЕРЕПОДГОТОВКИ КАДРОВ АПК**

Уважаемые коллеги!

**Приглашаем Вас принять участие в работе
II Международной научно-практической конференции**

***«АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС В
УСЛОВИЯХ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ:
НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, КАДРОВОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ»***,

**которая состоится в Белорусском государственном
аграрном техническом университете в
рамках ежегодной Международной
специализированной выставки
«БЕЛАГРО»**

5 - 6 июня 2025 г.

Основные направления работы конференции:

- Инновации в технологиях, организации и управлении сельскохозяйственным производством. Научные подходы к повышению устойчивости развития агропромышленного комплекса***
- Инновационное развитие отрасли животноводства. Цифровизация молочного скотоводства***
- Развитие системы кадрового обеспечения инновационного аграрного производства через совершенствование социального, экономического и образовательного аспектов***

г. Минск, пр-т Независимости, 99, корпус 1

Контактные телефоны:

(+375-17) 272-61-55; 367-91-20; 272-92-40

E-mail: noio.ipk@bsatu.by

www: bsatu.by

АГРОПАНОРАМА 2 (168) апрель 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 24.04.2025 г. Зак. № 227 от 23.04.2025 г.

Дата выхода в свет 30.04.2025 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 1-е п/г 2025 г.:

для индивидуальных подписчиков - 48,39 руб.;

ведомственная - 50,91 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

В.П. Чеботарев, Д.Н. Бондаренко, А.А. Зенов, Д.А. Яновский, Г.А. Радишевский, Н.П. Гурнович
Исследование процесса очистки зерновой смеси на плоских решетках с прямоугольными отверстиями.....2

Энергетика. Транспорт

И.Ю. Чака, В.М. Збродыга, В.Э. Обух, А.В. Ясюкевич
Об использовании высокочастотного тока в терминалах релейной защиты.....8

Е.С. Шмелев, А.П. Ахрамович, К.В. Гаркуша
Модульная инфракрасная система отопления крупногабаритных производственных корпусов.....13

М.А. Бойко, А.В. Крутов
Механизм коагуляции загрязнений при электрохимической очистке сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники.....17

Технический сервис в АПК. Экономика

В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролеч, А.А. Жешко
Методы диагностирования зарождающихся эксплуатационных дефектов деталей автотракторных двигателей.....25

В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, А.И. Цымбалюк, А.В. Макаревич
Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*.
Часть 3. Метод оценки размеров, количества и формы частиц.....32

А.Л. Косова
Развитие логистики АПК в контексте цифровой трансформации национальной экономики Республики Беларусь.....38

О.А. Балабанович
Оценка устойчивого развития коммерческих организаций аграрного бизнеса Республики Беларусь: международные стандарты, национальные ограничения и адаптационные стратегии.....44

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ НА ПЛОСКИХ РЕШЕТАХ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В.П. Чеботарев,

зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Д.Н. Бондаренко,

ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

А.А. Зенов,

ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

Д.А. Яновский,

ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

Г.А. Радишевский,

доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Н.П. Гурнович,

доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье описано исследование процесса очистки зерновой смеси на плоских решетках с прямоугольными отверстиями, с использованием методики планирования экспериментов. Определены зависимости содержания проходовой фракции зерновой смеси в сходовой от частоты колебаний и угла наклона решет. Установлен фактор, оказывающий наибольшее влияние на параметр оптимизации, а также определен оптимальный режим работы семяочистительной машины с двумя плоскими решетками.

Ключевые слова: зерновая смесь, плоское решето, сходовая фракция, проходовая фракция, прямоугольные отверстия, колебания, угол наклона решета.

The article presents a study of the process of cleaning grain mixtures on flat sieves with rectangular holes, using a methodology for planning experiments. The dependences of the content of the passing fraction of the grain mixture in the convergent fraction on the frequency of oscillation and the angle of inclination of the sieves are determined. The factor that has the greatest influence on the optimization parameter is identified, and the optimal operating mode of a seed cleaning machine with two flat sieves is determined.

Key words: grain mixture, flat sieve, outgoing fraction, passing fraction, rectangular holes, oscillation, screen inclination angle.

Введение

Одна из основных задач при производстве зерна – его своевременная и качественная послеуборочная обработка. Основными технологическими процессами послеуборочной обработки являются: предварительная очистка, сушка, первичная очистка, вторичная очистка и обеспечение условий хранения. Каждый из этих приемов улучшает определенные качества зерна и доводит до базисных кондиций. Задачей очистки (сепарации) является выделение из зерновой смеси всех примесей, а также удаление битого, шуплого и поврежденного зерна основной культуры для повышения чистоты зернового материала. Очистке должно подвергаться все убранное зерно.

Принцип работы сепарирующих органов основан на различии физико-механических свойств отдельных

частиц зерновой смеси. К этим свойствам относятся: размеры, форма, аэродинамические свойства, состояние поверхности, плотность, электрофизические свойства, упругость, цвет и другие. Способы очистки и сортирования зерновой смеси определяются в зависимости от физико-механических свойств, составляющих исходный ворох [1].

Зерновую смесь на решетках разделяют по толщине (решета с прямоугольными отверстиями) и по ширине (решета с круглыми отверстиями). Процесс работы любого решета заключается в том, что поступившая на его поверхность смесь разделяется на проходную и сходовую части [2, 3]. Частицы, размеры которых меньше размеров отверстий решета, проваливаются через них, образуя проходную фракцию. Крупные зерна, размеры которых больше размеров

отверстий решета, сходят с него не проваливаясь и образуют сходовую фракцию. Процесс непрерывного перемещения зернового материала по решетам обеспечивается их колебаниями с определенной частотой, амплитудой, направлением колебаний, а также углом установки решет к горизонтали.

Научные исследования процессов сепарирования зерновых смесей проводились многими учеными в различных областях сепарирования зерна. Огромный вклад в развитие теории сепарирования зерна внесли В.В. Гортинский [4], И.Е. Кожуховский [5], В.М. Цециновский [6] и другие.

В современных сеячистительных машинах, как правило, используются два и более решет с различной формой и размером отверстий [7]. Решета закрепляются на решетном стане и в процессе работы имеют одинаковый угол, частоту и амплитуду колебаний. В то же время, на каждое из решет поступает зерновая смесь, имеющая различные геометрические размеры и вес, так как в процессе движения от верхнего решета к нижнему из зерновой смеси выделяются фракции, имеющие размеры больше проходных отверстий (по ширине либо толщине). В результате на каждом решете в сходовой фракции зерновой смеси образуются компоненты проходной фракции. В настоящее время отсутствуют какие-либо математические модели, позволяющие определять оптимальный режим работы сеячистительной машины с двумя и более решетами, обеспечивающий минимальное количество проходной фракции в сходовой на каждом решете.

Целью работы является определение зависимости содержания проходной фракции зерновой смеси в сходовой на плоских решетках с прямоугольными отверстиями от частоты колебаний и угла наклона решет и определение фактора, оказывающего наибольшее влияние на параметр оптимизации, а также оптимальных режимов работы сеячистительной машины с двумя плоскими решетами.

Основная часть

Исследование процесса очистки зерновой смеси проводилось на кафедре сельскохозяйственных машин Белорусского государственного аграрного технического университета. Для проведения исследования использовалась лабораторная установка (рис. 1), состоящая из рамы 6, на которой с помощью подвесов 7 установлен решетный стан 4. Решетный стан 4 со-

стоял из приемного бункера 3, под которым размещен блок из двух решет 9, закрепленных к решетному стану двумя фиксаторами 8. Для сбора сходовой фракции из блока решет 9 под ними была установлена емкость для отбора фракций 11. Колебания решетного стана 4 осуществлялись посредством передачи крутящего момента от электродвигателя 10 через клиноременную передачу на вал с эксцентриковым механизмом 5, который соединен с решетным станом 4 одним из подвесов. Изменение частоты колебаний осуществлялось с помощью преобразователя частоты 2 и пульта управления 1 (рис. 1).

Регулировка угла наклона решетного стана производилась маховиком 1 с последующей фиксацией 2. Контроль установленного угла происходит по регулировочной шкале 3 (рис. 2).

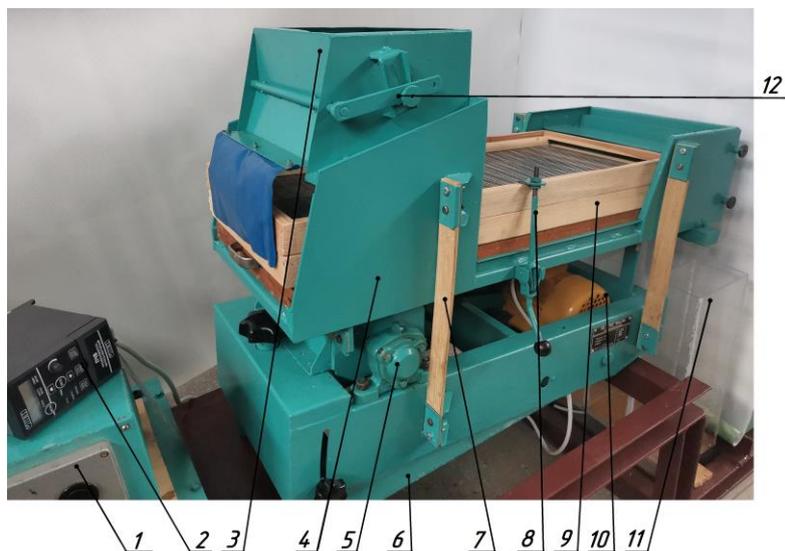


Рисунок 1. Лабораторная установка:

1 – пульт управления; 2 – преобразователь частоты колебаний; 3 – приемный бункер; 4 – решетный стан; 5 – вал с эксцентриковым механизмом; 6 – рама; 7 – подвес; 8 – фиксатор; 9 – блок решет; 10 – электродвигатель; 11 – емкость для отбора фракций; 12 – механизм дозировки подачи зерновой смеси

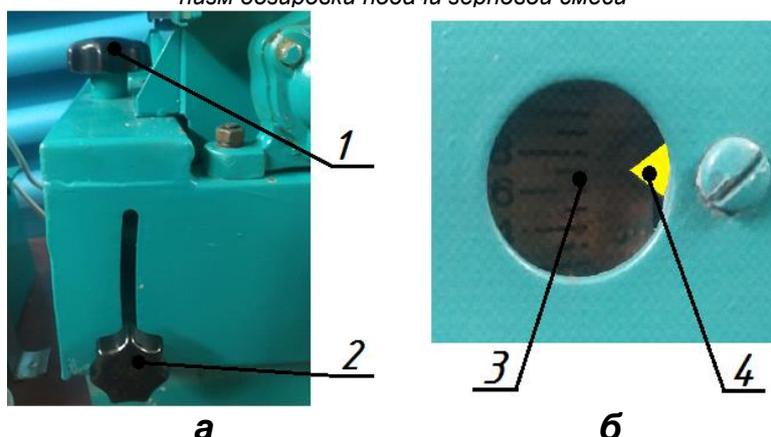


Рисунок 2. Механизм регулировки угла наклона решетного стана: а – общий вид механизма; б – визуальный контроль; 1 – маховик регулировки угла наклона решетного стана; 2 – маховик фиксации угла наклона; 3 – шкала регулировочная; 4 – указатель

Перед началом исследований производилась подготовка зерновой смеси с использованием лабораторной сортировальной машины *Sortimat* [8]. В установке использовались три типа решет с прямоугольными отверстиями и шириной (h) – 2,8; 2,5; 2,0 мм, благодаря которым были выделены три зерновые фракции по 100 г:

- фракция $2,8 > h > 2,5$ мм;
- фракция $2,5 > h > 2,0$ мм;
- фракция $h < 2,0$ мм.



а



б

Рисунок 3. Лабораторная сортировальная машина Sortimat («Pfeuffer», Германия):

- а** – общий вид сортировальной машины;
- б** – навеска с зерном на верхнем решете

Показатели лабораторной установки и зерновой смеси:

- масса навески – 300 г;
- культура – ячмень;
- влажность культуры – $W = 14\%$
- верхнее решето – плоское, с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм;
- нижнее решето – плоское, с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм;
- частота колебаний $V = 40 \dots 50$ Гц;
- угол наклона решет к горизонтали $\alpha = 6 \dots 10^\circ$;
- время сепарации навески зерновой смеси – 1 минута.

Процесс очистки происходил путем подачи навески зерновой смеси в приемный бункер 3, откуда зерновая смесь под собственным весом ссыпалась на блок из двух решет 9. В процессе очистки зерновая смесь разделялась

на три фракции: $2,5 > h$; $2,5 < h > 2,0$; $h > 2,0$, которые распределялись по ячейкам емкости для отбора фракций 11 (рис. 1). Далее каждая фракция взвешивалась, и результат фиксировался в лабораторном журнале.

Параметры оптимизации: $m_{2,5}$ – содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями толщиной 2,5 мм, %; $m_{2,0}$ – содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями толщиной 2,0 мм, %.

Факторы, влияющие на параметр оптимизации: α – угол установки решета, град; V – частота колебаний решета, Гц.

Факторы и уровни их варьирования представлены в таблице 1.

Кодирование уровней факторов осуществлялось по формуле [10]:

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Варьируемый параметр	α	V
Единица измерения	град	Гц
Кодовые обозначения факторов	x_1	x_2
Верхний уровень ($x_i = +1$)	10	50
Основной уровень ($x_i = 0$)	8	45
Нижний уровень ($x_i = -1$)	6	40
Интервал варьирования	2	5

$$x_i = \frac{C_i - C_{0i}}{t}, \quad (1)$$

где x_i – кодированное значение уровня фактора;

$C_i - C_{0i}$ – натуральное значение фактора (соответственно, его текущее значение и значение на нулевом уровне), кг/м^3 ;

t – натуральное значение интервала варьирования фактора, кг/м^3 .

$$t = \frac{C_i^B - C_i^H}{t}, \quad (2)$$

где C_i^B и C_i^H – значение фактора, соответственно, на верхнем и нижнем уровнях, кг/м^3 .

Все эксперименты проводились в трехкратной повторности. Полученные результаты уточнялись и округлялись. С целью исключения влияния системных ошибок, вызванных внешними неконтролируемыми факторами, в ходе экспериментальных исследований выполнялась рандомизация опытов, под которой понимается чередование отдельных опытов в случайном порядке. Процедура рандомизации опытов выполнялась с помощью таблиц случайных чисел [9]. При этом, последовательно двигаясь по столбам таблицы, были выбраны числа, соответствующие порядковым номерам проводимых опытов.

Матрица ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для двух факторов (закодированный вид), влияющих на $m_{2,5}$ и $m_{2,0}$, данные в раскодированном виде и результаты измерений приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2. Матрица планирования для $m_{2,5} = f(\alpha, V)$ и результаты измерений

Номер опыта	Уровень фактора			Раскодированный вид		Y_n			\bar{y}_n
	x_0	x_1	x_2	α	V	y_1	y_2	y_3	
1	1	1	1	10	50	4,83	4,81	5,14	4,93
2	1	1	0	10	45	7,48	8,47	8,42	8,13
3	1	1	-1	10	40	6,70	6,86	7,27	6,94
4	1	0	1	8	50	2,23	2,09	1,89	2,07
5	1	0	0	8	45	5,64	5,43	5,87	5,65
6	1	0	-1	8	40	5,39	5,21	5,57	5,39
7	1	-1	1	6	50	0,97	1,13	1,02	1,04
8	1	-1	0	6	45	4,81	4,95	4,21	4,66
9	1	-1	-1	6	40	5,12	5,47	5,34	5,31

Таблица 3. Матрица планирования для $m_{2,0} = f(\alpha, V)$ и результаты измерений

Номер опыта	Уровень фактора			Раскодированный вид		Y_n			\bar{y}_n
	x_0	x_1	y_1	y_2	y_1	y_2	y_3		
1	1	1	1	10	50	4,80	4,55	5,62	4,99
2	1	1	0	10	45	2,76	3,13	3,78	3,22
3	1	1	-1	10	40	1,97	2,49	1,79	2,08
4	1	0	1	8	50	3,62	3,38	3,07	3,36
5	1	0	0	8	45	2,30	2,71	3,09	2,70
6	1	0	-1	8	40	1,90	2,41	1,73	2,01
7	1	-1	1	6	50	3,91	4,96	3,57	4,15
8	1	-1	0	6	45	2,69	2,77	2,36	2,61
9	1	-1	-1	6	40	2,58	1,98	2,32	2,29

С помощью критерия Кохрена выполнялась проверка гипотезы об однородности дисперсий. Табличное значение критерия Кохрена выбиралось по таблице [10, с. 159, Приложение 2], для чисел степеней свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 9$ $G(\alpha, f_k, k)$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ для $m_{2,5} = f(\alpha, V)$ и $m_{2,0} = f(\alpha, V)$ оно составляет $G = 0,477$. Так как расчетное значение критерия Кохрена меньше табличного $G_p m_{2,5} = 0,424 < G = 0,477$ и $G_p m_{2,0} = 0,303 < G = 0,477$, условие выполняется для каждого значения параметра оптимизации. Следовательно гипотеза об однородности построчных выборочных дисперсий не противоречила экспериментальным данным.

Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии приведены в таблицах 4, 5.

Регрессионное уравнение второго порядка для параметра оптимизации $m_{2,5} = f(\alpha, V)$

$$y = 5,62 + 1,50x_1 - 1,60x_2 + 0,56x_1x_2 + 0,80x_1^2 - 1,87x_2^2 \quad (3)$$

Регрессионное уравнение второго порядка для параметра оптимизации $m_{2,0} = f(\alpha, V)$

$$y = 2,49 + 0,21x_1 + 1,02x_3 + 0,26x_1x_3 + 0,53x_1^2 + 0,30x_3^2 \quad (4)$$

Следующий этап обработки экспериментальных данных заключался в определении значимости полученных коэффициентов в уравнениях регрессии. Значимость коэффициентов уравнений проверялась по t-критерию Стьюдента [10]. Затем определялись доверительные интервалы соответствующих коэффициен-

тов. Табличное значение t-критерия Стьюдента $t_{(\alpha, f)}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$, числе степеней свободы $f = 18$ равно 2,1 [10, с. 159, Приложение 1]. Согласно условию [9, с. 63] в регрессионных уравнениях второго порядка $m_{2,5} = f(\alpha, V)$ и $m_{2,0} = f(\alpha, V)$ статистически незначимые коэффициенты отсутствуют.

Адекватность уравнений регрессии (3), (4) экспериментальным данным проверялась по F-критерию Фишера. Табличное значение критерия Фишера выбирались по таблице [10, с. 160, Приложение 3], для чисел степеней свободы f и $f_{ад}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ оно составляло $F(\alpha, f_{ад}, f_b) = 3,2$. Так как расчетное значение критерия Фишера меньше табличного $F_p m_{2,5} = 2,21 < F(\alpha, f_{ад}, f_b) = 3,2$ и $F_p m_{2,0} = 2,54 < F(\alpha, f_{ад}, f_b) = 3,2$ то, следовательно, полученные уравнения адекватно описывают экспериментальные данные.

Для использования уравнений (3), (4) в инженерных расчетах они были раскодированы заменой кодового значения факторов x_1, x_2 на натуральные переменные.

$$m_{2,5} = -104,18 - 4,98\alpha + 5,95V + 0,06\alpha V + 0,20\alpha^2 - 0,07V^2 \quad (5)$$

$$m_{2,0} = 35,20 - 3,22\alpha - 1,10V + 0,03\alpha V + 0,13\alpha^2 + 0,01V^2 \quad (6)$$

Поверхности отклика и их двумерные сечения, построенные по уравнениям регрессии с использованием программы «Statistica 10», представлены на рисунке 4.

Таблица 4. Коэффициенты уравнения регрессии $m_{2,5} = f(\alpha, V)$

Коэффициенты уравнения регрессии квадратичной модели	Значение коэффициента
b_0	5,62
b_1	1,50
b_2	-1,60
$b_1 \cdot b_2$	0,56
b_1^2	0,80
b_2^2	-1,87

Таблица 5. Коэффициенты уравнения регрессии $m_{2,0} = f(\alpha, V)$

Коэффициенты уравнения регрессии квадратичной модели	Значение коэффициента
b_0	2,49
b_1	0,21
b_2	1,02
$b_1 \cdot b_2$	0,26
b_1^2	0,53
b_2^2	0,30

Определение оптимальных параметров работы решет, обеспечивающих минимальное содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с пря-

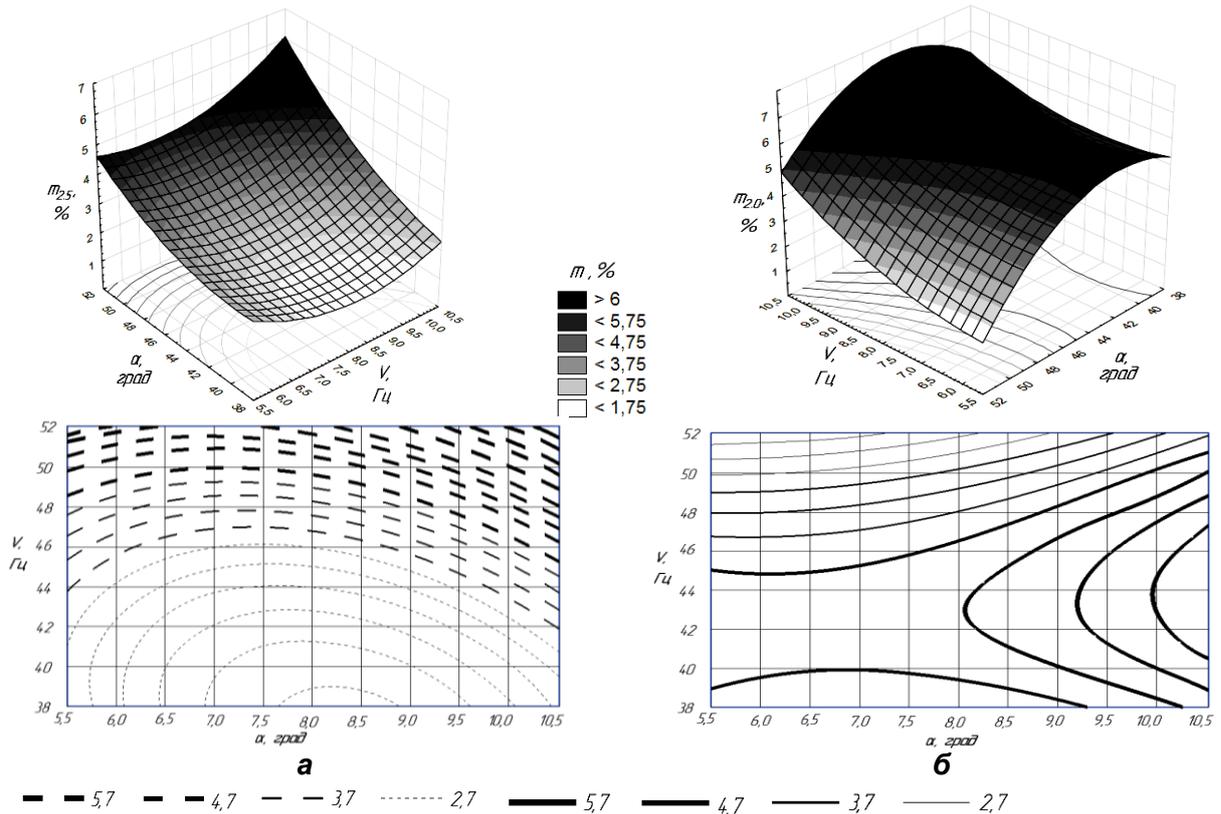


Рисунок 4. Поверхности отклика и их двумерные сечения: а – $m_{2.5} = f(\alpha, V)$; б – $m_{2.0} = f(\alpha, V)$

моугольными отверстиями шириной 2,5 мм и минимальное содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм, осуществлялся графическим методом путем наложения линий равного уровня параметров оптимизации (рис. 5).

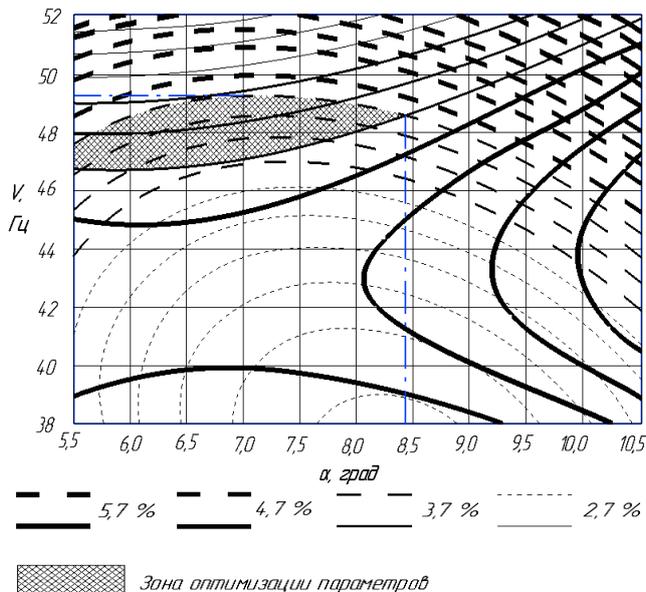


Рисунок 5. Графическое определение оптимальных параметров работы решет методом наложения линий равного уровня

Анализ поверхности отклика и ее двумерного сечения для $m_{2.5} = f(\alpha, V)$ показал:

- увеличение частоты колебаний решета от 40 до 50 Гц при угле наклона решета от 6° до 10° снижает содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм от 4,3 % до 2 %;

- увеличение угла наклона решета с 6 до 10° при частоте колебаний решета 50 Гц повышает содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм на 3,9 %.

Анализ поверхности отклика и ее двумерного сечения для $m_{2.0} = f(\alpha, V)$ показал:

- увеличение частоты колебаний решета от 40 до 50 Гц при угле наклона решета 6° повышает содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм на 1,9 %;

- увеличение частоты колебаний решета от 40 до 50 Гц при угле наклона решета 10° повышает содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм на 2,9 %;

- увеличение угла наклона решета с 6 до 10° при частоте колебаний решета 50 Гц повышает содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм на 0,84 %.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

1. Оптимальными параметрами для работы решета, обеспечивающих минимальное содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм и минимальное содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм, являются: $V = 47 \dots 49$ Гц, $\alpha = 5,5 \dots 8,4^\circ$.

2. Для решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм повышение частоты колебаний от 40 до 50 Гц при угле установки решет 10° повышает содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе, в среднем, на 3,2 %.

3. Для решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм повышение частоты колебаний от 40 до 50 Гц при угле установки решет 6° снижает содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе, в среднем, на 2,0 %.

4. Увеличение угла наклона решета с 6 до 10° , при частоте колебаний 40...50 Гц незначительно снижает содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе, в среднем, на 0,4 %.

Таким образом, для решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм факторы V и α оказывают практически равнозначное влияние на параметр оптимизации $m_{2,5}$. Для решета с прямоугольными отверстиями толщиной 2,0 мм наибольшее влияние на параметр оптимизации $m_{2,0}$ оказывает частота колебаний (V), нежели угол установки решета (α).

Полученные результаты исследования могут применяться при проектировании решетных зерноочистительных машин с регулируемыми параметрами угла установки и частоты колебаний решет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пути улучшения технологического процесса очистки зерна / В.П. Чеботарев [и др.] // Техническое

обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24-25 ноября 2022 г. / Беларус. гос. аграрн. техн. ун-т. – Минск: БГАТУ, 2022. – С. 93-96.

2. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные машины: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. / Н.И. Кленин, С.Н. Киселев, А.Г. Левшин. – М.: Колос, 2008. – 816 с.

3. Халанский, В.М. Сельскохозяйственные машины: учебник / В.М. Халанский, И.В. Горбачев. – М.: Колос, 2003. – 624 с.

4. Гортинский, В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1973. – 295 с.

5. Кожуховский, И.Е. Механизация очистки и сушки зерна / И.Е. Кожуховский, Г.Т. Павловский. – М.: Колос, 1968. – 439 с.

6. Технология обработки семян зерновых культур: учеб. пособие для специалистов XII11 / В.М. Цециновский [и др.]. – М., 1982. – 204 с.

7. Воздушно-решетные сепараторы МУЗ. Полымя ЗАО «Борисовский завод «Металлист»]. – URL: <https://polymya.com/ru/catalog/separatory-zernoochistitelnye-mashiny/vozdushno-reshetnye-separatory-muz/> (дата обращения: 07.03. 2024).

8. Лабораторная сортировочная машина Sortimat. – URL: <https://www.pfeuffer.com/ru/produkt/sortimat> (дата обращения: 07.03. 2024).

9. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

10. Хайлис, Г.А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.04.2025

“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 1-е полугодие 2025 года: для индивидуальных подписчиков - 48,39 руб., ведомственная подписка - 50,91 руб.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТОКА В ТЕРМИНАЛАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

И.Ю. Чака,

аспирант каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ

В.М. Збродыга,

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

В.Э. Обух,

инженер отдела автоматизации ОАО «Светлогорский ЦКК»

А.В. Ясюкевич,

студент агроэнергетического факультета БГАТУ

В статье рассмотрены теоретические предпосылки использования генерируемого в линию тока высокой частоты в качестве входного сигнала для срабатывания терминалов релейной защиты воздушных линий электропередач. Описан процесс возникновения стоячих волн высокочастотного тока и напряжения в проводах линии. Определено влияние на параметры высокочастотного тока распределенных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений проводов.

Ключевые слова: релейная защита, воздушная линия электропередач, параметры высокочастотного тока.

The article considers theoretical prerequisites of using the high frequency current generated in the line as an input signal for triggering the relay protection terminals of overhead power lines. The process of occurrence of standing waves of high-frequency current and voltage in the line conductors is described. The influence of distributed inductances, capacitances and active resistances of wires on the parameters of high-frequency current is determined.

Key words: relay protection, overhead power line, high-frequency current parameters.

Введение

Воздушные линии электропередач (ЛЭП) – это наиболее протяженные элементы электроэнергетической системы, которые проходят через населенные пункты, по лесным массивам, над сельскохозяйственными и прочими землями. В линиях электропередач наблюдается значительное количество повреждений, приводящих к аварийным и ненормальным режимам их работы. Несмотря на принимаемые меры безопасности, регулярно происходят несчастные случаи, связанные с поражением людей электрическим током. Создание и применение устройств релейной защиты, способных автоматически отключать линию электропередач при приближении на недопустимое расстояние к фазным проводам людей, механизмов и других токопроводящих предметов, позволило бы минимизировать количество и последствия таких несчастных случаев.

Для решения этой задачи авторы рассматривают возможность создания терминалов релейной защиты, пусковые органы которых реагируют на изменение параметров высокочастотного тока, генерируемого в фазные провода ЛЭП от внешнего генератора [1]. При этом в проводах наблюдается процесс возникновения стоячих волн тока и напряжения, впервые опи-

санный М. Фарадеем, и который используется современными учеными для решения прикладных задач в различных областях науки, но применительно к релейной защите ЛЭП до настоящего времени не рассматривался.

Цель данной работы – определить влияние распределенных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений проводов ЛЭП на параметры генерируемого в линию высокочастотного тока, что можно будет использовать при разработке терминалов релейной защиты.

Основная часть

Воздушная линия электропередачи представляет собой подвешенные на изоляторах в открытом пространстве провода (проводники) неизменной длины, которые обладают постоянными значениями емкости (C), индуктивности (L) и активного сопротивления, распределенными вдоль длины провода. Если к середине проводника подключить источник постоянной электродвижущей силы (ЭДС), то его емкости зарядятся (рис. 1а).

При замыкании проводника начнет протекать ток разряда емкостей I , который имеет максимальное

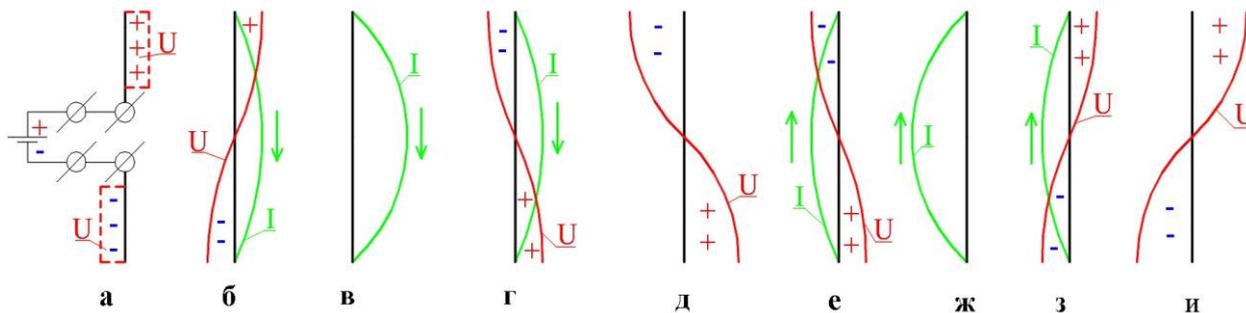


Рисунок 1. Колебания тока и напряжения в проводнике

значение в центре проводника и минимальное значение на его концах, так как величина емкости обратно пропорциональна расстоянию между обкладками конденсатора-проводника (рис. 1б). В индуктивностях проводника возникает ЭДС самоиндукции, из-за которой ток изменяется постепенно. На концах проводника возникают максимальные потенциалы, так как в их создании участвует большая часть индуктивности [2].

Когда ток течет к середине проводника, то потенциалы будут положительны, а от середины – отрицательны. После полного разряда емкостей ток достигает максимального значения, а электрическая энергия (за вычетом тепловых потерь на активном сопротивлении) преобразуется в энергию магнитного поля индуктивности (рис. 1в). Ток в индуктивностях провода течет в том же направлении (рис. 1г), и постепенно уменьшаясь до нуля, перезаряжает емкости (рис. 1д). Далее процесс протекает аналогично, в обратном направлении (рис. 1е – 1и).

Если пренебречь активным сопротивлением, то фазный провод можно рассматривать как колебательный L - C контур, состоящий из конденсатора и катушки индуктивности (рис. 2).

После заряда конденсатора, кратковременным включением ключа $K1$ и последующего включения ключа K он начнет разряжаться на катушку (рис. 2). Так как в катушке возникает ЭДС самоиндукции, ток в ней (i_k) и напряжение на конденсаторе (u_c) изменя-

ются постепенно. Когда конденсатор полностью разрядится, то энергия его электрического поля преобразуется в энергию магнитного поля катушки, а ток в катушке достигнет своего максимального значения I_{max} (рис. 2, $\omega t = 90^\circ$). Ток в катушке не может измениться скачком, и он плавно уменьшается, перезаряжая конденсатор. Когда ток снижается до нуля, то энергия магнитного поля катушки преобразуется в энергию электрического поля конденсатора (рис. 2, $\omega t = 180^\circ$). Напряжение на конденсаторе достигает максимальной величины U_{max} , но имеет противоположный знак, так как ток в катушке сохраняет свое направление. Затем процесс повторится, но в противоположном направлении. Таким образом, в контуре возникают свободные электрические колебания, создающие стоячие волны тока и напряжения [2], с длиной волны λ (рис. 2).

Аналогичные явления происходят и при генерации в фазные провода линии электропередачи высокочастотного синусоидального тока длиной волны λ от подключенного к линии внешнего генератора. В этом случае на каждом из отрезков провода длиной λ возникают вынужденные колебания и создаются стоячие волны тока и напряжения. Эти отрезки представляют собой «растянутые» в длину колебательные контуры, индуктивность и емкость которых определяются их длиной.

На рис. 3а представлена эквивалентная электри-

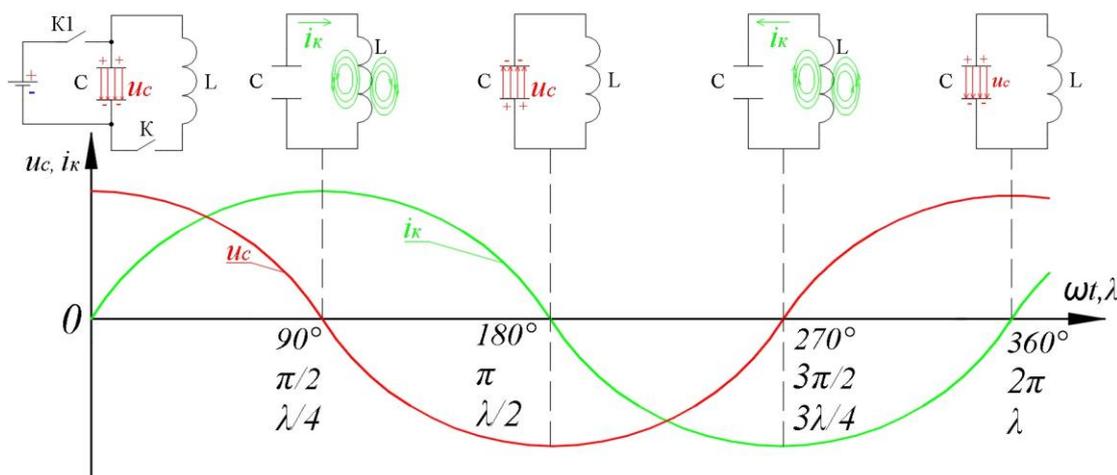


Рисунок 2. Свободные колебания тока и напряжения в L - C контуре

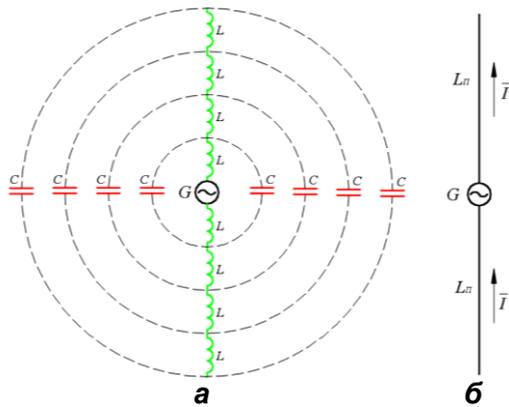


Рисунок 3. Схемы фазного провода линии электропередачи: а – эквивалентная электрическая; б – структурная

ческая схема фазного провода линии электропередачи [3], посередине которого подключен генератор тока высокой частоты G (рис. 3б), разделяющий его на два равных участка длиной L_{Π} .

Зная распределение стоячих волн тока и напряжения по проводнику, можно рассчитать его полное сопротивление генератору [4]:

$$Z_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} + jX_{\text{ВХ}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ВХ}}$ – активное сопротивление, Ом;
 $X_{\text{ВХ}}$ – реактивное сопротивление, Ом.

Активное $R_{\text{ВХ}}$ и реактивное $X_{\text{ВХ}}$ сопротивления провода току генератора зависят от его длины L_{Π} .

$$X_{\text{ВХ}} = \frac{U_{L_{\Pi}}}{I_{L_{\Pi}}}, \quad (2)$$

где $U_{L_{\Pi}}$ – величина стоячей волны напряжения, В;
 $I_{L_{\Pi}}$ – величина стоячей волны тока, А.

$$I_{L_{\Pi}} = I_{\text{max}} \cdot \sin \frac{2\pi L_{\Pi}}{\lambda}; \quad (3)$$

$$U_{L_{\Pi}} = U_{\text{max}} \cdot \cos \frac{2\pi L_{\Pi}}{\lambda}, \quad (4)$$

где I_{max} – максимальные (амплитудные) значения тока, А (рис. 2);

U_{max} – максимальные (амплитудные) значения напряжения, В (рис. 2).

При различных отношениях длины провода ЛЭП к длине волны генератора (L_{Π}/λ) и угловой частоте тока ω возникают различные сочетания активного (r_k), индуктивного (ωL) и емкостного ($1/\omega C$) реактивных сопротивлений, образующих последовательный и параллельный колебательные контуры, схемы замещения и векторные диаграммы для которых приведены на рисунках 4, 5.

Активное сопротивление провода высокочастотному току:

$$r_k = R_{\Sigma} + R_{\Pi}, \quad (5)$$

где R_{Σ} – активное сопротивление излучения провода, Ом;

R_{Π} – активное сопротивление тепловых потерь, Ом. Тепловые потери обуславливаются нагреванием, а сопротивление зависит от сечения, материала и длины провода:

$$R_{\Pi} = \rho \frac{L_{\Pi}}{S}, \quad (6)$$

где ρ – удельное активное сопротивление провода, Ом·мм²/м

L_{Π} – длина провода, м;

S – площадь поперечного сечения провода, мм²

Сопротивление излучения зависит от характера распределения тока в излучающем проводе и описы-

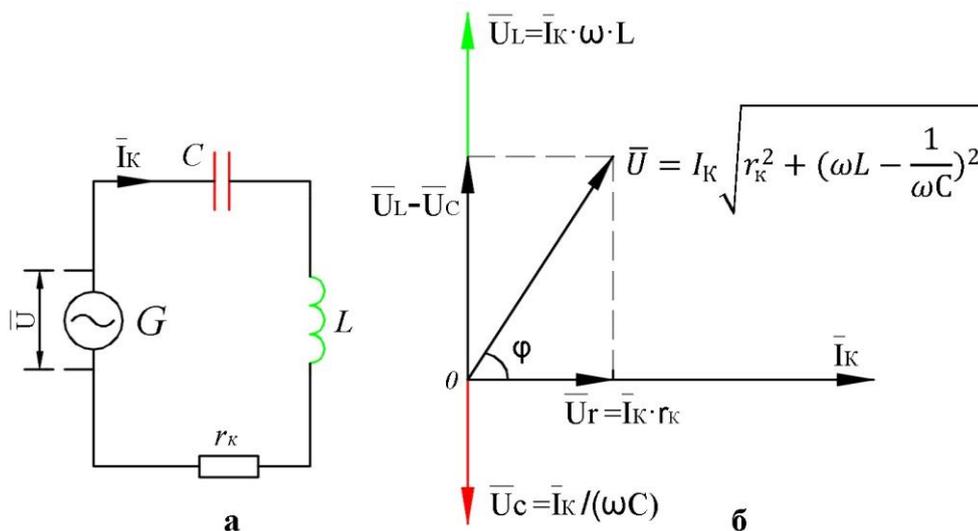


Рисунок 4. Последовательный колебательный контур при любых значениях L_{Π}/λ , кроме 0; 0,5; 1; 1,5; 2 и т. д.:

а – схема замещения; б – векторная диаграмма;

U_r, U_L, U_C – активная, индуктивная и емкостная составляющие напряжения;

I_k – ток высокочастотного генератора

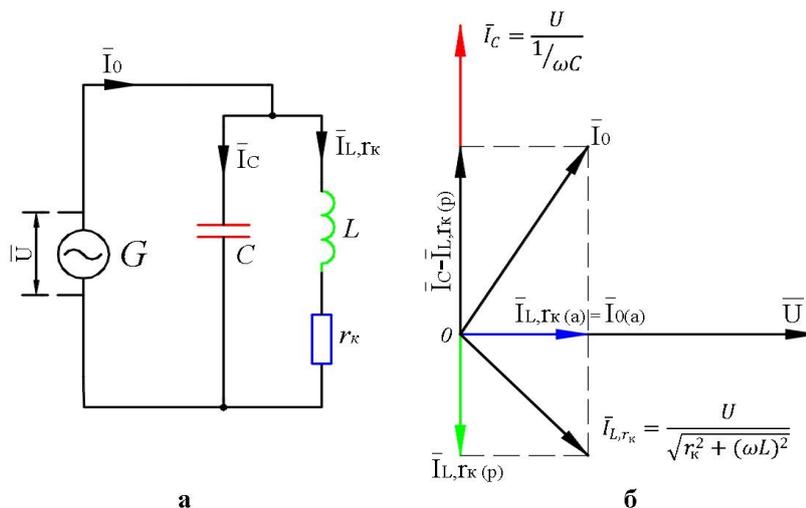


Рисунок 5. Параллельный колебательный контур при значениях L_{Π}/λ равных 0; 0,5; 1; 1,5; 2 и т. д.:
а – схема замещения; б – векторная диаграмма;

$I_0, I_{0(a)}$ – ток высокочастотного генератора и его активная составляющая;
 $I_C, I_{L,rk}$ – емкостная и активно-индуктивная составляющая тока

вается формулой [5]:

$$R_{\Sigma} = 30 \left[(si4kL_{\Pi} - 2si2kL_{\Pi}) \sin 2kL_{\Pi} + (c + lnkL_{\Pi} + ci4kL_{\Pi} - 2ci2kL_{\Pi}) \times \cos 2kL_{\Pi} + 2(c + ln2kL_{\Pi} - ci2kL_{\Pi}) \right], \quad (7)$$

где si – интегральный синус [6], о.е.;

ci – интегральный косинус [7], о.е.;

c – постоянная Эйлера, о.е.;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного пространства, рад/м.

На рисунке 6 представлена кривая изменения сопротивления излучения в зависимости от отношения длины провода L_{Π} к длине волны λ согласно [5].

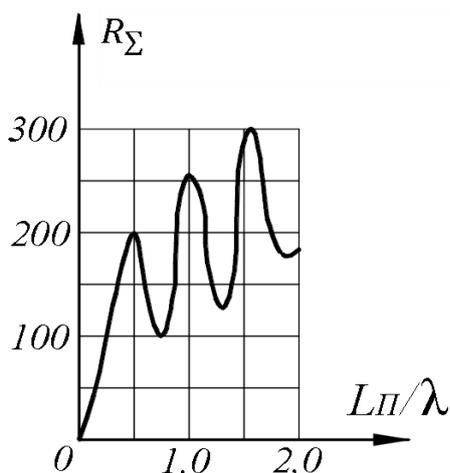


Рисунок 6. Характер изменения сопротивления излучения провода в зависимости от отношения его длины к длине волны

С изменением длины провода от нуля до $\lambda/2$ сопротивление излучения непрерывно возрастает. При длине провода $L_{\Pi} > \lambda/2$, когда в его длине укладывается одна целая полуволна и часть следующей, в проводе появляются участки, в которых направление токов противоположно направлению токов в крайних участках. Излучение этих участков ослабляет излучение крайних участков, и сопротивление излучения снижается. С ростом длины L_{Π} оно снова возрастает до $L_{\Pi} = \lambda$. При дальнейшем увеличении длины проводника чередуется убывание и возрастание сопротивления, причем его значение в максимумах и минимумах постепенно возрастает.

Входное сопротивление провода при значениях L_{Π}/λ 0,25; 0,75; 1,25 и т. д. соответствует резонансу в последовательном контуре, когда реактивная часть комплексного сопротивления контура компенсирована и равна нулю, а активная часть имеет минимальное значение (рис. 4). Тогда ток, протекающий через контур, имеет максимальное значение.

Активная мощность, потребляемая проводом в последовательном контуре:

– при питании максимальным током:

$$P_A = \frac{1}{2} I_{L_{\Pi}}^2 \cdot R_{\text{ВХ}}, \quad (8)$$

– при отсутствии реактивного сопротивления (резонанс напряжений):

$$P_A = \frac{1}{2} I_{\text{max}}^2 \cdot r_k, \quad (9)$$

Подставляя выражение (2) в (8) и приравнявая правые части (8) и (9), получим:

$$\frac{1}{2} I_{\text{max}}^2 \cdot \sin^2 \frac{2\pi L_{\Pi}}{\lambda} \cdot R_{\text{ВХ}} = \frac{1}{2} I_{\text{max}}^2 \cdot r_k. \quad (10)$$

Откуда

$$R_{BX} = \frac{r_k}{\sin^2 \frac{2\pi L_{II}}{\lambda}} \quad (11)$$

Входное сопротивление провода при значениях L_{II}/λ равных 0; 0,5; 1; 1,5; 2 соответствует резонансу в параллельном контуре (рис. 5), когда реактивное сопротивление контура равно нулю, а активное сопротивление имеет максимальное значение. Тогда ток, протекающий через контур, имеет минимальное значение.

Активная мощность, потребляемая проводом в параллельном контуре:

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\max}^2}{R_{BX}} \quad (12)$$

Приравнивая правые части выражений (9) и (12), получим:

$$\frac{1}{2} I_{\max}^2 \cdot r_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\max}^2}{R_{BX}}, \quad (13)$$

и учитывая, что отношение максимальных значений напряжения и тока представляет собой волновое сопротивление Z_{0A} [8], получим:

$$R_{BX} = \frac{Z_{0A}^2}{r_k}, \quad (14)$$

где Z_{0A} – волновое сопротивление, Ом.

В реальной ЛЭП контуры, образованные емкостью и индуктивностью, не являются идеальными из-за наличия возрастающих с длиной провода тепловых потерь, потерь в проводящем слое земли и потерь на излучение [9]. Активная составляющая входного сопротивления при резонансе напряжений периодически снижается, а при резонансе токов возрастает с увеличением длины проводов. Реактивная составляющая входного сопротивления становится равной нулю вблизи значений L_{II}/λ равных 0,25; 0,75; 1,25; и т. д. Затем возрастает, а вблизи значений L_{II}/λ равных 0; 0,5; 1; 1,5; 2 и т. д. быстро падает до нуля, а затем возрастает, изменив свое значение на емкостное. С увеличением L_{II} величины максимумов R_{BX} и X_{BX} постепенно снижаются и становятся менее выраженными.

На рисунке 7 показаны величина и характер изменения реактивного и активного сопротивлений в зависимости от длины для реального провода.

Значение высокочастотного тока в проводе:

$$I_{BX} = \frac{2U_{BX}}{Z_{BX}}, \quad (15)$$

где U_{BX} – выходное напряжение идеального генератора, В;

2 – коэффициент, учитывающий уменьшение входного сопротивления провода в два раза при использовании проводящего слоя земли в качестве второго провода [10].

Следовательно, значения распределенных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений проводов влияют на величину входного сопротивления ЛЭП и значение генерируемого в нее высокочастотного тока, а максимальное значение высокочастотного тока возникает при резонансе напряжений, когда X_{BX} минимально.

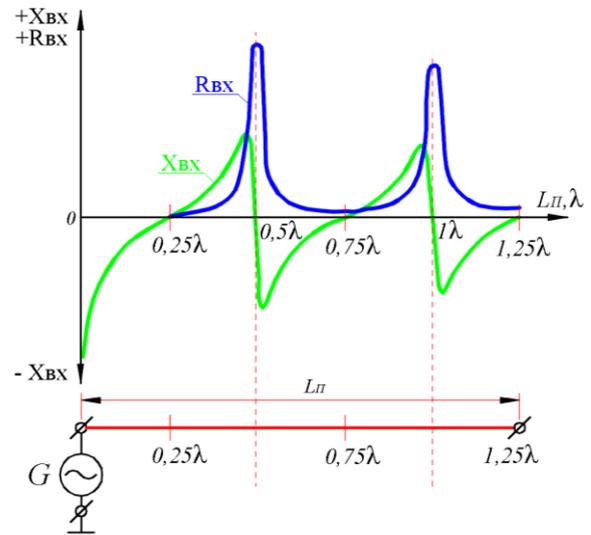


Рисунок 7. Зависимость активного и реактивного сопротивлений провода от его длины

стотного тока, а максимальное значение высокочастотного тока возникает при резонансе напряжений, когда X_{BX} минимально.

Заключение

1. При подключении к ЛЭП внешнего генератора высокочастотного синусоидального тока в проводах возникают вынужденные колебания и создаются стоячие волны тока и напряжения, параметры которых зависят от значений распределенных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений проводов.

2. Приближение к ЛЭП людей или проводящих предметов приведет к изменению распределенных индуктивностей и емкостей проводов, входного сопротивления и величины тока подключенного к ним высокочастотного генератора.

3. Изменение параметров высокочастотного тока можно использовать в качестве входного сигнала срабатывания терминалов релейной защиты для минимизации количества и последствий несчастных случаев, связанных с поражением людей электрическим током при их приближении к ЛЭП на недопустимое расстояние.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чака, И.Ю. Об использовании высокочастотного тока в терминалах релейной защиты линий электропередач / И.Ю. Чака, В.М. Збродыга // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16-17 октября 2024 г.: в 2 ч. / Белор. гос. аграрн. техн. ун-т; редкол.: Н.Н. Романюк (науч. ред.) [и др.] . – Минск: БГАТУ, 2024. – Ч. 1. – С. 263-265.

2. Гвоздев, Н.И. Электромагнитные волны и антенны / Н.И. Гвоздев – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 320 с.

3. Игнатъев, Н.П. Антенны и радиоволновые устройства / Н.П. Игнатъев. – М.: Высшая школа, 2010. – 350 с.

4. Маслов, К.А. Стоячие волны в радиотехнике / К.А. Маслов. – М.: Радио и связь, 2003. – 190 с.

5. Кочетков, А.В. Радиосистемы и антенны / А.В. Кочетков. – Казань: Казанский университет, 2015. – 290 с.

6. Лебедев, И.М. Теория антенн / И.М. Лебедев. – М.: Современные технологии, 2012. – 218 с.

7. Петросян, Н.С. Специальные функции: учеб. пособие / Н.С. Петросян. – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 88 с.

8. Петров, А.И. Антенны и их параметры / А.И. Петров. – М.: Энергия, 2017. – 330 с.

9. Сергеева, Н.В. Основы распространения радиоволн / Н.В. Сергеева. – М.: ИНФОРМАЦИЯ, 2019. – 180 с.

10. Тихонов, А.Н. Радиоволны и их технологии / А.Н. Тихонов. – М.: Высшая школа, 2014. – 240 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.02.2025

УДК 697.273

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-13-17>

МОДУЛЬНАЯ ИНФРАКРАСНАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОРПУСОВ

Е.С. Шмелев,

Ученый секретарь Института энергетики НАН Беларуси, канд. техн. наук

А.П. Ахрамович,

ведущ. науч. сотр. Института энергетики НАН Беларуси, канд. техн. наук

К.В. Гаркуша,

ст. преподаватель каф. энергетики БГАТУ

В статье рассмотрена модульная инфракрасная система отопления крупногабаритных производственных корпусов и показаны ее преимущества. Описаны структура и функционирование инфракрасного модуля. Приведены основные положения управления тепловыми условиями.

Ключевые слова: электрические высокотемпературные излучатели, отражатель с кусочно-непрерывным профилем поверхности, инфракрасный обогрев, модульная система отопления, тепловая модель, управление, энергоэффективность.

The article considers a modular infrared heating system for large-sized buildings and presents its advantages. The structure and functioning of the infrared module are described. The basic provisions of thermal conditions control are given.

Key words: electric high temperature emitters, reflector with a piecewise continuous surface profile, infrared heating, modular heating system, thermal model, regulation, energy efficiency.

Введение

Сельскохозяйственное машиностроение является одной из ведущих отраслей экономики Республики Беларусь. Производство тракторов, комбайнов, навесной и прицепной техники обеспечивает не только внутренние потребности, но и вносит значительный вклад в экспортный потенциал государства. Сохранение и укрепление конкурентоспособности продукции требуют постоянного обновления, модернизации производства, внедрения инновационных технологий. Для эффективной работы современного оборудования необходимо жесткое соблюдение технологического регламента, в том числе строгое поддержание требуемых микроклиматических параметров. Учитывая, что изготовление крупногабаритных изделий производится в цехах площадью в тысячи квадратных метров и с высотой пролетов свыше де-

вяти метров, то эта задача является сложной. Традиционно обогрев таких цехов осуществляется воздушной отопительной системой, совмещенной с вентиляцией. Выход нагретого воздуха производится над рабочей зоной, в результате чего значительная часть тепла уносится в верхнюю область цеха. Большой расход энергии сказывается и на себестоимости продукции.

Альтернативный (инфракрасный) способ отопления использует радиационный механизм переноса энергии. В этом случае обогревается не весь объем помещения, а только облучаемые объекты, что резко сокращает расход энергии. Преимущества данного способа неоднократно доказывались и теоретически, и на практике [1-5].

Вопросам лучистого обогрева посвящены работы Ф.А. Миссенара, А.И. Богомолова, А. Мачкаши, А.К. Родина, Н.Н. Болотских и других.

Применение электрических излучателей придает дополнительные положительные качества инфракрасным системам – гигиеничность, экологичность, гибкость управления (регулирования), простота монтажа, четкий контроль и учет расхода энергии. Это направление в отоплении начало активно развиваться в Беларуси в начале двухтысячных годов (от обогрева отдельных производственных участков – к проектированию систем для цехов) [6, 7]. Несмотря на значительную экономию энергии при использовании электрических инфракрасных систем, особенно заметную в производственных крупногабаритных корпусах (почти в два раза в пересчете на условное топливо), они не нашли к настоящему времени должного применения. Одной из причин этого является индивидуальная разработка системы для каждого объекта.

Производственные корпуса предприятий машиностроения, в том числе и сельскохозяйственного, построены в основном в прошлом веке в соответствии с технологическими нормами проектирования. В этих документах регламентированы размеры зданий – сетка колонн, высота, площади цехов. Такой подход допускает стандартизацию строительных конструкций, а для систем инфракрасного отопления позволяет применить блочный принцип (модульность системы), который упрощает и процесс проектирования. Он дает возможность выбора типовых модулей и компоновки из них системы лучистого обогрева.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процессов теплообмена при использовании модульной электрической инфракрасной системы отопления для крупногабаритных производственных корпусов.

Основная часть

Инфракрасный модуль предназначен для обогрева участка цеха. Он содержит комплект электрических инфракрасных излучателей, систему автоматического управления, кабельную продукцию и коммутационную аппаратуру. Наличие кран-балок в производственных цехах крупногабаритных корпусов ограничивает размещение инфракрасных излучателей, позволяя устанавливать их только в местах, где они не будут препятствовать передвижениям талей. В связи с этим наиболее подходящими излучателями будут высокотемпературные, у которых температура излучающей поверхности достигает $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше, а удельный лучистый поток порядка $104\text{--}105\text{ Вт/м}^2$ [8, 9]. Благодаря этому они оказывают тепловое воздействие на рабочую зону даже при большой высоте подвеса.

Излучатель представляет собой прямоугольный короб, внутри которого расположены трубчатые электронагреватели (ТЭНы) и отражатель из металлического полированного листа. Распределение лучистого потока в пространстве зависит от геометрической формы поверхности отражателя. Анализ конструкций рефлекторов лучистой энергии [10, 11] показал, что относительно простым и в то же время допускающим возможность получить нужное распре-

ление потока по облучаемой площади, является отражатель с кусочно-непрерывным профилем поверхности, представляющий собой две пересекающиеся под углом пластины. Варьируя углом раскрытия отражателя, можно управлять потоком, т.е. сделать его узконаправленным или, наоборот, расходящимся.

С увеличением высоты подвеса расширяется площадь радиационного воздействия и уменьшается величина удельной плотности падающего на облучаемую поверхность лучистого потока. Также увеличивается длина пробега лучей и, соответственно, экстинкция излучения. В данных условиях инфракрасный модуль обеспечения микроклимата целесообразно выполнять с двумя секциями излучателей: верхней (излучатели расположены на высоте колонн и обеспечивают, так называемую, «фоновую температуру») и нижней, поддерживающей требуемые тепловые условия (излучатели расположены на стенах или на специальных конструкциях над рабочей зоной, в тех местах, где они не будут препятствовать перемещению деталей и узлов изготавливаемых агрегатов).

Система управления включает датчики температуры, блок обработки данных от датчиков и выдачи сигнала на исполнительное устройство, линии передачи данных.

Тепловая модель. К настоящему времени существуют разнообразные подходы к математическому моделированию теплового режима здания (помещения). Усложнение математической модели требует увеличения размерности задачи и зачастую приводит к необходимости больших машинных ресурсов для ее решения. Упрощенная физическая модель более эффективна для разработки алгоритма управления обогревом, чем сложная модель с детальным учетом всех тепловых процессов. Таким образом, основное внимание сосредоточим на доминирующих факторах воздействия и используем простые балансные соотношения энергии как, например, в работах [12–14].

Участок цеха, обогреваемый инфракрасным модулем, представим в виде прямоугольного параллелепипеда, со всех сторон ограниченного ограждающими конструкциями (наружными или внутренними), через которые передается тепло. При отсутствии ограждения с какой-либо стороны, теплообмен с соседними участками происходит за счет конвекции воздуха.

На участке расположено технологическое оборудование, выделяющее тепло при работе станков, величина которого зависит от мощности установленных электродвигателей. Вентиляция может быть совмещена с отоплением. В этом случае обогрев производится совместно инфракрасной и воздушной системами отопления. При этом выходная температура вентиляционного воздуха может быть снижена по сравнению с чисто воздушным отоплением.

Разделим условно рассматриваемый участок по высоте на две области: нижнюю (рабочая зона высотой H_w) и верхнюю (над рабочей зоной до уровня подвеса излучателей).

Запишем уравнения сохранения энергии для воздуха, обозначив параметры, относящиеся к этим об-

ластям, индексами: «w» – для нижней и «u» – для верхней. При этом не учитываем радиационный теплообмен между поверхностями оборудования и ограждений в силу доминирования лучистых потоков от инфракрасных излучателей, а также теплообмен с примыкающими участками, приняв, что тепловые условия одинаковы.

Уравнения сохранения энергии для воздуха:

$$\frac{dT_{u,w}}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_{u,w}} \sum_{i=1}^8 (q_i)_{u,w}, \quad (1)$$

где T – температура воздуха, К;

τ – время, с;

C – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

V – объем воздуха, м³;

q_i – мощность притоков или стоков тепла, Вт (индекс i обозначает объект, участвующий в теплообмене: 1, 2 – верхняя и нижняя секции излучателей; 3 – вентиляция; 4 – технологическое оборудование; 5 – боковые ограждения; 6 – перекрытие; 7 – пол; 8 – теплообмен между верхней и нижней областями).

Теплопередачу через ограждения опишем одномерными нестационарными уравнениями теплопроводности с граничными условиями третьего рода, в которых учтен и тепловой поток от инфракрасных излучателей. Теплообмен между воздухом и поверхностями оборудования подчиняется закону Ньютона-Рихмана. Падающий на них лучистый поток учитывается как внутреннее тепловыделение, добавляемое к тепловыделению от работающих электродвигателей. Теплообмен между верхней и нижней областями происходит вследствие естественной конвекции воздуха из-за различия плотностей. Приняв широко распространенное в задачах теплообмена в помещениях приближение Буссинеска (зависимость плотности воздуха только от температуры) и учитывая, что при инфракрасном обогреве изменение температуры воздуха по высоте верхней области составляет 0,15-0,25 К/м (примерно в 10 раз меньше, чем при воздушном отоплении [15]), можно считать, что тепловой поток между областями является линейной функцией разности температур воздуха в верхней и нижней областях: $q_8 = K_{uw}(T_w - T_u)$, в которой коэффициент пропорциональности K_{uw} зависит от градиента температуры, размеров участка и заполненности его оборудованием.

В систему уравнений тепловой модели, помимо уравнения сохранения энергии для воздуха, включим аналогичные уравнения для технологического оборудования и пола. Теплотери через пол значительно меньше, чем через боковые ограждения, поэтому ими пренебрежем.

Для решения системы уравнений к граничным условиям третьего рода дополнительно задаются начальные условия (температура воздуха в обеих областях, оборудования, пола, и ограждений) и распределение лучистого потока.

В результате система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{dT_u}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_u} [q_1\varepsilon_{1u} + q_3\varepsilon_{3u} + (\alpha F)_{5u} \times (T_{5u}^{in} T_u) + (\alpha F)_{6u} (T_{6u}^{in} T_u) + K_{uw} (T_w T_u)]; \quad (2)$$

$$\frac{dT_w}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_w} [q_1\varepsilon_{1w} + q_2\varepsilon_{2w} + q_3\varepsilon_{3w} + (\alpha F)_{4w} (T_4 - T_w) + (\alpha F)_{5w} (T_{5w}^{in} - T_w) + \alpha_{7w} F_7 (T_7 - T_w) - K_{uw} (T_w T_u)]; \quad (3)$$

$$\frac{dT_4}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_4} [q_4 + q_1\varepsilon_{4u} + q_2\varepsilon_{4w} - (\alpha F)_{4w} (T_4 - T_w)]; \quad (4)$$

$$\frac{dT_7}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_7} [q_1\varepsilon_{7u} + q_2\varepsilon_{7w} + (\alpha F)_7 (T_7 - T_w)]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial(T_i)_{u,w}}{\partial\tau} - (a_i)_{u,w} \frac{\partial^2(T_i)_{u,w}}{\partial(y_i)_{u,w}^2} = 0; \quad (6)$$

$$-(\lambda_i)_{u,w} \frac{\partial(T_i)_{u,w}}{\partial(y_i)_{u,w}} \Big|_{(y_i)_{u,w}=0} = q_1 \frac{(\varepsilon_i)_{u,w}}{(F_i)_{u,w}} + q \frac{(\varepsilon_i)_{u,w}}{(F_i)_{u,w}} + (\alpha_i)_{u,w} (T_{u,w} - (T_i^{in})_{u,w}) \Big|_{(y_i)_{u,w}=0}; \quad (7)$$

$$-(\lambda_i)_{u,w} \frac{\partial(T_i)_{u,w}}{\partial(y_i)_{u,w}} \Big|_{(y_i)_{u,w}=(\Delta_i)_{u,w}} = \alpha_{out} \times \left[\left((T_i^{out})_{u,w} \right) \Big|_{(y_i)_{u,w}=(\Delta_i)_{u,w}} - T_{out} \right], \quad (8)$$

$i = 5, 6$

где α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К);

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

F – площадь поверхности теплообмена, м²;

T_{out} – температура наружного воздуха, К;

λ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К);

Δ , y – полная толщина ограждения и текущая, отсчитываемая от внутренней поверхности, м.

Коэффициенты $(\varepsilon_i)_{u,w}$ обозначают долю энергии от инфракрасных излучателей и вентиляции, приходящуюся на i -й объект, участвующий в теплообмене. Нагрев воздуха при прохождении лучистого потока происходит в результате его поглощения.

Тепловая модель позволяет найти закономерности изменения мощности инфракрасного модуля, обеспечивающего заданную температуру при наличии возмущающих факторов. При этом возможна оптимизация его работы за счет наложения дополнительных условий, например минимизации потребления электроэнергии или денежных затрат на обогрев.

Управление инфракрасным модулем. Алгоритм управления инфракрасным модулем должен учитывать организацию работ на участке и поддержание

тепловой обстановки в соответствии со строительными, санитарными и технологическими нормами.

Производственный участок функционирует в двух режимах: рабочем, во время которого происходит производственный процесс, и дежурном, когда работы не производятся. При программировании управления инфракрасным модулем на большой срок следует учитывать также выходные и праздничные дни. В дежурном режиме вентиляция отключена и поддержание нормированной температуры воздуха (не ниже 5 °С) [16] производится только верхней секцией инфракрасных излучателей.

Установленная мощность инфракрасного модуля должна быть достаточной, чтобы обеспечить нормируемые температуры в рабочей зоне при расчетной температуре наружного воздуха [17].

Высокотемпературные инфракрасные излучатели характеризуются ограниченной возможностью изменения мощности. Уменьшение даже на треть от номинальной резко снижает эффективность излучателя, как генератора лучистой энергии. Таким образом, для этих аппаратов целесообразен прерывистый режим работы.

Используемые в инфракрасном модуле высокотемпературные излучатели имеют по три нагревательных элемента (ТЭНа), которые могут объединяться в группы по несколько элементов. Одним из вариантов является разделение всех ТЭНов на три группы, каждая из которых содержит по одному элементу каждого излучателя. Поддержание нормируемых тепловых условий производится следующим образом: показания температуры в контрольных точках передаются в расчетный блок, где происходит их обработка и сравнение с заданными значениями, затем выдается команда на включение или выключение групп ТЭНов.

Перед началом рабочей смены осуществляется «натоп» производственного участка. В нашем случае это означает включение верхней секции излучателей на полную мощность, а при необходимости, подключение и нижней секции. В начале рабочей смены начинает работать технологическое оборудование и система вентиляции, которые приносят тепловую энергию, позволяя снизить мощность секций инфракрасных излучателей.

Система управления должна иметь возможность адаптации под конкретные условия – корректировки параметров регулятора в зависимости от изменения характеристик объекта управления.

Заключение

Ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС предоставил возможность широкомасштабного внедрения инновационных электротехнологий.

Предложенное направление разработки инфракрасных систем отопления крупногабаритных производственных корпусов (переход на модульную систему) допускает стандартизацию и серийное изготовление оборудования. Это ведет к упрощению процесса их проектирования и снижению стоимости.

Работы по созданию инфракрасных модульных систем отопления с электрическими излучателями будут

способствовать внедрению эффективного метода отопления на предприятиях и решению вопроса наращивания рационального потребления электроэнергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Миссенар, Ф.А. Лучистое отопление и охлаждение / Ф.А. Миссенар. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 299 с.
2. Богомолов, А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение / А.И. Богомолов, Д.Я. Вигдорчик, М.А. Маевский. – М.: Стройиздат, 1967. – 254 с.
3. Мачкаши, А. Лучистое отопление / А. Мачкаши, Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1985. – 464 с.
4. Родин, А.К. Газовое лучистое отопление / А.К. Родин. – Л.: Недра, 1987. – 191 с.
5. Болотских, Н.Н. Инфракрасное отопление производственных помещений / Н.Н. Болотских // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 4. – С. 27-32.
6. Ахрамович, А.П. Об эффективности использования электрических ИК-систем в цехах машиностроительных предприятий / А.П. Ахрамович, Г.М. Дмитриев, В.П. Колос // Энергоэффективность. – 2013. – № 6. – С. 22-23.
7. Ахрамович, А.П. Оптимизация систем инфракрасного обогрева производственных цехов / А.П. Ахрамович, Г.М. Дмитриев, В.П. Колос // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 77-80.
8. Лепеш, Г.В. Способ энергоэффективного обогрева вентилируемых помещений / Г.В. Лепеш, Т.В. Потемкина // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2014. – № 4 (30). – С. 42-54.
9. Ахрамович, А.П. Развитие инфракрасного электрообогрева в Республике Беларусь / А.П. Ахрамович, Е.С. Шмелев // Энергоэффективность. – 2021. – № 9. – С. 30-32.
10. Расчет пространственного распределения энергии сложного излучателя / И.Е. Евдокимов [и др.] // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2013. – № 1 (39). – С. 214-220.
11. Иванникова, Н.В. Геометрические модели, алгоритмы проектирования и поиска эффективных параметров рефлекторов технологического назначения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.01.01/ Иванникова Наталия Владимировна; Омский гос. технический университет. – Омск, 2017. – 114 с.
12. Строй, А.Ф. Управление тепловым режимом зданий и сооружений / А.Ф. Строй. – Киев: Вища школа, 1993. – 154 с.
13. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
14. Нагорная, А.Н. Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового ре-

жима зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Нагорная А.Н.; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2008. – 148 с.

15. Сканави, А.Н. Конструирование и расчет водяного и воздушного отопления зданий / А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1983. – 304 с.

16. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СН 4.02.03-2019. – Минск: Мин-во строительства и архитектуры Респ. Беларусь, 2020. – 68 с.

17. Строительная климатология. Изменение № 1: СНБ 2.04.02-2000. – Минск: Мин-во строительства и архитектуры Респ. Беларусь, 2007. – 33 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 18.12.2024

УДК 66.087.5:628.3:681.3

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-17-24>

МЕХАНИЗМ КОАГУЛЯЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ 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

В статье рассмотрен механизм коагуляции коллоидных частиц загрязнений в сточных водах наружной мойки сельскохозяйственной техники. Определены режимы электрообработки. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: коллоидные дисперсии, коагуляция, гидроксид железа, двойной электрический слой, мицелла, потенциалопределяющие ионы, противоионы, дзета-потенциал.

The article considers the mechanism of coagulation of colloidal particles of pollutants in wastewater of external washing of agricultural machinery. The modes of electrical treatment are determined, and the results of experimental studies are given.

Key words: colloidal dispersions, coagulation, iron hydroxide, double electric layer, micelle, potential-determining ions, counterions, zeta potential.

Введение

В соответствии с санитарными нормами [1] на территории машинного двора должен предусматриваться участок мойки транспорта (открытая или закрытая мойка с отстойниками для предварительной очистки стоков). После первичного отстойника и удаления всплывших нефтепродуктов, сточные воды наружной мойки сельскохозяйственной техники представляют собой дисперсную систему, содержащую в себе суспензии, коллоидные частицы различной химической природы и размеров. В стоках наружной мойки присутствуют почвенно-растительные примеси и различные топливно-смазочные фракции. В зависимости от выполняемых работ могут появляться включения минеральных и органических удобрений, патогенных организмов. Отведение таких стоков в канализацию или на рельеф допустимо только после их очистки. Анализ существующей практики очистки подобных стоков показал целесообразность применения электрохимической коагуляции загрязнений, их окисления и обеззараживания. В процессе электрохимической очистки про-

исходит удаление взвешенных веществ, нефтепродуктов, а также других загрязнений до показателей, предусмотренных в источниках [2, 3]. Очищенная вода может использоваться в оборотных системах водоснабжения моек. При использовании очищенных стоков в открытых системах технического водоснабжения не только достигается их эпидемиологическая безопасность, соответствие требованиям моечных устройств по качеству воды, а также обеспечиваются ее безвредность по химическому составу и благоприятные органолептические свойства.

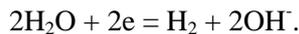
Известна теория устойчивости и коагуляции дисперсных систем Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (теория ДЛФО). Проблеме очистки и обеззараживания сточных вод различных производств посвящены работы В.Я. Баранова, О.Р. Каратаева, И.А. Нечаева, Т.А. Савицкой, О.В. Смирнова, Л.И. Соколова, Р. Ногг (Р. Хогга), Р. К. Holt (П.К. Холта), О.С. Хрипуновой и других [4-12].

Целью данной работы является снижение концентрации загрязнений сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники до допустимых пока-

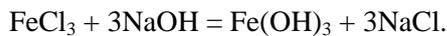
зателей качества для использования в системе оборотного водоснабжения путем воздействия на стоки электромагнитных полей.

Основная часть

Электрохимическая очистка сточных вод предполагает их электролиз и разложение стального анода, в результате чего образуется хлорное железо FeCl_3 , а на катоде при электролизе происходит разложение воды с накоплением едкого натра NaOH или едкого калия KOH и выделение пузырьков газообразного водорода:



Далее происходит реакция между FeCl_3 и щелочью, например:



Полученный таким образом тригидроксид железа является хорошим коагулянтom и сорбентом углеводородных частиц дисперсной фазы сточных вод. Применение железных электродов имеет свои преимущества по сравнению с электродами из алюминия, так как они дешевле. Соли железа, как коагулянты, имеют ряд преимуществ по сравнению с солями алюминия. Их действие лучше при низких температурах и применимы более широкие пределы оптимальных значений pH среды. Опыты показали, что хлопья гидроксида железа обладают большей прочностью, стабильны при наличии в стоках разнообразного солевого состава и более эффективно устраняют запахи, обусловленные присутствием нефтепродуктов, сероводорода. Кроме того, адсорбируя загрязнения, золь гидроксида железа (Ш) обладает магнитными свойствами, что позволяет применить электромагнитное поле для управления движением агрегатных частиц и для интенсификации их удаления. Следует отметить также, что для разложения стального анода требуется почти в два раза меньше электроэнергии, чем алюминиевого [4], что подтверждено и нашими опытами (в 1,5 раза).

Механизм коагуляции загрязнений, согласно теории ДЛФО, состоит в следующем. На поверхности эмульгированных частиц нефтепродуктов и других взвешенных частиц загрязнений формируется (в соответствии с правилом Кена) отрицательно заряженный электростатический слой. Одноименно заряженные частицы загрязнений отталкиваются друг от друга. При подаче напряжения на электроды под воздействием внешнего электрического поля происходит разложение анода, и в процессе электрохимических реакций – образование коагулянта (гидроксида трехвалентного железа). Для того чтобы началась коагуляция загрязнений необходимо нарушить устойчивость дисперсной системы, преодолеть энергетический барьер, создаваемый двойным электрическим слоем (ДЭС) мицелл. Строение мицеллы коагулянта (золь гидроксида железа) приведено на рисунке

1а. Схематически строение этой мицеллы изображают следующим образом:



где m – количество частиц, входящих в состав ядра;
 n – количество потенциалопределяющих ионов (ПОИ);

$(n-x)$ – количество противоионов (ПИ) адсорбционного слоя;

x – количество противоионов диффузионного слоя [6, 7].

ДЭС мицеллы гидроксида железа препятствует процессу коагуляции.

Величину электростатических сил отталкивания, т.е. устойчивость коллоидного раствора, характеризует дзета-потенциал (ξ – потенциал). У нейтральной мицеллы необходимо разрушить поверхность диффузионного слоя. С увеличением концентрации золь гидроксида железа диффузионный слой его мицелл сжимается, часть противоионов переходит из него в адсорбционный слой, и ξ – потенциал коллоидной частицы снижается с 60-30 мВ до нуля, если все противоионы перейдут из диффузионного слоя в адсорбционный [7] (рис. 1б). Под воздействием сил электрического поля происходит разделение мицеллы на коллоидную частицу дисперсной фазы и ионы дисперсной среды. Заряженные отрицательно гранулы дисперсной фазы (например, эмульсии нефтепродуктов) будут перемещаться к аноду, а противоионы диффузионного слоя, заряженные положительно – к катоду. Одновременно положительно заряженные гранулы гидроксида железа устремляются к катоду, а противоионы его мицеллы – к аноду (рис. 2). В этом случае имеет место электрофорез частиц, в процессе которого происходит слипание тех из них, которые имеют разноименные заряды, движущиеся навстречу друг другу.

Следует заметить, что при коагуляции наблюдается еще явление поляризации загрязнений (неполярных коллоидных частиц) под воздействием электрического поля и полярных молекул воды. В результате этого у коллоидных частиц возрастают силы Ван-дер-Ваальса (силы межмолекулярного притяжения), образуются диполи [6; 8; 12]. Согласно теории диполь-дипольного взаимодействия, диполи полярной молекулы индуцируют образование противоположных концов в неполярных молекулах, что приводит к эффекту их ориентации. В неполярной молекуле (эмульсия масла) возникает индуцированный электрический момент p_i , создаваемый полярными молекулами дисперсной среды и усиленный неоднородным электрическим полем. Дипольный момент масляной частицы (рис. 3):

$$\vec{p}_i = ql,$$

где q – заряд диполя, Кл;

l – плечо диполя, м.

Вектор поляризации диполя \vec{P} , Кл/м²:

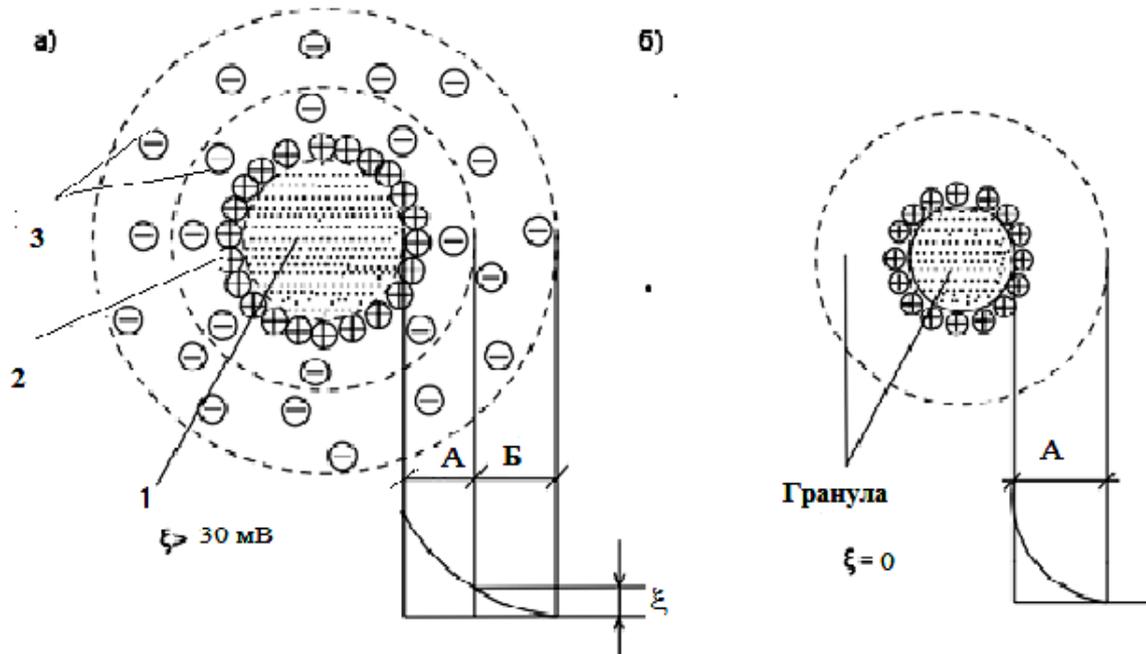


Рисунок 1. Структура мицеллы тригидроксида железа (а) и его гранулы после разрыва поверхности скольжения (б): А – адсорбционный слой; Б – диффузионный слой; 1 – ядро; 2 – потенциалоопределяющие ионы; 3 – противоионы

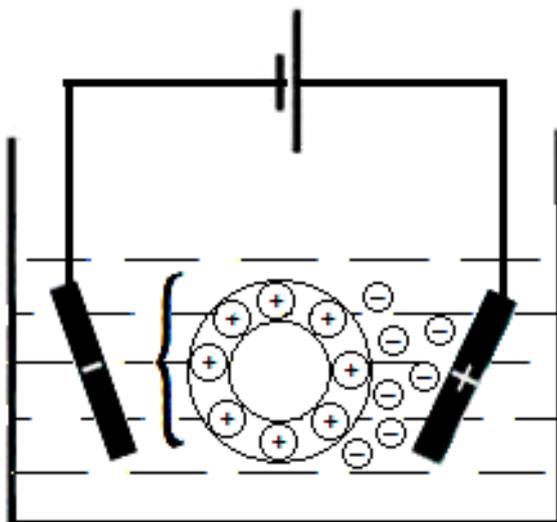


Рисунок 2. Иллюстрация разрушения диффузионного слоя мицеллы гидроксида железа и явления электрофореза

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} = \frac{\sum_i p_{li}}{\Delta V} = \frac{N p_{li}}{\Delta V} = n p_{li},$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость эмульсии нефтепродукта;

ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м;

\vec{E} – вектор напряженности электрического поля, В/м;

N – число молекул в объеме ΔV , n – концентрация молекул.

Число частиц загрязнений определяют с учетом их исходной концентрации, гранулометрического состава, удельной плотности загрязнений.

Под действием вектора напряженности электрического поля \vec{E} и силы \vec{F} диполь поворачивается (рис. 3) $\vec{F} = q\vec{E}$. В неоднородном электрическом поле силы неравны по величине ($\vec{F}_+ \neq \vec{F}_-$). Они создают результирующую силу $\vec{F} = \vec{F}_+ + \vec{F}_-$, которая приводит диполь в поступательно-вращательное движение. Электрический момент диполя (его вектор \vec{p}_l) $|\vec{p}_l| = ql$, а момент сил: $M = FL = Fl \sin \alpha = qEl \sin \alpha$,

где $\vec{E}, \vec{E}_1, \vec{E}_2$ – векторы напряженности неоднородного электрического поля результирующего и в точках расположения, соответственно, положительного и отрицательного зарядов диполя, В/м;

$\vec{F}, \vec{F}_+, \vec{F}_-$ – векторы силы результирующей и действующие на положительный и отрицательный заряды диполя, Н;

l – плечо диполя, м;

L – плечо момента силы, м;

α – угол между осью диполя и горизонталью.

Вектор результирующей силы \vec{F} :

$$\vec{F} = -\text{grad} W_{\text{п}} = \text{grad}(p_l E \cos \alpha),$$

где $W_{\text{п}} = -p_l E \cos \alpha$ – потенциальная энергия диполя, Дж.

Изменение напряженности электрического поля вдоль плеча диполя взято вдоль направления вектора дипольного момента (от минуса к плюсу).

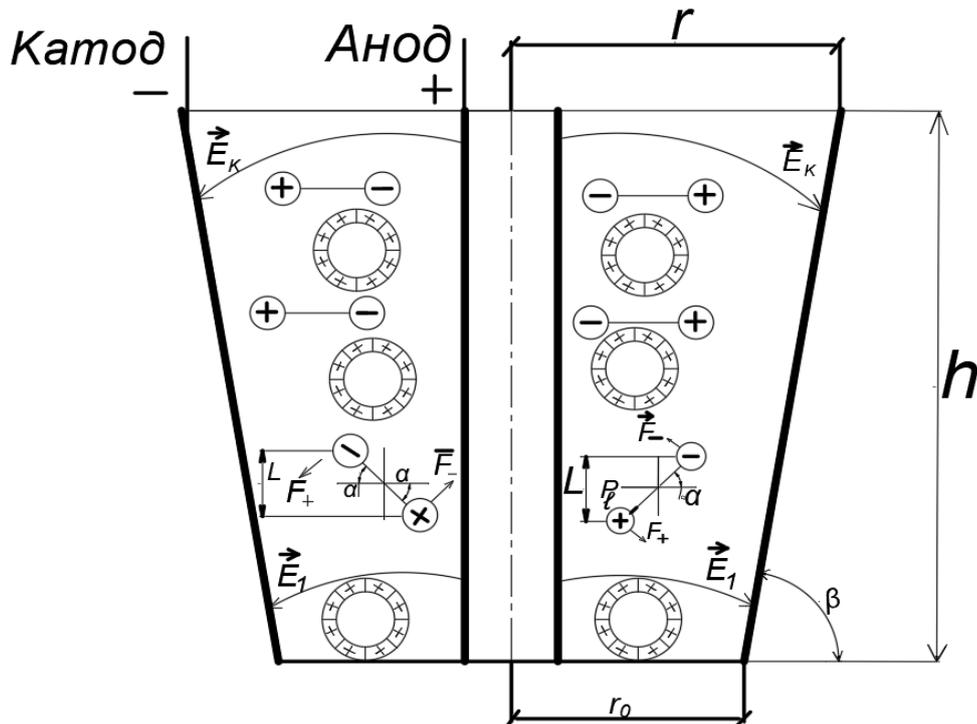


Рисунок 3. Схематичные процессы ориентации диполей и коагуляции загрязнений

Вращающий момент $\vec{M} = [\vec{p}_l \vec{E}]$ разворачивает диполь в направлении силовых линий вектора напряженности электрического поля \vec{E} . Поворот диполя происходит с одновременным его втягиванием в область более сильного поля, если $(\vec{F}_+ < \vec{F}_-)$. Если $(\vec{F}_+ > \vec{F}_-)$, то поворот диполя сопровождается его выталкиванием в область менее сильного поля (рис. 3). В нашем случае с ростом высоты конусной камеры электрокоагулятора напряженность электрического поля ослабевает.

В общем виде вектор силы, действующий на диполь частицы загрязнения: $\vec{F} = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q(\vec{E}_+ - \vec{E}_-) = ql \frac{d\vec{E}}{dl}$. Так как $|\vec{p}_l| = ql$, плечо диполя мало, тогда можно записать:

$$\vec{F} = \vec{p}_l \frac{d\vec{E}}{dl},$$

где $d\vec{E}/dl$ – изменение напряженности электрического поля на расстоянии dl , совпадающего с направлением дипольного момента \vec{p}_l ;

$d\vec{E}/dl$ – градиент вектора напряженности электрического поля.

Энергия взаимодействия между частицами, согласно теории ДФЛО, будет учитывать энергию электростатического отталкивания одноименно заряженных агрегатов и энергию межмолекулярного притяжения:

$$W = \frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 \Phi_\delta^2}{\lambda} e^{-\frac{a}{\lambda}} - \frac{A^*}{12\pi a^2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость дисперсной среды, Ф/м;

Φ_δ – потенциал на границе раздела адсорбционного и диффузионного слоев, В;

a – расстояние между частицами, м;

λ – толщина диффузионного слоя противоионов, м;

A^* – постоянная Гаммакера, 10^{-19} Дж.

В формуле (1) первое слагаемое есть энергия отталкивания, второе – энергия притяжения. При больших значениях Φ_δ потенциал не влияет на расклинивающее давление отталкивания, так как с ростом Φ_δ увеличивается притяжение противоионов ДЭС к электроду противоположного знака (рис. 2), заряд которого не изменяется [9].

Рассмотрим распределение электрического поля в объеме обрабатываемых стоков. Так как электроды и исследуемое электрическое поле имеют осевую симметрию, применим цилиндрическую систему координат и учтем, что в этом случае поле не зависит от полярного угла γ . Уравнение Лапласа $\Delta^2 \varphi = 0, (\vec{E} = -\text{grad}\varphi)$ примет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

В этом уравнении потенциал φ зависит от r и z ($z = h$). Используя метод разделения переменных, решение запишем в форме произведения двух функций $\varphi(r, z) = R(r)Z(z)$.

Подставив последнее выражение в уравнение (2) и разделив на RZ , получим:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{Rr} \frac{\partial R}{\partial r} = -\frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Левая часть уравнения (3) зависит от координаты r , а правая – от z . Для электрода круглого сечения линии равного потенциала являются окружностями с центром в начале координат, а поверхности равного потенциала – поверхностями круговых цилиндров. Если совместить с одной из этих поверхностей поверхность электрода круглого сечения с равномерно распределенным зарядом по его длине τ , то на поверхности электрода будет иметь место постоянство потенциала. Пусть функция $\omega = F(z)$ является комплексным потенциалом поля вне электрода. По аналогии с полем уединенного провода круглого сечения аналитическая функция

$$\omega = u + jv = A \ln z + \underline{C},$$

где A – вещественная величина, а $\underline{C} = C_1 + jC_2$.

Обозначив $z = re^{j\gamma}$ получим:

$$\omega = A \ln r + jA(\gamma) + C_1 + jC_2.$$

Тогда $u = A \ln r + C_1$, а $v = A(\gamma) + C_2$. Здесь уравнение линий напряженности электрического поля $v = \text{const}$ или $r = \text{const}$. Уравнение линий равного потенциала $u = \text{const}$ или $\gamma = \text{const}$.

Постоянные A и C_2 найдем из условий: $\varphi = C_2 = \varphi_1$ при $\gamma = 0$, $\varphi = A(\gamma) + C_2 = \varphi_2$, когда $\gamma = \beta$. Следовательно $A(\beta) = \varphi_2 - \varphi_1 = U$. Кроме того, $\ln r = 0$ и $C_1 = \varphi_1$ при $r = 1$.

Таким образом, с учетом рассматриваемой конфигурации электродов (рис. 3) будем иметь следующую зависимость напряженности электрического поля:

$$E = \left| \frac{dZ}{dz} \right| = \left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{z} \right| = \frac{U}{r_0 + h \operatorname{ctg} \beta},$$

где U – напряжение на электродах, В;

r_0 – радиус конуса в основании, м;

h – высота конуса, м;

β – угол наклона образующей конуса, град.

При напряжении на электродах 24 В $\beta = 76^\circ$, $r_0 = 0,4$ м, $h = 0,8$ м напряженность электрического поля изменяется от 80 до 48 В/м. Для расчетов принята средняя напряженность электрического поля 60 В/м.

К числу основных факторов, определяющих качество очистки при электрохимическом методе, относятся следующие: плотность тока на электродах, объем обрабатываемых сточных вод, материал и конструкция электродов и продолжительность обработки сточных вод. Задача состоит в обеспечении минимума электрической энергии для корректировки заряда частиц загрязнений, электрокоагуляции, электрофлотации, фокусировки удаляемого шлама и ограничения излишнего разложения анода электрокоагулятора.

Авторами были проведены экспериментальные исследования очистки модельных растворов на лабораторной установке, приведенной в источнике [13], с це-

лью определения показателей качества очистки. Электрохимическая очистка модельных стоков проводилась при пропускании через электрокоагулятор различных количеств электричества (от 900 до 2700 Кл и от 900 до 5400 Кл) при средних напряженностях электрического поля 60 ± 2 В/м, плотностях тока на аноде 100 ± 10 А/м². Исходная концентрация загрязнений соответствовала показателям, приведенным в источнике [2], и составляла не менее их средних значений: взвешенные вещества – $1300,0 \pm 65,0$ мг/дм³; нефтепродукты – $1840,3 \pm 18,4$ мг/дм³; сухой остаток – $1433,8 \pm 35,8$ мг/дм³; железо (суммарно) – $0,22 \pm 0,05$ мг/дм³; БПК_{полн} – $135,6 \pm 1,4$ мгО₂/дм³; ХПК – $273,1 \pm 14,2$ мгО₂/дм³.

Проводилось два опыта. Первый – с более продолжительной электрохимической очисткой модельных сточных вод без использования камеры электрофлотации (количество электричества в электрокоагуляторе 5400 Кл). Второй – в два раза менее продолжительный, но с одновременным использованием камеры электрофлотации (количество электричества в электрокоагуляторе 2700 Кл).

Методика исследований

Для проведения экспериментов по очистке сточных вод готовился модельный раствор в объеме 18-20 л. Получение эмульсии «масло в воде» проводилось методом диспергирования на устройстве фирмы ИКА (Германия), обеспечивающего перемешивание системы с регулируемой скоростью в соответствии с инструкцией к прибору. Для получения нужной концентрации нефтепродуктов в растворе проводилось взвешивание на лабораторных весах отработанного моторного масла и воды. Метод предполагает отдельное нагревание как водной, так и масляной фаз до температуры 70-75°C. Подогрев масляной фазы осуществляли в стеклянном стакане на водяной бане. Водная фаза подогревалась в пластмассовой емкости электрическим нагревателем типа ТЭН. Для повышения электропроводности модельного раствора в него добавляли водный раствор поваренной соли с концентрацией 1,2-1,5 г/дм³, стабилизатор (поверхностно-активное вещество – жидкое мыло – 1,5 мг/дм³) и частицы песка (2-2,3 г/дм³). Концентрация взвешенных механических частиц достигалась добавлением в модельный раствор просушенного измельченного на мельнице песка после его взвешивания. Смесь водного раствора и песка встряхивалась ручным способом с 3-кратным перерывом. Стакан с нагретой масляной фазой помещали в устройство для получения эмульсий и закрепляли в нем. Включали перемешивающее устройство (скорость вращения мешалки на этом этапе составляла 200-300 об/мин). Водную среду со взвешенными частицами песка добавляли к масляной фазе тонкой струей при постоянном перемешивании. Перемешивание осуществлялось до тех пор, пока температура смеси не понизилась до 60°C. Затем скорость вращения мешалки увеличивали до 1200 об/мин., продолжали перемешивание в течение 5 мин и проводили дальнейшее охлаждение полученной эмульсии до температуры 35-40°C при перемешивании со скоро-

стью вращения 200-250 об/мин. После 12 часов отстоя брали исходные пробы для измерения показателей качества воды (температура, рН, запах, прозрачность, удельная электрическая проводимость, жесткость общая, сухой остаток, содержание взвешенных веществ, нефтепродуктов (суммарно), железа (суммарно), биохимическое потребление кислорода (БПК_{полн}), окисляемость бихроматная (химическое потребление кислорода – ХПК). Анод взвешивали до и после исследования на лабораторных весах, с погрешностью $\pm 0,03$ мг.

Определение показателей загрязненности модельных растворов до и после их очистки проводилось в аналитической лаборатории Белорусского государственного аграрного технического университета при консультировании и технической поддержке лаборатории контроля качества сточных вод коммунального унитарного производственного предприятия «Минскводоканал».

Для измерения температуры, удельной электрической проводимости (УЭП) раствора применяли по-

веренный кондуктометр КП – 202 с классом точности 2,5. Диапазон измерения температуры прибора – 0...99,9 °С, УЭП – от $2 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ см/м (с датчиками 5M2.329.020 и 5M2.329.021).

Расход электроэнергии при проведении экспериментальных исследований измеряли электронным счетчиком СС-301 с классом точности по активной энергии 0,55. Для регулирования напряжения применялся трехфазный трансформатор АТМН-32-220-75 УХЛ 4, 32А, (50 Гц). Регулирование напряжения 5...220В. Постоянное напряжение получали с помощью трехфазного выпрямителя с двухполупериодной трехфазной мостовой схемой.

Экспериментальные исследования показали, что лучшие результаты очистки по составу загрязнений оказались во втором опыте, с электрофлотацией загрязнений и менее продолжительной обработкой в электрокоагуляторе. Показатели качества очистки соответствовали требованиям [2, 3] (табл. 1).

Наиболее объективно характеризуют качество очистки сточных вод показатели БПК и ХПК (рис. 4, 5).

Таблица 1. Результаты оценки проб по составу загрязнений

№ п/п	Наименование показателей, единица измерения	Результат исследования	Допустимые уровни по НД1: СН РБ 3.02.03-2019 НД2: МУ 2.1.5.1183-03 (РФ)
1	Водородный показатель рН	Исходная проба 7,23 ± 0,2	6,5-8,5/6,5-8,5
		Очистка 1 (2700 Кл) 7,68 ± 0,2	
		Очистка 2 (5400 Кл) 7,90 ± 0,2	
2	Взвешенные вещества, мг/дм ³	Исходная проба 1300 ± 65	40,0 <hr/> 3,0
		Очистка 1 (2700 Кл) 2,6 ± 0,13	
		Очистка 2 (5400 Кл) 2,7 ± 0,13	
3	Нефтепродукты, мг/дм ³	Исходная проба 1840,3 ± 18,4	15,0 <hr/> Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) 2,7 ± 0,02	
		Очистка 2 (5400 Кл) 2,2 ± 0,02	
4	Жесткость общая, мг-экв/дм ³	Исходная проба 5,70 ± 0,6	18,0 <hr/> Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) 8,44 ± 0,8	
		Очистка 2 (5400 Кл) 10,22 ± 1,2	
5	Сухой остаток, мг/дм ³	Исходная проба 1433,8 ± 35,8	1000,0 <hr/> Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) 817,5 ± 20,4	
		Очистка 2 (5400 Кл) 826,9 ± 20,6	
6	Железо (Fe суммарно), мг/дм ³	Исходная проба 0,22 ± 0,05	5 <hr/> Не установлен
		Очистка 1 (2700 Кл) 0,26 ± 0,05	
		Очистка 2 (5400 Кл) 0,70 ± 0,06	

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Наименование показателей, единица измерения	Результат исследования	Допустимые уровни по НД1: СН РБ 3.02.03-2019 НД2: МУ 2.1.5.1183-03 (РФ)
7	БПК ₅ , (БПК _{полн}) мгО ₂ /дм ³	Исходная проба 104,3 ± 1,0 (БПК ₅) 135,6 ± 1,4 (БПК _{полн})	80,0(БПК _{полн}) <hr/> 3,0(БПК ₅)
		Очистка 1 (2700 Кл) 2,70 ± 0,2 (БПК ₅) 3,51 ± 0,3 (БПК _{полн})	
		Очистка 2 (5400 Кл) 2,3 ± 0,2 (БПК ₅) 3,6 ± 0,3 (БПК _{полн})	
8	ХПК, мгО ₂ / дм ³	Исходная проба 273,1 ± 14,0	Не установлен <hr/> 30,0
		Очистка 1 (2700 Кл) 28,5 ± 1,40	
		Очистка 2 (5400 Кл) 52,9 ± 2,60	
9	Тетраэтилсвинец, мг/ дм ³	Исходная проба Не обнаружено	0,001
		Очистка 1 (2700 Кл) Не обнаружено	
		Очистка 2 Не обнаружено	Не установлен

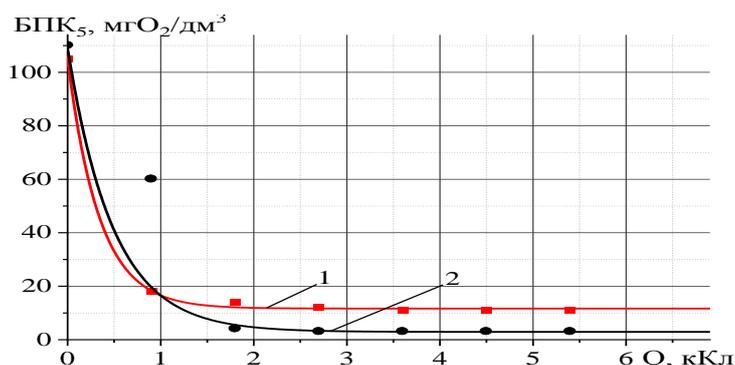


Рисунок 4. Зависимость БПК₅ сточных вод от режима очистки:
1 – только в электрокоагуляторе; 2 – очистка в электрофлотокоагуляторе с добавлением в исходный раствор поваренной соли

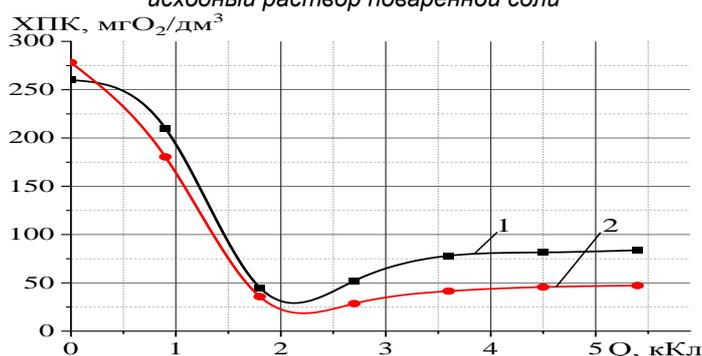


Рисунок 5. Зависимость ХПК сточных вод от режима очистки:
1 – только в электрокоагуляторе; 2 – очистка в электрофлотокоагуляторе с добавлением в исходный раствор поваренной соли

Опыты показали, что при коагуляции загрязнений и растворении анода в дозе 0,52 г/дм³ (2700 Кл) содержание железа в очищенной воде практически не

изменилось по сравнению с исходной его концентрацией, а при растворении электрода свыше 1 г/дм³ (5400 Кл) – растет и может превышать допустимую норму 5,0 мг/дм³. Это сопровождается и ростом ХПК.

Добавление в модельные стоки слабого раствора поваренной соли NaCl способствует насыщению очищаемых стоков гипохлоритом натрия, одним из сильных окислителей, а также устранению пассивации электродов за счет образования соляной кислоты, которая реагирует с гидроксидом железа и разрушает образующую им пленку. Известно, что основные минеральные удобрения содержат соли азотной, соляной, серной, фосфорной и других кислот. Это, например, такие химические соединения как NH₄NO₃, CO(NH₂)₂, Ca(H₂PO₄)₂, KCl, K₂SO₄, K₂SO₄·MgSO₄ и другие, которые могут присутствовать в сточных водах. Так как при очистке реальных стоков кислоты могут образовываться в процессе электролиза, то в добавлении поваренной соли нет необходимости.

Пузырьки газа, которые образуются при электролизе и электрофлотации, выносят адсорбированные гидроксидом железа загрязнения на поверхность очищаемой воды. С учетом того, что флотируемые частицы обладают магнитными свойствами, то попадая в камеру с неоднородным магнитным полем, меняют траекторию движения из вертикального в спиралевидную, с уменьшением радиуса. Таким образом, загрязнения фокусируются на

поверхности воды в центре воронки, откуда с помощью скребкового или другого устройства удаляются в нефтешлам. Анализ качества сточных вод после очистки в электрофлотокоагуляторе с электрохимическим разложением стального электрода показал достаточно удовлетворительные результаты по показателям «запах» (1 балл) и «мутность» (13 см водяного столба).

Заключение

1. Описан механизм влияния напряженности электрического поля на коагуляцию загрязнений при электролизе сточных вод со стальным анодом.

2. Установлено, что в целях повышения качества электрохимической очистки стоков воды, снижения энергозатрат и расхода металла, этот технологический процесс должен проводиться с учетом концентрации исходных загрязнений. При концентрации нефтепродуктов 1850 мг/дм^3 доза растворения железа не должна превышать $0,52 \text{ г/дм}^3$. При этом обеспечиваются допустимые показатели загрязнений в очищенной воде, пригодной для использования в оборотном водоснабжении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении санитарных норм и правил. Требования к организациям, осуществляющим сельскохозяйственную деятельность: постановление Министерства здравоохранения Респ. Беларусь от 08 февраля 2016 г. № 16. – Введены с изм. 23.02.2016 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21630713> (дата обращения: 03.04.2025)

2. Об утверждении и введении в действие изменения к строительным нормам СН 3.02.03-2019 «Станции технического обслуживания транспортных средств. Гаражи-стоянки автомобилей»: постановление Министерства архитектуры и строительства Респ. Беларусь от 17 ноября 2022 г. № 94. – Введены с изм. 02.04.2023 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339379> (дата обращения: 04.04.2025).

3. Санитарно-эпидемиологический надзор за использованием воды в системах технического водоснабжения промышленных предприятий: МУ 2.1.5.1183-03; утв. гл. гос. санитарным врачом

Российской Федерации 11 января 2003 г. – Введены 01.03.2003. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 20 с.

4. Каратаев, О.Р. Очистка сточных вод электрохимическими методами / О.Р. Каратаев, З.Р. Шамсутдинова, И.И. Хафизов // Вестник технологического университета (Казань). – 2015. – Т. 18. – № 22. – С. 21-23.

5. Экологические проблемы эксплуатации установок мойки автомобилей и пути их решения / И.А. Нечаев, А.Н. Белевцев, В.И. Жаворонкова [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 3. – С. 19-27.

6. Баранов, В.Я. Электрокинетические явления / В.Я. Баранов, В.И. Фролов. – М.: РГУ нефти и газа, 2002. – С. 52.

7. Савицкая, Т.А. Колоидная химия: строение двойного электрического слоя, получение и устойчивость дисперсных систем / Т.А. Савицкая, Д.А. Котиков, Т.А. Шичкова. – Минск: БГУ, 2011. – 82 с.

8. Соколов, Л.И. Ресурсосберегающая технология очистки маслоэмульсионных сточных вод: монография / Л.И. Соколов. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 74 с.

9. Грановский, М.Г. Электрообработка жидкостей / М.Г. Грановский, И.С. Лавров, О.В. Смирнов; под ред. И.С. Лаврова. – Ленинград: «Химия», 1976. – 216 с.

10. Hogg, R. Mutual coagulation of colloidal dispersions / R. Hogg, T.W. Healy and D.W. Fuerstenau // Trans. Faraday Soc. – 1966. – Vol. 62. – P. 1638.

11. Holt, P.K. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology / P.K. Holt, G.W. Barton, C.A. Mitchell // ELSEVIER Chemosphere, 2005. – № 59. – P. 355-367.

12. Хрипунова, О.С. Комбинированный метод с использованием химической и электрокоагуляции для очистки сточных вод при производстве красок на водной основе / О.С. Хрипунова, Ю.Е. Зевацкий, И.В. Кочуров // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2017. – № 3. – С. 62-69.

13. 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.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.04.2025

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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,

*ст. науч. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,
канд. техн. наук, доцент*

Представлены результаты анализа методов диагностирования автотракторных двигателей, в том числе зарождающихся эксплуатационных дефектов. Описаны современные виброакустические методы, позволяющие обеспечить индивидуализацию оценки состояния деталей двигателя в течение срока эксплуатации. Приведены результаты комплекса научно-исследовательских работ по испытанию форсунок CRIN2 автотракторных двигателей различной наработки, а также анализа их вибрационных характеристик. Выполнены разложение исходного сигнала на уровни и регистрация амплитуд колебаний, присущих определенным уровням разложения, что позволило составить характерные частоты колебания элементов форсунки. Предложено решение, позволяющее дополнить разработанную ранее многоканальную измерительную систему функциональными возможностями по регистрации и оценке вибросигналов от MEMS-датчиков на основе микропружинной связи.

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

The article presents the results of the analysis of methods for diagnosing automotive engines, including emerging operational defects. Modern vibroacoustic methods are described, which allow to provide individualization of condition assessment of engine parts during the service life. The results of a set of research works on testing CRIN2 nozzles of automotive engines of various operating hours, as well as an analysis of their vibration characteristics are given. Decomposition of the initial signal into levels and registration of amplitudes of oscillations inherent to certain levels of decomposition were performed, which made it possible to compile characteristic frequencies of oscillations of nozzle elements. A solution is proposed to supplement the previously developed multichannel measurement system with functional capabilities for registration and evaluation of vibration signals from MEMS sensors based on microspring coupling.

Key words: diagnostics, engine, method, wear, sensor, signal, stand, nozzles, spectrum.

Введение

В мировой практике создания и эксплуатации машин актуальными остаются проблемы обеспечения надежности их работы, безразборного контроля и прогнозирования технического состояния. Увеличение ресурса и повышение надежности машин и механизмов предполагают переход на эксплуатацию технических объектов по фактическому состоянию, а это возможно только при наличии эффективных методов и средств диагностирования [1].

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение современных средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования машин и механизмов в народном хозяйстве [1; 2].

Исследования многих отечественных и зарубежных ученых позволяют утверждать о том, что вибрации являются носителями уникальной информации о тончайших нюансах поведения конструкции и действующих в ней рабочих процессов. По скорости реакции на любые изменения состояния вибрациям нет равных среди других сопровождающих физических явлений. Структуры вибраций указывают на свое происхождение, т.е. демаскируют дефект. После устранения дефекта вибрации существенно ослабевают [3].

Вибросигналами оценивают зазоры и некоторые дефекты сопряжений, но и один механизм эмиссирует широкий спектр реверберирующих сигналов – от десятка Гц до сотен кГц и МГц, т.е. образуется широкополосный виброакустический фон, в котором полезный сигнал скрыт. Выделить в нем нужный сигнал

затруднительно. Отношение полезного вибросигнала к фону, порой, невелико и добротность диагностики невысока [4].

При виброконтроле получают разнообразные, иногда трудно понимаемые спектры, осциллограммы и другие характеристики сигналов, хотя некоторые из них имеют информативные качественные признаки и количественные характеристики. Поэтому чтобы выделить из вибрационного фона сигнал от одного механизма при работе в агрегате нескольких, требуется установка самого информативного режима работы объекта контроля, а также специальная установка вибродатчиков, частотная и временная селекция сигналов в виброаппаратуре [4].

Целью данной работы является разработка научных основ для создания технологии диагностирования, реализация которой позволяет детектировать, распознавать и идентифицировать зарождающиеся эксплуатационные дефекты деталей автотракторных двигателей.

Основная часть

Достаточно полная классификация методов диагностирования автотракторных двигателей изложена в работах Мигаля В.Д. [5, 6], где рассмотрены интеллектуальные и инструментальные методы, анализ которых позволяет отметить 12 групп методов диагностирования, позволяющих формировать массив данных с высокой степенью достоверности. Наибольший интерес представляют группы методов контроля износа трущихся деталей и смазки – виброакустические, энергетические и гидрогазоаэродинамические. В группе виброакустических методов выделены такие виды, как частотный и спектральный анализ, корреляционный анализ взаимных спектров вибрации и сопоставление спектров.

Исследования последних лет авторов публикации позволили привнести в данную группу новый вид – анализ вейвлетных образов сигналов (рис. 1), позволяющий обеспечить высокую достоверность при

Виброакустические	
Виды методов	Области применения
<p>Спектральный анализ вибрации:</p> <ul style="list-style-type: none"> - частотный анализ; - спектральный анализ; - анализ ударных импульсов; - кепстральный анализ; - анализ спектра вибрации по огибающей; - фазовое сравнение сигналов вибрации; - амплитудно-временной анализ сигналов вибрации; - корреляционный анализ взаимных спектров вибрации; - определение акустической эмиссии; - статистический анализ вибрационных характеристик; - модуляция вибрационных процессов; - амплитуда вибрации пик-фактора; - величина эксцесса; - резонансная частота узла (детали), механизма, газовых и гидравлических потоков; - сопоставление спектров; - анализ вейвлетных образов сигналов. 	<p>Исследование динамических характеристик конструкции, технологий производства и технического состояния двигателей в эксплуатации.</p> <p><u>Высокая информационность вибрационных сигналов на изменение структурных, функциональных и динамического состояния деталей машин.</u></p> <p>Высокая универсальность, чувствительность и избирательность вибрационного сигнала к параметрам механических, гидравлических, газо- и аэродинамических, электрических и магнитных систем.</p> <p><u>Большой объем информации в одном измерении вибрации. высокая скорость диагностирования. позволяющая автоматизировать контроль технического состояния.</u></p> <p>Нормирование вибрации для контроля уровня проектирования, качества изготовления и эксплуатации.</p>
Энергетические и гидрогазоаэродинамические методы	
<p>Механический КПД. Индикаторные показатели (мощность, КПД, расход топлива). Эффективная мощность. Неравномерность работы цилиндров. Скорость и неравномерность вращения коленчатого вала. Компрессионные свойства цилиндров. Внутрицикловое изменение (колебание) угловой скорости коленчатого вала. Изменение крутящего момента и угловой скорости вала по углу поворота при равномерной работе цилиндров. Амплитудно-фазовые параметры (осциллограммы) изменения напряжения, тока, сопротивления в первичной и вторичной цепях (переходных процессов) зажигания, давления в цилиндрах.</p>	<p>Диагностика ЦПГ, КШМ, элементов топливной системы (насосов, гидравлического аккумулятора, форсунок, системы сгорания и расхода топлива). Доводка конструкции двигателей до заданных технических характеристик, оценка качества ремонта и эксплуатации отдельного двигателя и в составе транспортного средства.</p>

Рисунок 1. Отдельные группы методов диагностирования автотракторных двигателей (виброакустические, энергетические и гидрогазоаэродинамические) с привнесенным подвидом анализа вейвлетных образов сигналов

идентификации дефектов в узлах и агрегатах дизельных двигателей.

Известно, что все узлы имеют собственную резонансную частоту. На этом основан метод вибродиагностирования, предложенный В.И. Соловьевым, В.А. Аллилуевым, В.И. Беляевым [7]. При резонансном вибродиагностировании осуществляется контроль слабой амплитуды вибросигнала в резонансной частоте пьезоакселерометра. Географическая, фазовая (временная), частотная и резонансная селекции при получении вибросигнала позволяют оценивать форму и амплитуду сигнала.

В результате анализа данных [1; 8; 9; 14] были установлены шесть специальных методов диагностирования зарождающихся эксплуатационных дефектов:

- метод ударных импульсов;
- метод спектрального анализа амплитудной огибающей вибросигнала на резонансной частоте датчика (резонансный метод);
- метод формирования n -мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала на резонансной частоте узла механизма;
- метод формирования n -мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала в окрестностях основных частот возбуждения механизма;
- обнаружение зарождающихся дефектов по величине коэффициента эксцесса;
- метод выделения когерентной составляющей.

Анализ источников [1; 3; 8-9; 10-13; 16] позволил установить характерные фазы проявления дефектов для 4-тактного двигателя [2], а также спектральные области проявления дефектов [2].

В источнике [14] содержится утверждение о том, что зарождающиеся эксплуатационные дефекты, обладающие малой колебательной мощностью, удается диагностировать лишь при обращении к высокочастотным акустическим колебаниям в резонансных зонах механической системы в диапазоне частот $1-2 \text{ кГц} \leq f \leq 10-20 \text{ кГц}$ или при обращении к колебаниям в зарезонансной области $20 \leq f \leq 200-500 \text{ кГц}$ на собственной частоте встроенного вибропреобразователя. В диагностике зарождающихся дефектов предпочтительны методы анализа нестационарной компоненты колебательного процесса, а также методы, базирующиеся на анализе нелинейных свойств колебательной системы диагностируемого объекта.

Из приведенных выше данных следует, что зарождающийся дефект проявляется мерцательно, т.е. нестационарно, и эту нестационарность необходимо своевременно распознавать, прежде чем эксплуатационный дефект пройдет все стадии формирования (инкубационный период) и выйдет на поверхность.

Высокую результативность можно получить при обращении к высокочастотным акустическим колебаниям в резонансных зонах механической системы или к колебаниям в зарезонансной области на собственной частоте встроенного вибропреобразователя, что гораздо сложнее. Данный подход, по мнению авторов, базируется на использовании пьезоэлектрическо-

го сенсора, у которого спектральная полоса чувствительности очень мала и крайне узка. Поэтому для детектирования дефектов, обладающих малой колебательной мощностью, необходимо преобразовать их спектр (или подстроить) к рабочему спектру чувствительного пьезоэлемента, т.е. к его резонансной частоте.

В ходе выполнения данных научных исследований использовались не пьезоэлементы, а значительно более широкополосные, при этом несколько более низкочастотные MEMS-датчики на основе микропружинной связи. Поэтому не возникало необходимости в преобразовании частоты в околорезонансную частоту для сенсора. В целом, следует отметить, что MEMS-сенсоры не работают на таких частотах (верхнее значение составляет порядка 1,6 кГц). Авторами также предложен новый подход в распознавании зарождающихся дефектов, а именно: анализ степени размытости спектральных линий вибросигнала.

В рамках гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2024 год в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем БГАТУ был выполнен комплекс научно-исследовательских работ по тестированию форсунок CRIN2 автотракторных дизелей различной наработки (в том числе и новой форсунки) и последующему анализу их вибрационных характеристик.

На специализированном диагностическом стенде CR-Jet 4E (Dieselland) с использованием разработанной многоканальной измерительной системы с гибкой структурой [4; 15] проходили испытание форсунки CRIN2 (Bosch, типовые номера 0445120141 и 0445120074) на всех режимах нагружения. Вибродатчики MPU9150 и MPU9250 жестко крепились на корпусе форсунок клейкой лентой и дополнительно специальным стяжным хомутом (рис. 2), а для акустики использовался цифровой миниатюрный MEMS-микрофон INMP621. В дальнейшем выполнялся анализ полученных вибрационных характеристик.

На каждом этапе нагружения (тестирования) форсунки формировался соответствующий протокол.

Этапы тестирования:

- 1) проверка гидроплотности форсунки (LEAK TEST). Тест гидроплотности состоит в измерении времени изменения давления от одного порога до другого. Задаются два порога давления: верхний и нижний. Время снижения давления от верхнего до нижнего порога отображается на дисплее;
- 2) тестирование форсунки при максимальной нагрузке (VL);
- 3) тестирование форсунки при средних нагрузках или оценка экологичности, так называемая, «точка эмиссии» (EM);
- 4) тестирование форсунки на холостом ходу (LL);
- 5) тестирование предварительного впрыска топлива (VE1 и VE1).

Визуализация данных рабочих окон программы стенда в привязке к конкретному этапу тестирования (VL) представлена на рисунке 3.

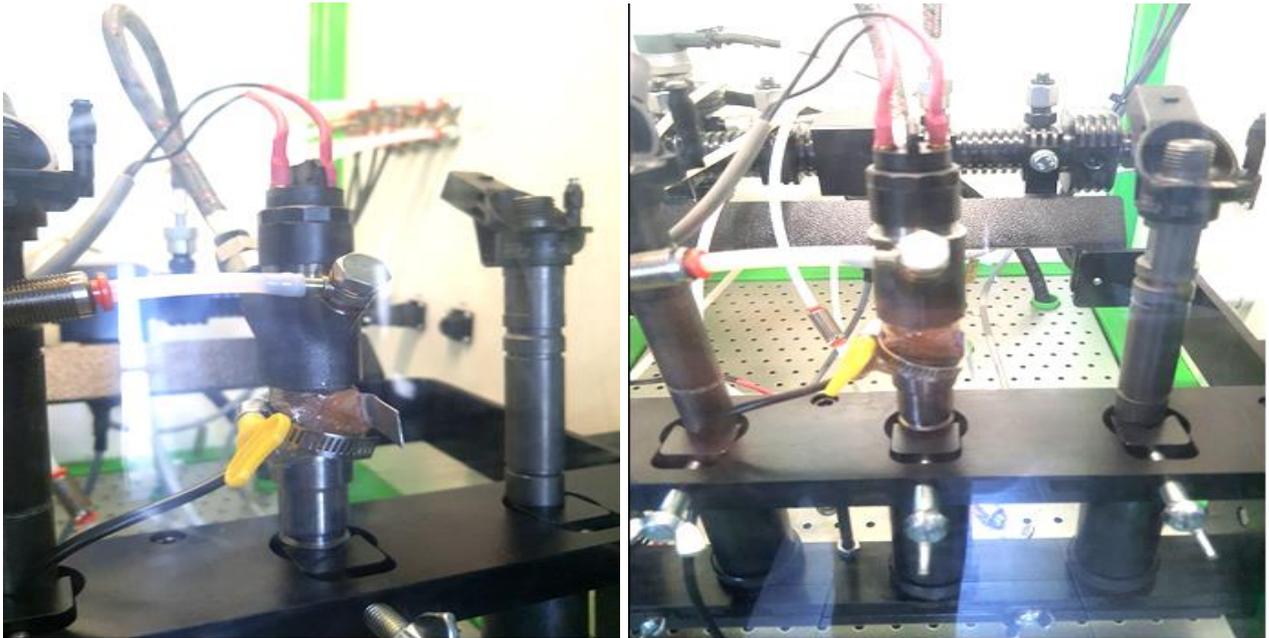


Рисунок 2. Испытуемая форсунка CRIN2 смонтирована на диагностическом стенде CR-jet 4E (Dieselland), датчик вибрации дополнительно прижат к корпусу форсунки стяжным хомутом

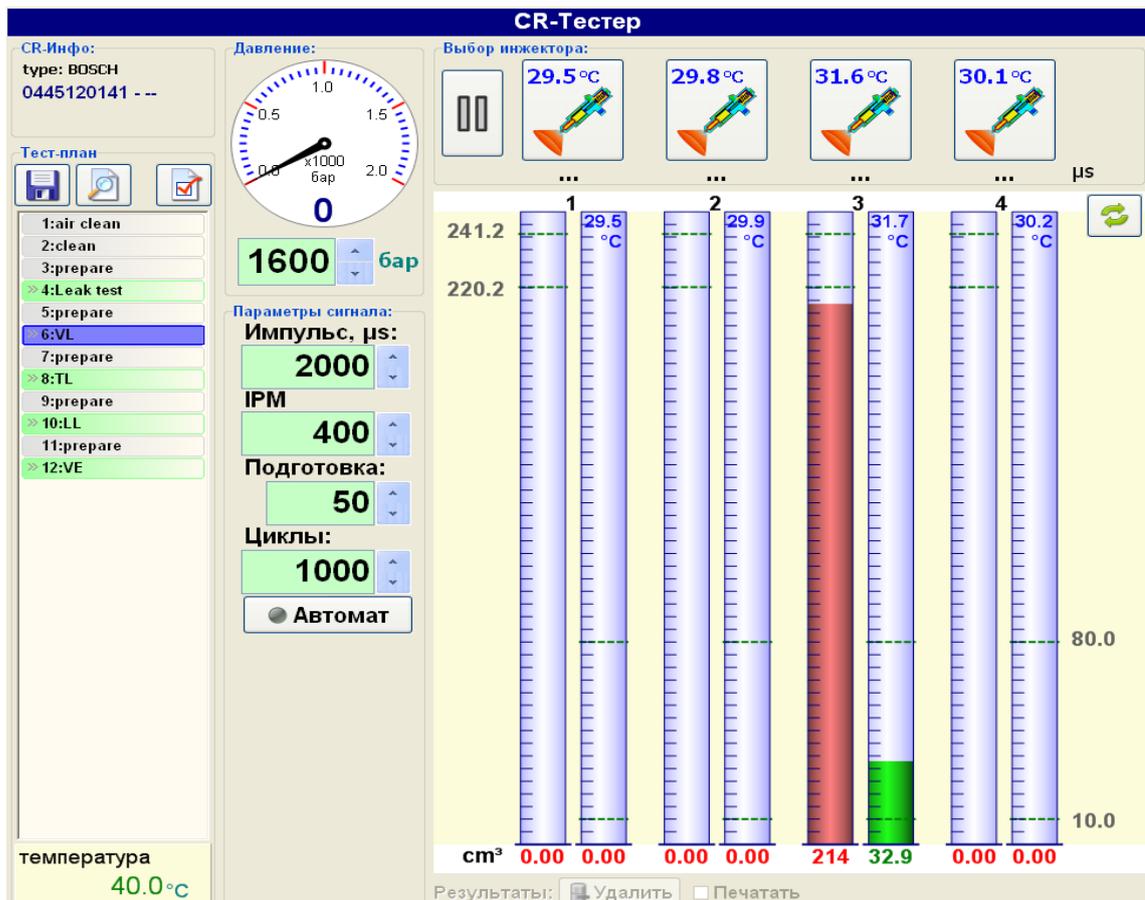


Рисунок 3. Рабочее окно программы стенда на режиме VL тестирования

Разработанная измерительная система отображает в режиме реального времени вибросигналы отно-

сительно системы координат хуз, создает амплитудно-частотную характеристику быстрым преобразо-

ванием Фурье. Система также сохраняет сигналы для их последующей вейвлет-обработки. Изначально они записывались в бинарные файлы с расширением «bin», а позднее – в wav-файлы, с фиксацией момента перехода на следующий тест-план. Температура форсунок фиксировалась, а их шум записывался в wav-файл [4].

Возможности диагностического стенда позволяют проводить тестирование четырех форсунок. Все необходимые адаптеры для подключения в лаборатории имеются. Однако во избежание разности подачи тестовой жидкости при нагружении тестированию подвергалась одна форсунка. Поэтому на всех представленных рисунках активной является секция под номером три, фактическое значение расхода тестовой жидкости указывается непосредственно под столбцом (к примеру, на рис. 3 значение расхода составляет $214 \text{ см}^3/1000$ 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 $\text{см}^3/1000$ циклов, на режиме TL – значения от 22,9 до 36,1 $\text{см}^3/1000$ циклов и так далее.

На основании проведенных исследований был сформирован массив данных, представленный в виде лабораторного журнала. Элементы массива данных 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 и изношенных форсунок (рис. 4, 5). Для дан-

ных тестирования при максимальной нагрузке дополнительно выполнены вейвлет-преобразования и математическая обработка сигналов вибрации новой форсунки и форсунки, на ответственных деталях которой выявлены 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.

Целью дальнейшего программного диагностирования топливных форсунок является выявление в вибросигнале выраженных гармоник с контролем их поведения, в чем и заключается новизна подхода при контроле [17]. Графическая интерпретация контроля выраженных гармоник вибросигнала представлена на рисунке 6.

Суть данного решения сводится к обработке спектрограмм (скейлограмм) как изображений методами цифровой обработки многомерных сигналов.

В качестве множества параметров контроля поведения гармоник (идентификационного вектора) вибросигнала выступают:

- количество выраженных гармоник в вибросигнале;
- номер (или частота) выраженной гармоники в вибросигнале (рис. 6);
- пиковые частоты в поведении выраженных гармоник во времени.

При вычислении идентификационного вектора параметров спектрограммы определяется множество данных, на основе которых однозначно можно распознать режим диагностирования (VL, TL, LL) и судить о состоянии топливной форсунки.

Для форсунок, на ответственных деталях которых выявлены следы изнашивания, характерен менее

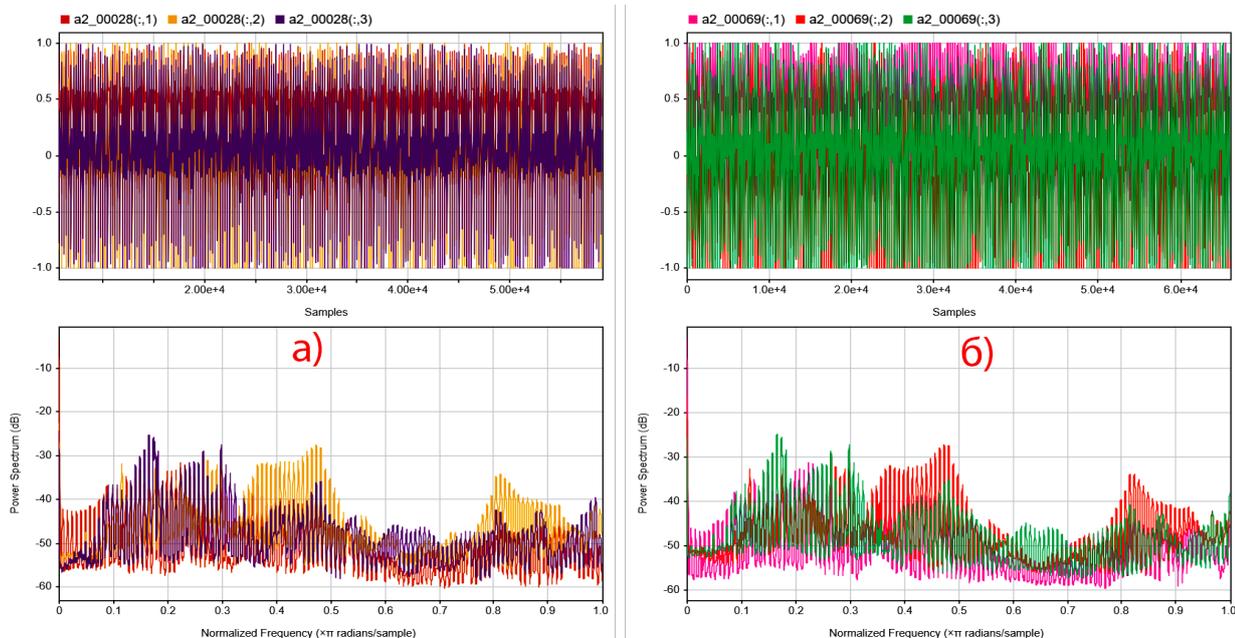


Рисунок 4. Результаты тестирования исправной форсунки (режим VL): а, б – исправная форсунка, первое испытание (1600 бар, импульс 2000 мкс, $i_{рт}$ 400, подготовка 50, циклы 1000, соударения)

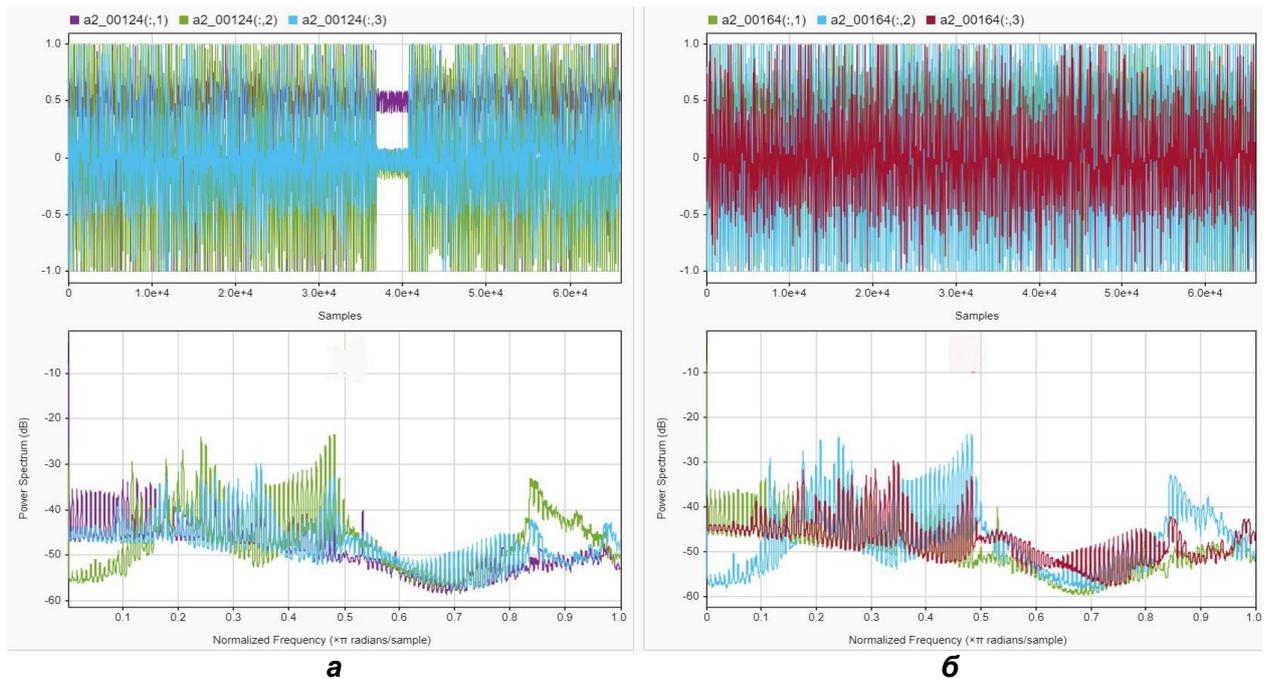


Рисунок 5. Результаты тестирования форсунки со следами износа: а, б – форсунка с умеренным износом посадочной поверхности клапана (режим VL)

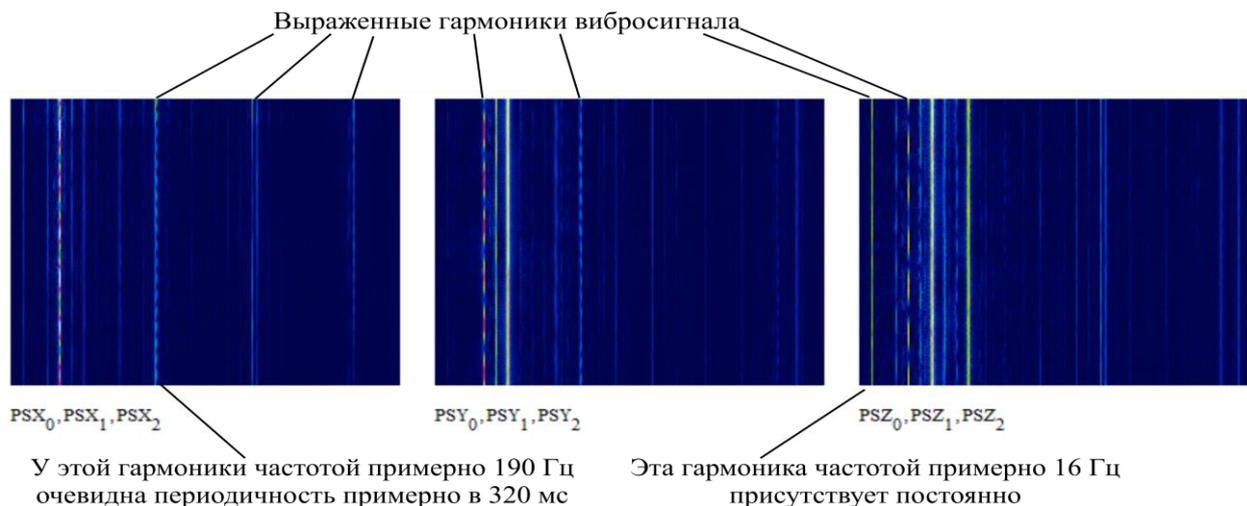


Рисунок 6. Графическая интерпретация контроля выраженных гармоник вибросигнала

выраженный спектр постоянства колебаний. На амплитудном спектре вибросигнала выявляются:

- на частоте 120 Гц – гидроудар при подаче топлива в полость форсунки;
- на частоте 100 Гц – интенсивные виброускорения при ударе иглы об упор посадочного места;
- на частотах 70-80 Гц – вибрации от факела впрыскиваемого топлива;
- на частоте 50 Гц – удар от заключительной посадки иглы в распылитель;
- на частоте 10-30 Гц – возмущения большой амплитуды, возможные из-за закоксовки сопловых отверстий форсунки. Последнее наблюдается и на вейвлет-образях виброускорений.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что методами обработки сигнала вибрации могут служить как спектрально-статистический анализ, так и вейвлет-преобразование. В целом, целесообразно сочетание базовых методов, алгоритмов и методик диагностирования узлов и деталей автотракторных двигателей.

Предложен технологический подход вибрационного диагностирования топливных форсунок с использованием разработанного многоканального прибора интегрированного виброакустического и теплового диагностирования и специализированного диагностического стенда.

В ходе программного диагностирования топливных форсунок разработан новый метод выявления в вибросигнале выраженных гармоник с контролем их поведения. Результат подхода формируется при обработке спектрограмм (скейлограмм) как изображений методами цифровой обработки многомерных сигналов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Балицкий, Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова [и др.]. – М.: Наука, 1984. – 119 с.
2. Тарасенко, В.Е. Использование методов функционального диагностирования автотракторных двигателей / В.Е. Тарасенко // Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 5-6 июня 2024 г. / Белор. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: Л.М. Акулович [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – С. 49-55.
3. Коновалов, А.И. Диагностируем на «Дельфине»: методич. пособие / А.И. Коновалов, О.Н. Лукьяненко. – Луганск, 2006. – 100 с.
4. Диагностирование многоканальной измерительной системой с гибкой структурой форсунок фирмы BOSCH / А.А. Жешко, В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич, А.В. Дунаев // Технический сервис машин. – 2021. – Т. 59. – № 1 (142). – С. 55-64.
5. Мигаль, В.Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей: учеб. пособие: в 3 томах. Объекты и методы диагностирования / В.Д. Мигаль. – Харьков: Майдан, 2014. – Т. 1. – 459 с.
6. Мигаль, В.Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей: учеб. пособие: в 3 т. / В.Д. Мигаль. – Харьков: Майдан, 2014. – Т. 2: Неисправности, параметры и средства диагностики. – 403 с.
7. Технология вибрационного диагностирования дизельных двигателей / В.И. Соловьев, В.И. Беляев, В.А. Мачнев [и др.]. – М.: ГОСНИТИ, 1979. – 41 с.
8. Мордасов, В.И. Лазерная виброакустическая диагностика дефектов многослойных конструкций: учеб. пособие / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, С.А. Сорокина [и др.]. – Самара: СГАУ, 2008. – 80 с.
9. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – М.: 1996. – 276 с.
10. Jorge Duarte-Forero. Failure analysis in single-cylinder diesel engine SK-MDF300 through acoustic emissions / Duarte-Forero Jorge, Sergio Andrés Ramón-Ramón, Guillermo Valencia-Ochoa // *Respuestas, Journal of Engineering Sciences*. – 2020. – 25 (2) May-August. – P. 83-90.
11. Elamin, Fathi. Fault Detection and Diagnosis in Heavy Duty Diesel Engines Using Acoustic Emission / Fathi Hassen Elamin // *Doctoral thesis, University of Huddersfield*. – November, 2013. – 265 p.
12. B. Ribbens, William. Incipient failure detection in bus engine components / William B. Ribbens, Mitra Naaseh // *Center for Transit Research and Management Development University of Michigan Transportation Research Institute*. – MARCH, 1987. – 71 p.
13. Chaitidis, G.D. Vibration Analysis of a Common Rail Diesel Engine using Biodiesel: A Case Study / G.D. Chaitidis, T.S. Karakatsanis, V. Kanakaris [et al.] // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. – 2019. – № 12 (5). – P. 167-175.
14. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
15. Тарасенко, В.Е. Результаты диагностирования форсунки CRIN2 дизеля трактора «Беларус-3522.5» / В.Е. Тарасенко, О.О. Мухля, М.Д. Бобриков, Д.Д. Попека // Проблемы и перспективы развития инженерной науки в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию работы кафедры эксплуатации и ремонта машин инженерного факультета и 90-летию докт. техн. наук, профессора, почетного работника высшего профессионального образования Российской Федерации Зорина Александра Ивановича, г. Ижевск, 13-15 февр. 2024 г. / Удмурдский гос. аграрный ун-т. – Ижевск: УдГАУ, 2024. – С. 47-53.
16. Тарасенко, В.Е. Анализ вибрационных характеристик форсунок CRIN2 автотракторных дизелей / В.Е. Тарасенко // *Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса: материалы республиканской науч.-практ. конф. (БЕЛАГРО-2024)*; редкол.: В.А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2024. – С. 254-257.
17. 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. 30.04.2022 / В.Е. Тарасенко, О.Ч. Ролич; заявитель: Бел. гос. аграрн. техн. ун-т. – 7 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 21.02.2025

УДК 621.432/004.932

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-32-37>

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА *IMAGEJ* ЧАСТЬ 3. МЕТОД ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ, КОЛИЧЕСТВА И ФОРМЫ ЧАСТИЦ

В.К. Корнеева,*доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент***В.М. Капцевич,***зав. каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор***А.И. Цымбалюк,***студент факультета «Технический сервис в АПК» БГАТУ***А.В. Макаревич,***студент факультета «Технический сервис в АПК» БГАТУ*

На примере анализа фильтрограммы моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 150 ч, полученной методом мембранной фильтрации, показана возможность использования предложенной методики и алгоритма анализа цифрового изображения частиц износа с применением программного комплекса ImageJ. Использование разработанного алгоритма, включающего три стадии: подготовку изображения, его сегментацию и непосредственный анализ, позволило определить размеры частиц, их количество и форму, по которым можно судить о характере износа и интенсивности изнашивания трибосопряжений двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: моторное масло, мембранная фильтрация, фильтрограмма, цифровое изображение, частицы, размеры, количество, форма, ImageJ, алгоритм.

The possibility of using the proposed method and algorithm for analyzing the digital image of wear particles using the ImageJ software package is shown using the example of analyzing the filtergram of Lukoil Avangard 10W40 motor oil with an operating time of 150 hours, obtained by membrane filtration. The use of the developed algorithm, which includes three stages: image preparation, its segmentation and direct analysis, made it possible to determine the sizes of particles, their quantity and shape, which can be used to judge about the nature of wear and the intensity of wear of the tribounits of the internal combustion engine.

Key words: motor oil, membrane filtration, filtergram, digital image, particles, size, quantity, shape, ImageJ, algorithm.

Введение

Моторное масло является носителем информации как о состоянии самого масла, так и о работоспособности ДВС и его систем [1]. Во время работы ДВС в моторном масле происходит процесс непрерывного накапливания загрязнений. По своему отрицательно-му воздействию наиболее опасными загрязнениями, влияющими на состояние самого масла и на работу двигателя, являются абразивные частицы и продукты износа ДВС [2]. Контролируя генерирование продуктов износа в моторном масле и определяя при этом, размеры частиц, можно охарактеризовать процесс изнашивания трибосопряжений ДВС. Кроме того, определяя количество и форму таких частиц, можно

оценить интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей и характер износа [3].

Одним из методов контроля присутствия абразивных частиц и продуктов износа ДВС в моторном масле является метод мембранной фильтрации – патч-тестирование [4], позволяющий наглядно контролировать их наличие и при этом оценивать размеры и количество. Этот метод заключается в вакуумной фильтрации масла через мембрану с последующим анализом полученной фильтрограммы с осажденными на ней частицами загрязнений.

Для реализации данного метода в условиях предприятий АПК в работе [5] предложена методика, заключающаяся в вакуумной фильтрации моторного масла, получении при помощи портативного микро-

скопа цифрового изображения фильтограммы и его сравнении с тремя эталонными изображениями (рис. 1), соответствующими работоспособному (рис. 1а), предаварийному (рис. 1б) и критическому (рис. 1в) состоянию моторного масла.

Данный метод предполагает только качественное сравнение состояния моторного масла и не позволяет определить размеры частиц загрязнений, их количество и форму, знание которых дает возможность оценить интенсивность изнашивания деталей и судить о процессах, происходящих в трибосопряжениях ДВС.

В работах [6, 7] предложен новый методический подход для анализа цифровых изображений результатов экспресс-тестирования моторного масла колориметрическими методами с использованием программного комплекса *ImageJ* [8]. Следует отметить, что данный комплекс также имеет расширенные возможности для анализа частиц на цифровых изображениях. Так, известно применение программы *ImageJ* для анализа размеров и формы частиц россыпного золота [9], для определения размеров частиц полиэфирного порошка и волокон вискозы [10], для оценки формы и размеров опасных полимерных частиц, загрязняющих окружающую среду [11, 12], для оцен-

ки распределения частиц гравия по размерам [13] и др. Приведенные примеры применения программного комплекса *ImageJ* показывают, что он может быть использован для анализа фильтограмм моторного масла, полученных методом мембранной фильтрации.

Цель настоящей работы – разработать методику и алгоритм определения размеров, количества и формы частиц на цифровом изображении фильтограммы моторного масла с использованием программного комплекса *ImageJ*.

Основная часть

Методика анализа частиц с использованием программы *ImageJ* основана на предлагаемом алгоритме (рис. 2), включающем три основные стадии: подготовка изображения, его сегментация и анализ частиц.

Первая стадия (подготовка изображения) включает в себя два этапа: непосредственное получение изображения и его предварительную обработку. Для получения изображений, которые можно обрабатывать в программе *ImageJ*, необходимо использовать различные устройства, такие как оптические, электронные (сканирующие и просвечивающие) и конфокальные микроскопы, цифровые камеры и камеры

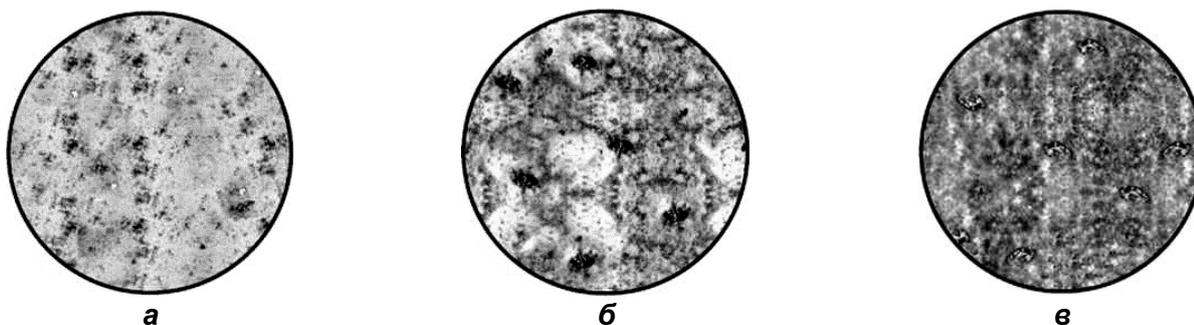


Рисунок 1. Изображения эталонных фильтограмм, соответствующих различному состоянию моторного масла: а – работоспособному; б – предаварийному; в – критическому



Рисунок 2. Алгоритм определения размеров, количества и формы частиц с использованием программы *ImageJ*

микроскопии, планшетные и специализированные (например, слайд-сканеры) сканеры. Программа *ImageJ* поддерживает множество форматов изображений, включая *TIFF*, *JPEG*, *PNG*, *BMP*, *GIF* и др. Предварительная обработка изображения предполагает введение изображения в программу *ImageJ*, создание копии изображения, перевод его в формат 8-bit, калибровку (масштабирование) изображения, коррекцию контрастности и яркости и использование различных фильтров для улучшения изображения.

Вторая стадия (сегментация изображения) включает три этапа: преобразование изображения в бинарное, разделение соприкасающихся частиц и ручная корректировка изображения.

Третья стадия (анализ частиц) также состоит из трех этапов: непосредственное определение характеристик частиц, классификация частиц по различным параметрам и обработка полученных результатов.

Рассмотрим возможность использования предложенного алгоритма для определения размеров, количества и формы продуктов износа на фильтрограмме моторного масла, полученной методом мембранной фильтрации. В качестве объекта исследования было выбрано цифровое изображение фрагмента (диаметр 3 мм) фильтрограммы моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 150 ч (рис. 3) [4],

полученное с использованием портативного цифрового микроскопа *Discovery Artisan 32*.



Рисунок 3. Цифровое изображение фильтрограммы моторного масла

Согласно предложенному выше алгоритму, проанализируем цифровое изображение представленной фильтрограммы (стадия I, этап 1.1 (рис. 3)). На рисунке 4 представлена последовательность выполнения операций на стадии I (подготовка изображения) этапа 1.2 (предварительная обработка изображения).

На рисунке 5 показана последовательность операций обработки изображения на стадии II (сегментация изображения).

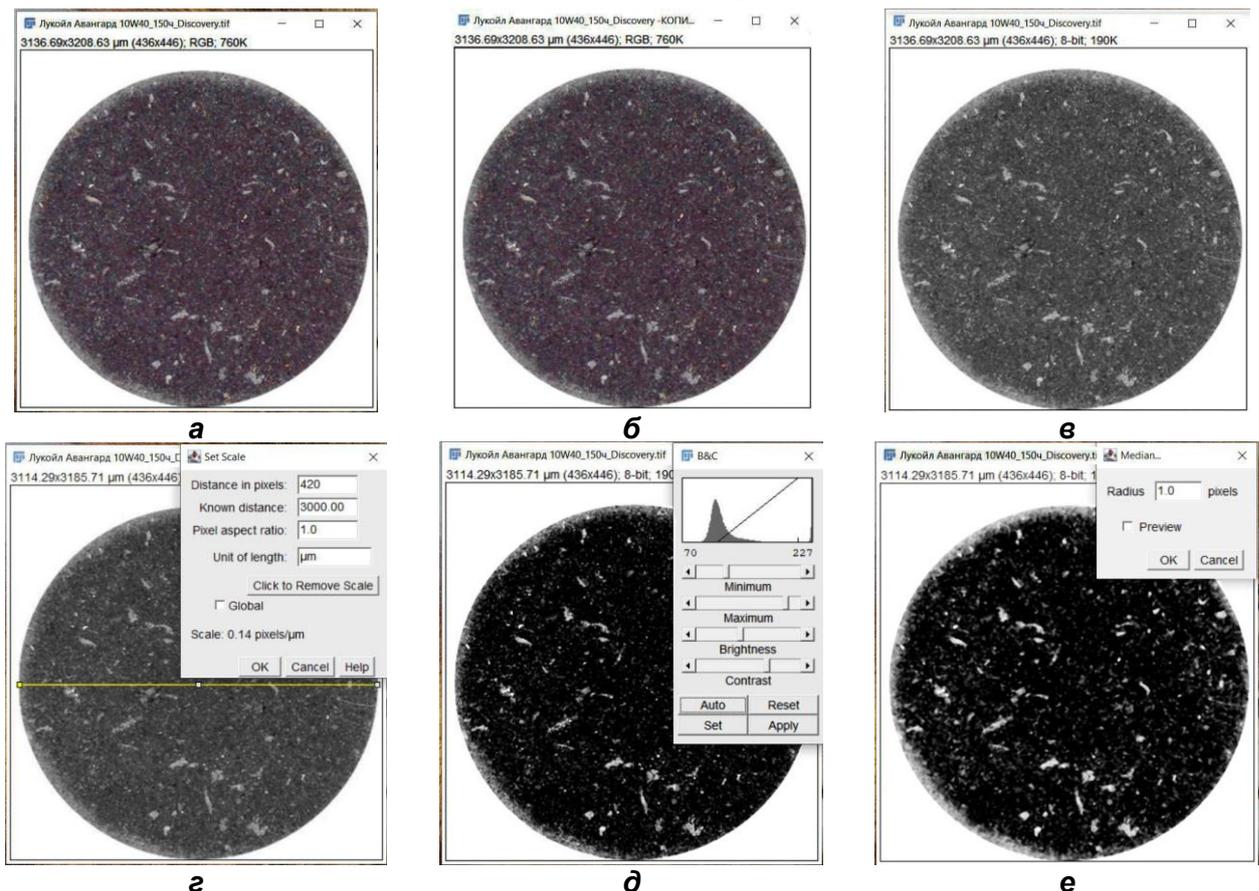


Рисунок 4. Последовательность выполнения операций на стадии I (подготовка изображения) этапа 1.2 (предварительная обработка изображения):

а – введение в программу; б – создание копии; в – перевод в формат 8-bit; г – калибровка; д – коррекция контрастности и яркости; е – удаление шума

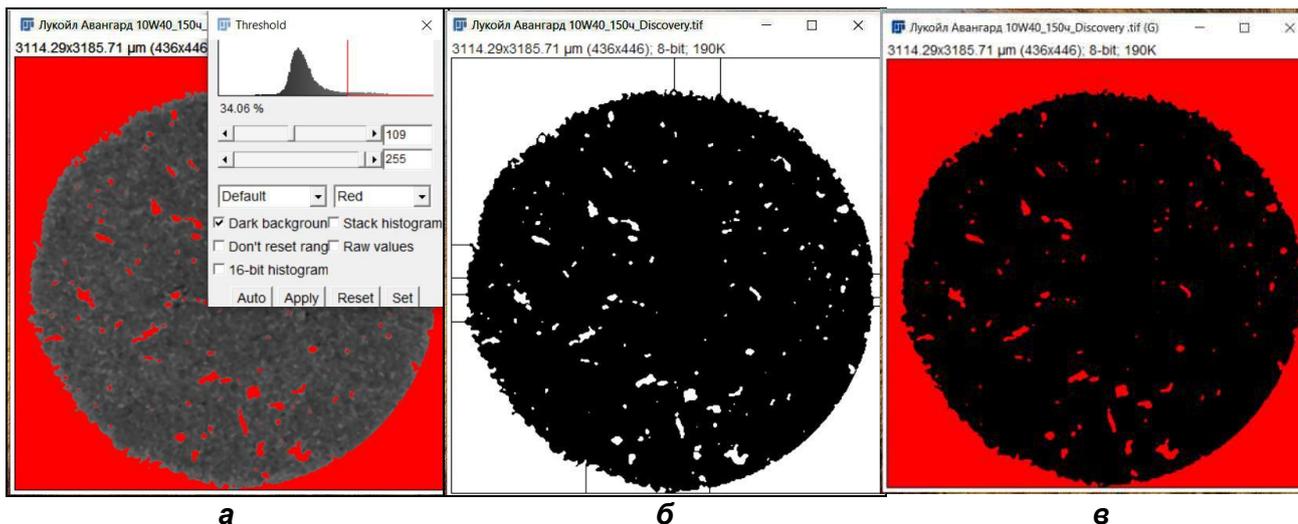


Рисунок 5. Последовательность выполнения операций на стадии II (сегментация изображения): а – этап 2.1 (преобразование изображения в бинарное); б – этап 2.2 (разделение соприкасающихся частиц); в – этап 2.3 (ручная корректировка изображения)

Результаты анализа частиц (стадия III) на этапе 3.1 (определение характеристик частиц) представлены на рисунке 6.

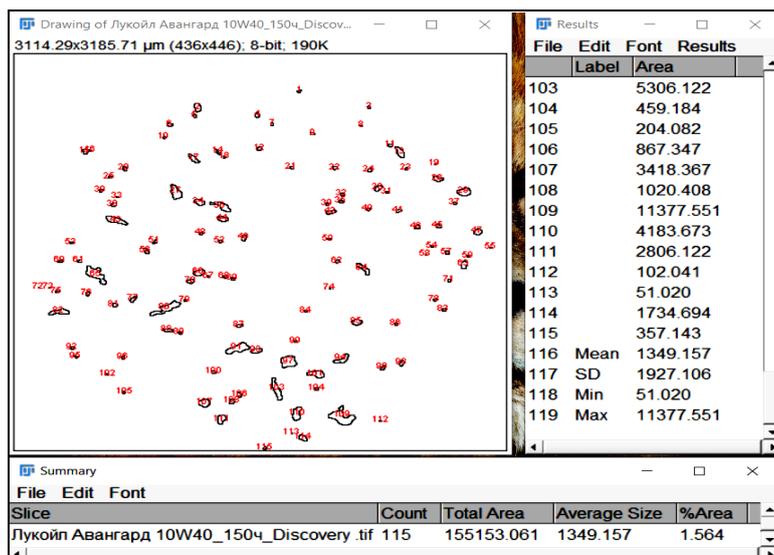


Рисунок 6. Результаты анализа частиц (стадия III, этап 3.1)

Классификация частиц по различным параметрам и обработка полученных результатов (согласно этапу 3.2) представлены на рисунках 7-10. При этом на рисунках 7, 8 приведены изображения частиц в различных диапазонах значений их размеров и сферичности соответственно, а на рисунках 9, 10 – гистограммы распределения частиц по этим параметрам.

Известно [15, 16], что процесс изнашивания трибосопряжений ДВС характеризуется следующим образом: присутствие частиц износа с размерами до 10 мкм характеризует процесс нормального изнашивания; до 100 мкм – сильного изнашивания; 100–1000 мкм – предаварийного изнашивания; более 1000 мкм – катастрофического изнашивания. Анализ полученных ре-

зультатов (рис. 9) показывает, что в исследуемом масле в значительном количестве (29 шт.) содержатся частицы износа с размерами 40-100 мкм, что может свидетельствовать о процессе сильного изнашивания, а наличие двух частиц с размерами более 100 мкм – о начале процесса предаварийного изнашивания.

Анализ полученных результатов (рис. 10) указывает на присутствие в значительном количестве частиц (96 шт.) с формой, близкой к сферической (сферичность в диапазоне 0,71 – 1,0), что может свидетельствовать о нормальном износе (например, от трения в подшипниках). Наличие частиц (8 шт) со сферичностью, равной 0,31 – 0,5, указывает на аномальный износ, такой как абразивный или усталостный, который может быть связан с поломкой или интенсивным изнашиванием.

Полученные результаты анализа цифрового изображения фильтрограммы моторного масла свидетельствуют о возможности использования предложенного алгоритма для определения размеров, количества и формы частиц загрязнений при обработке экспериментальных данных, полученных методом мембранной фильтрации непосредственно в условиях предприятий АПК.

Заключение

Предложен методический подход к анализу фильтрограмм моторного масла, основанный на использовании программного комплекса *ImageJ*, для реализации которого разработан алгоритм определения параметров частиц по полученным цифровым изображениям.

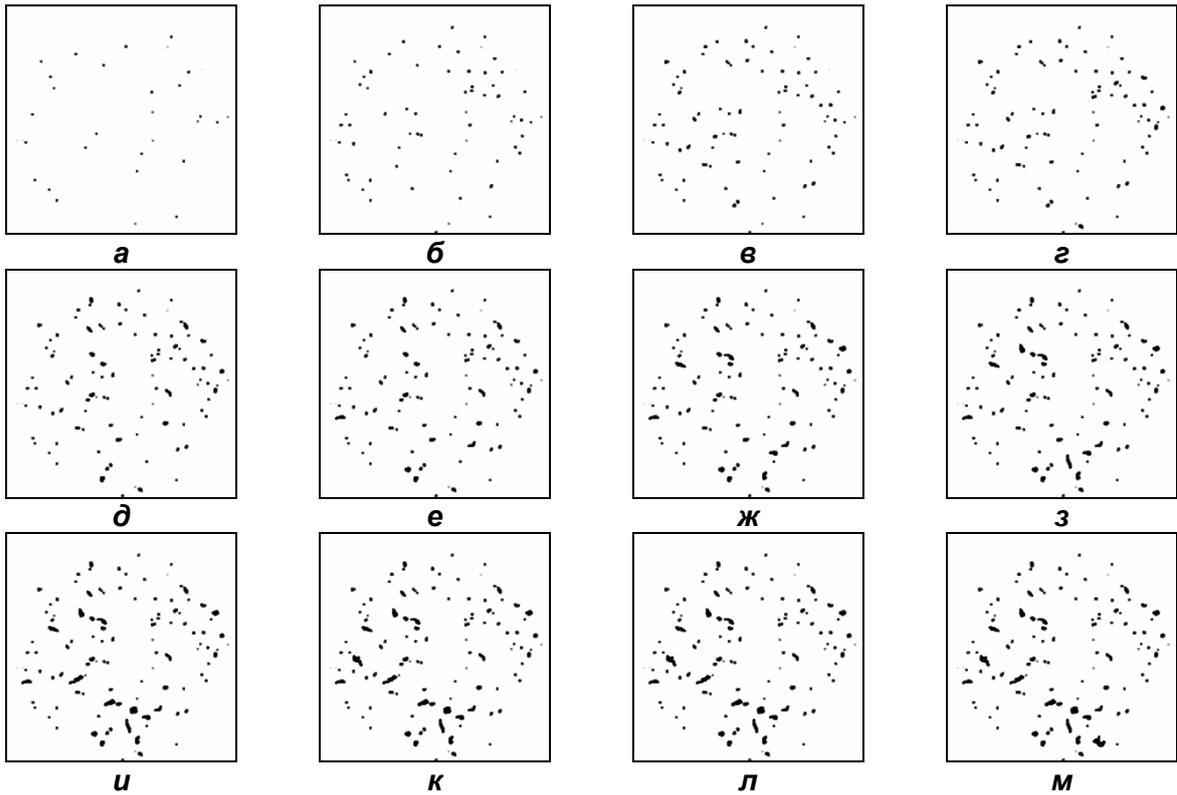


Рисунок 7. Изображения частиц в различных диапазонах значений их размеров, мкм (этап 3. 2):
а – ≤ 20 ; б – ≤ 30 ; в – ≤ 40 ; г – ≤ 50 ; д – ≤ 60 ; е – ≤ 70 ; ж – ≤ 80 ; з – ≤ 90 ; и – ≤ 100 ; к – ≤ 110 ; л – ≤ 120 ; м – ≤ 130

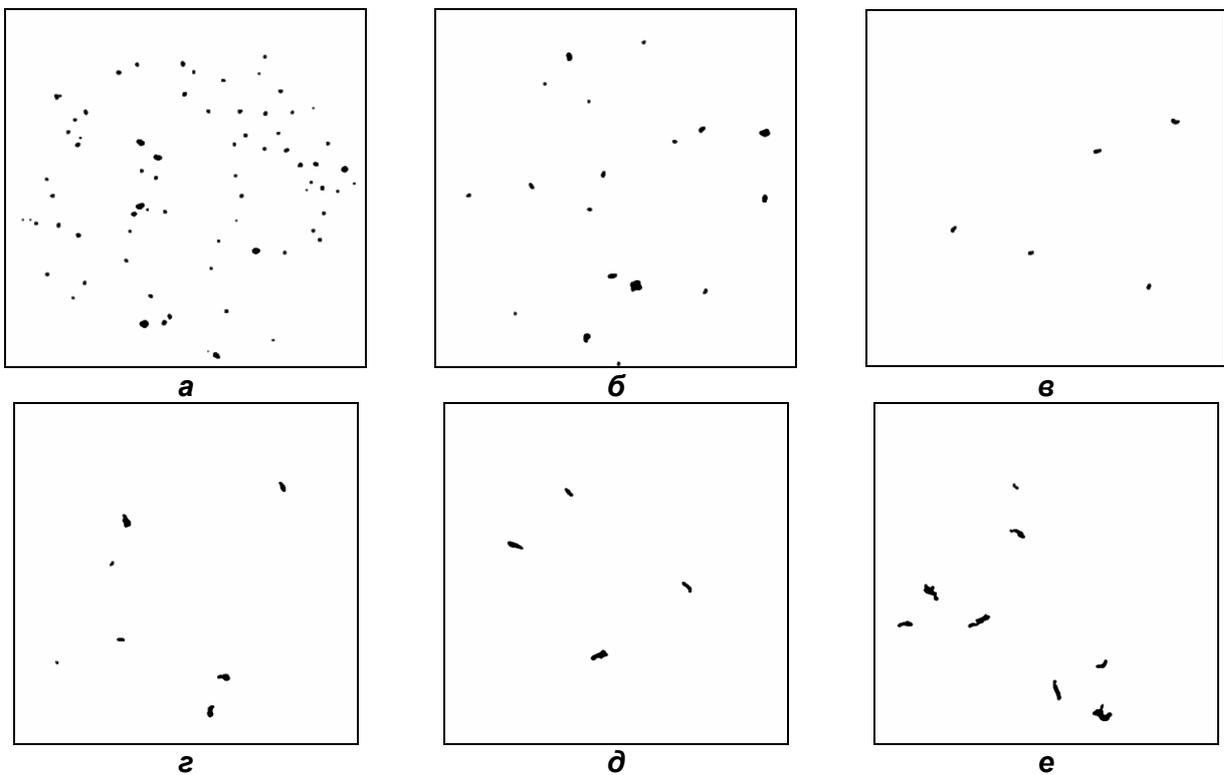


Рисунок 8. Изображения частиц в различных диапазонах значений их сферичности (этап 3. 2):
а – $0,91...1,0$; б – $0,81...0,9$; в – $0,71...0,8$; г – $0,61...0,7$; д – $0,51...0,6$; е – $0,31...0,5$

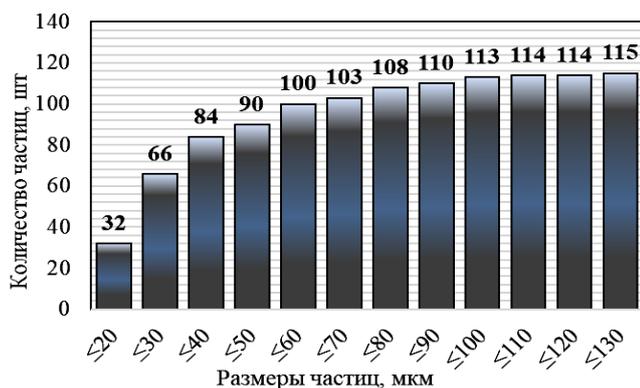


Рисунок 9. Гистограмма распределения частиц по размерам (этап 3. 2)

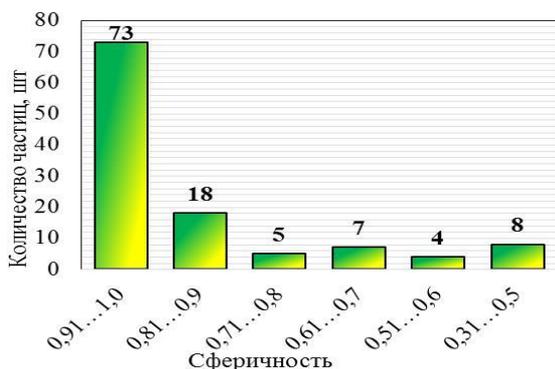


Рисунок 10. Гистограмма распределения частиц по сферичности (этап 3. 2)

Данный методический подход с использованием разработанного алгоритма, включающего три стадии: подготовку изображения, его сегментацию и анализ частиц, дает возможность определять размеры, количество и форму частиц по цифровым изображениям, позволяет отказаться от субъективного и трудоемкого анализа, в отличие от органолептических методов, и при этом может быть использован непосредственно в условиях предприятий АПК при проведении анализа изображений с высокой точностью за короткий промежуток времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Венцель, С.В. Применение смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М.: Химия, 1979. – 240 с.
2. Zhu, L. Qualitative Classification of Lubricating Oil Wear Particle Morphology Based on Coaxial Capacitive Sensing Network and SVM / L. Zhu [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 6653. – <https://doi.org/10.3390/s22176653>.
3. Standard Guide for Microscopic Characterization of Particles from In-Service Lubricants: ASTM D7684-11 (Reapproved 2020). – ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. – United States, 2020. – 10 p.

4. Корнеева, В.К. Мембранная фильтрация – эффективный метод оценки наличия механических примесей в моторном масле работающего ДВС / В.К. Корнеева [и др.] // Агропанорама. – 2024. – № 4. – С. 20-26.

5. Fitch, J.C. The Lubrication Field Test and Inspection Guide / J.C. Fitch // Noria Corporation. – 2000. – 36 p.

6. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 1. Колориметрические методы / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич // Агропанорама. – 2024. – № 6. – С. 29-36.

7. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 2. Цветовые модели и возможности их применения при колориметрических методах / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, В.В. Остриков // Агропанорама. – 2025. – № 1. – С. 29-36.

8. Ferreira, T. ImageJ user guide / Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.

9. Crawford, E.C. An ImageJ plugin for the rapid morphological characterization of separated particles and an initial application to placer gold analysis / E.C. Crawford, J.K. Mortensen // Computers & Geosciences. – 2009. – № 35. – P. 347-359.

10. Pico, D. Image Analysis for Simultaneous Determination of Spherical and Fibrous Particles / D. Pico, A. Bartl // Chemical Engineering Transaction. – 2011. – Vol. 24. – P. 619-624.

11. Tommaso, V. Image processing tools in the study of environmental contamination by microplastics: reliability and perspectives / V. Tommaso [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – № 30. – P. 298-309.

12. Chen, S. Quantification of microplastics by count, size and morphology in beverage containers using Nile Red and ImageJ / S. Chen [et al.] // Journal of Water and Health. – 2021. – № 19. 1. – P. 79-88.

13. Kumara, J. Image Analysis Techniques on Evaluation of Particle Size Distribution of Gravel / J. Kumara, K. Hayano, K. Ogiwara // International Journal of GEOMAT. – 2021. – № 3(1). – P. 290-297.

14. Xu, D. Microstructure and corrosion resistance of Al₃(Zr, Ti)/Al composite prepared by powder metallurgy // D. Xu, W. Long, X. Zhou // Advanced Composites Letters. – 2020. – Vol. 29. – P. 1-9.

15. Effect of debris size on the tribological performance of thermally sprayed coatings / K.A. Habib [et al.] // Tribology International. – 2020. – Vol. 143. – P. 106025. – <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106025>.

16. Qualitative Classification of Lubricating Oil Wear Particle Morphology Based on Coaxial Capacitive Sensing Network and SVM / L. Zhu [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 6653. – <https://doi.org/10.3390/s22176653>.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 24.03.2025

УДК 338.436.33

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-38-43>

РАЗВИТИЕ ЛОГИСТИКИ АПК В КОНТЕКСТЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

А.Л. Косова,

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

В статье представлены основные цифровые технологии, используемые в логистической деятельности агропромышленного комплекса (АПК) зарубежных стран. Систематизированы и обобщены нормативно-правовые документы, определяющие развитие логистики АПК с учетом цифровой трансформации экономики Республики Беларусь, а также практические примеры по результативному внедрению ее инструментов. Обоснован комплекс мероприятий по повышению эффективности использования логистики за счет расширения цифровых технологий.

Ключевые слова: логистика, цифровая трансформация, цифровые технологии, национальная экономика, агропромышленный комплекс, эффективность.

The article presents the main digital technologies used in the logistics activities of the agro-industrial complex (AIC) of foreign countries. The regulatory documents determining the development of logistics in the AIC, taking into account the digital transformation of the economy of the Republic of Belarus, as well as practical examples of the effective implementation of its tools are systematized and summarized. A set of measures to improve the efficiency of logistics by expanding digital technologies is substantiated.

Key words: logistics, digital transformation, digital technologies, national economy, agro-industrial complex, efficiency.

Введение

Повышение эффективности функционирования аграрного бизнеса Республики Беларусь в условиях трансформации национальной экономики требует поиска новых механизмов и методов обеспечения конкурентоспособности продукции и производителей. Как показывает опыт развитых стран, логистика является действенным экономическим инструментом, направленным на оптимизацию товарных, информационных и финансовых потоков, сокращение материальных запасов, обеспечение финансовой устойчивости и повышение эффективности функционирования субъектов хозяйствования на внутреннем и внешнем рынке. Применение комплексного подхода к организации ресурсного обеспечения субъектов АПК и продвижению их продукции на рынок (сегмент) на принципах логистики дает значительный экономический и социальный эффект.

Выполненные исследования показали, что научно-практические подходы и методические предложения по повышению эффективности агропромышленного производства, развитию национальной логистической системы, разработке и реализации сбытовой стратегии организациями АПК с использованием концепции логистики изложены в трудах отечественных и зарубежных ученых.

Среди зарубежных авторов – Б. Берман, М. Веббер, Ф. Котлер, К. Оливер, Дж. Р. Эванс, сформулировавшие категорию «логистика» как специфическую функцию управления и ее связь с маркетингом [1-3];

Д. Бауэрсокс, Д. Дж. Клосс, В. Купер, П. Ларсон, Д. Уотерс, разработавшие методические подходы к оценке эффективности поставок продукции на основе логистики [4-7].

Многие проблемы развития логистики в различных отраслях экономики, в том числе в АПК, представлены в трудах белорусских и российских ученых – В. Г. Гусакова, П. Г. Никитенко, Л. Н. Байгот, М. С. Байгот, В. И. Бельского, А. М. Гаджинского, М. И. Губского, Л. Ф. Догиля, П. А. Дроздова, И. А. Елового, А. Г. Ефименко, Т. Г. Зорина, Р. Б. Ивуть, Н. В. Киреенко, А. -Н. Д. Магомедова, А. Д. Молоковича, О. В. Мясникова, Л. В. Пакуш, И. И. Полешук, В. М. Пурлика [8-27]. Это позволило существенно развить теоретическую и методическую базу логистической деятельности, обосновать ее значимость при создании эффективного агропромышленного производства (концептуальные положения логистического управления, виды и направления товародвижения и др.).

Вместе с тем, подчеркивая значимость данных разработок, необходимо отметить, что они не в полной мере учитывают новые трансформационные процессы, происходящие в национальной экономике и обусловленные цифровизацией аграрного бизнеса (например, развитие электронной коммерции и торговли, рекламных и выставочно-ярмарочных мероприятий с применением современных информационно-коммуникационных технологий, др.). Все это обуславливает изменения экономической среды субъектов хозяйствования в части условий торговли и усиление рисков, свя-

занных с развитием национального рынка логистических услуг и его инфраструктуры, диверсификацией экспортных поставок, расширением аграрной товаропроводящей сети, повышением эффективности и финансовой устойчивости товаропроизводителей.

Необходимость решения обозначенной научной и практической проблемы определили цель данной статьи – обоснование направлений развития логистики АПК в контексте цифровой трансформации национальной экономики 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, Евразийского экономического союза (ЕАЭС). В ходе исследований применялись методы: монографический, системного и сравнительного анализа, графический, факторного анализа, экспертных оценок.

Основная часть

Логистика является одной из актуальных отраслей аграрного бизнеса, современное развитие которой основывается на инновационных технологиях, связанных с экономической безопасностью, скоростью, точностью и бесперебойностью доставок сельскохозяйственной продукции и продуктов питания до оптовых и конечных потребителей. Анализ зарубежных практик показал, что цифровизация логистики в АПК охватывает несколько ключевых направлений, включая:

1) автоматизацию производственно-сбытовых процессов на основе систем управления складом, транспортом и управления цепями поставок;

2) Интернет вещей, позволяющих проводить мониторинг состояния сельскохозяйственного сырья и продукции, контроля температуры и влажности на складах и в транспортных средствах;

3) большие данные и аналитику, на основе которых принимаются обоснованные управленческие решения, осуществляется прогноз спроса, предложения и цен, а также товарных запасов;

4) технологию блокчейна, практическое применение которой обеспечивает прозрачность и безопасность транзакций для отслеживания происхождения продуктов и соблюдения стандартов качества.

Внедрение данных направлений обеспечивает эффективное развитие, прибыльность и финансовую устойчивость организациям.

Понимая данную актуальность, следует отметить, что в 2024 г. рынок программного обеспечения в части управления цепочкой поставок достиг 20,27 млрд долл. США. По прогнозам, к 2028 г. он составит 4,19 млрд долл. США. Согласно исследованиям McKinsey, логистические организации инвестируют в технологии, чтобы снизить затраты и повысить производительность своих складов и транспортных сетей. Помимо получения конкурентного преимущества, это

также расширяет их возможности и гарантирует устойчивость этих изменений с течением времени.

Оценка практической деятельности организаций свидетельствует о том, что в странах уже имеются примеры успешного внедрения цифровых технологий в логистику АПК [28]. Так, государственная политика АПК сосредоточена на разных направлениях цифровизации: точное земледелие, цифровые финансовые услуги, развитие системы учета и управления данными, расширение поддержки информационных технологий и др. Национальный институт продовольствия и сельского хозяйства, который является органом федерального правительства США, подведомственным Министерству сельского хозяйства, в год инвестирует в общей сложности 15 млн долл. США в инструменты киберинформатики для продуктов питания и сельского хозяйства, из которых 10,4 млн долл. США направляется на проведение исследований в области анализа больших данных, машинного обучения, искусственного интеллекта и прогнозных технологий.

В Германии реализуются различные опытные решения, например, создание «цифровых полей» и экспертных групп при Федеральном министерстве продовольствия и сельского хозяйства, состоящих из представителей науки и бизнеса. Сейчас используются 14 «цифровых полей»: восемь – в области растениеводства, три – в животноводстве и три междисциплинарных опытных поля, на которых, в частности, апробируется использование нового стандарта мобильной широкополосной связи 5G в сельском хозяйстве. На 2021-2023 гг. министерством были выделены финансовые средства в размере более 50 млн евро.

В России ряд агрокомпаний начали использовать системы управления цепями поставок, что позволило сократить время доставки и снизить затраты на логистику. Внедрение систем автоматического полива на основе данных с датчиков влажности почвы обеспечило российским фермерам сокращение расхода воды на 30 %. Реализован также проект «Умная ферма», который включает в себя автоматизированные системы управления, IoT-устройства и аналитические платформы. Это позволило товаропроизводителям увеличить урожайность на 15 % и снизить затраты на 20 %.

Выполненный анализ показал, что в Республике Беларусь создана нормативно-правовая база, регулирующая развитие и функционирование логистического рынка с учетом цифровой трансформации экономики и соответствующая международным требованиям и правилам. Действующие законодательные документы по обеспечению логистической деятельности, в том числе в АПК, систематизированы по трем уровням: национальный, межгосударственный, международный (табл. 1).

Ключевые мероприятия по развитию логистики в АПК определены в Государственной программе «Аграрный бизнес на 2021 – 2025 годы» по направлению «Разработка, внедрение и сопровождение информационных технологий в агропромышленном комплексе» подпрограммы 9 «Обеспечение общих условий функционирования агропромышленного комплекса» и включают [29]:

Таблица 1. Нормативно-правовые документы, определяющие развитие логистики АПК с учетом цифровой трансформации экономики

№	Уровень, документ
Национальный уровень – Республика Беларусь	
<i>Общий блок, регулирующий аграрные отношения, обеспечение продовольственной безопасности и продовольственной независимости, инновационное и цифровое развитие</i>	
1	Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 02 февраля 2021 г. № 59 «О Государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы»
2	Указ Президента Республики Беларусь от 29 июля 2021 г. № 292 «Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы»
3	Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 15 декабря 2017 г. № 962 «О Доктрине национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 года»
4	Директива Президента Республики Беларусь от 04 марта 2019 г. № 6 «О развитии села и повышении эффективности аграрной отрасли»
5	Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2035 года
6	Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 02 февраля 2021 г. № 66 «О Государственной программе «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы»
7	Указ Президента Республики Беларусь от 15 сентября 2021 г. № 348 «О Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы»
<i>Специальный блок, определяющий основы и принципы формирования логистической системы</i>	
8	Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28 декабря 2017 г. № 1024 «Об утверждении Концепции развития логистической системы Республики Беларусь на период до 2030 года»
9	Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 24 февраля 2012 г. № 183 «Об утверждении Положения о товаропроводящей сети белорусских организаций за рубежом, классификатора видов поставок товаров, подлежащих учету при осуществлении экспортных операций, и признании утратившими силу некоторых постановлений Совета Министров Республики Беларусь»
10	Закон Республики Беларусь от 05 января 2009 г. № 10-3 «О товарных биржах»
11	Указ Президента Республики Беларусь от 19 октября 1999 г. № 614 «О защите национального рынка транспортно-экспедиционных услуг»
12	Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 марта 2021 г. № 165 «О Государственной программе «Транспортный комплекс» на 2021–2025 годы»
13	Приказ Министерства транспорта и коммуникаций от 25 февраля 2015 г. № 57-Ц: Стратегия инновационного развития транспортного комплекса Республики Беларусь до 2030 года
14	СТБ 2306-2013 «Услуги логистические. Общие требования и процедура сертификации»
<i>Межгосударственный уровень – Евразийский экономический союз</i>	
15	Договор о Евразийском экономическом союзе (Решение Высшего Евразийского экономического союза на уровне глав государств от 29 мая 2014 г., в ред. от 8 мая 2015 г.)
16	Концепция согласованной (скоординированной) агропромышленной политики государств – членов Таможенного союза и Единого экономического пространства (Решение Высшего Евразийского экономического союза на уровне глав государств от 29 мая 2013 г. № 35)
17	Рекомендация Коллегии ЕЭК о координации сбытовой и маркетинговой политики государств – членов Евразийского экономического союза в отношении экспорта сельскохозяйственной продукции и продовольствия от 22 декабря 2015 г. № 28
18	Рекомендация Коллегии ЕЭК о скоординированной политике в области развития биржевой торговли сельскохозяйственными товарами в рамках Евразийского экономического союза от 8 ноября 2016 г. № 19
19	Рекомендация Коллегии ЕЭК о согласованных действиях государств – членов Евразийского экономического союза в области развития экспортного потенциала сельскохозяйственной продукции и продовольствия от 13 декабря 2016 г. № 30
20	Решение Коллегии ЕЭК «О требованиях к подсистеме агропромышленного комплекса государств – членов Евразийского экономического союза в рамках интегрированной информационной системы Евразийского экономического союза и правилах взаимодействия по ее формированию» от 31 января 2017 г. № 18
21	Решение Высшего Евразийского экономического совета от 11 декабря 2020 г. № 12 «Стратегические направления развития евразийской экономической интеграции до 2025 года»
22	Решение Высшего Евразийского экономического совета от 25 декабря 2023 г. Декларация о дальнейшем развитии экономических процессов в рамках Евразийского экономического союза до 2030 года и на период до 2045 года «Евразийский экономический путь»
<i>Межгосударственный уровень – Содружество Независимых Государств</i>	
23	Соглашение о согласованном развитии международных транспортных коридоров, проходящих по территории государств – участников СНГ
24	Соглашение о сотрудничестве государств – участников СНГ в создании, использовании и развитии межгосударственной сети информационно-маркетинговых центров для продвижения товаров и услуг на национальные рынки
<i>Международный уровень</i>	
25	Соглашение по сельскому хозяйству ВТО
26	Классификатор транспортных услуг ВТО (ГАТС) и продукции МТСК

– полное и профилактическое сопровождение программного обеспечения информационной системы «Мониторинг технического обслуживания энергонасыщенной сельскохозяйственной техники» на базе информационно-поисковой системы «Машснаб»;

– актуализация баз данных информационно-поисковой системы «Техсервис» и государственной информационной системы «Информационно-поисковая система по ветеринарным препаратам», включая полное и профилактическое сопровождение информационно-поисковой системы «Агроснаб»;

– полное и профилактическое сопровождение автоматизированной информационной системы «Гостехнадзор»;

– актуализация базы данных программного комплекса «Бухстат»;

– мероприятия в сфере информатизации, направленные на реализацию общих процессов ЕАЭС и интеграции информационных систем государств – членов Евразийского экономического союза.

Наряду с этим, в рамках мероприятий подпрограммы «Цифровое развитие отраслей экономики» Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы», направленных на цифровую трансформацию производственных процессов и управления ими, предусматривается выполнение реинжиниринга и оптимизации бизнес-процессов отечественных предприятий с использованием передовых производственных технологий, соответствующих концепции «Индустрия 4.0», включая [30]:

создание «цифровых двойников» технологических и бизнес-процессов, выпускаемой (планируемой к производству) продукции;

внедрение платформенных решений для управления производством, активами предприятий, обеспечения накопления и обработки данных в режиме реального времени, использования систем поддержки принятия решений, инструментов предсказательной и отчетной аналитики;

развитие современных инструментов работы с заказчиками и поставщиками, каналов продвижения продукции и взаимодействия с клиентами.

На сегодняшний день в Беларуси активно развиваются проекты по внедрению Интернет вещей для мониторинга состояния сельскохозяйственной продукции в процессе хранения и транспортировки. С каждым годом все больше предприятий начинают выпуск техники, оснащенной элементами системы точного земледелия. Например, разбрасыватели минеральных удобрений (ОАО «Щучинский ремонтный завод»), трактор «БЕЛАРУС-3522» с бортовым компьютером управления, трактор «БЕЛАРУС-4522» с системой управления «Автопилот», опрыскиватели РОСА и ОВС-4224 с системой дифференцированного внесения КАС на основе карты поля, зерноуборочные комбайны КЗС-2124 с системой мониторинга урожайности.

Актуальным направлением логистической деятельности в АПК Беларуси является внедрение новых технологических инноваций для оптимизации процессов складирования и грузоперевозок. Современ-

ные склады оснащаются автоматическими системами хранения и перемещения грузов, что позволяет снизить затраты на трудовые ресурсы и сократить время обработки заказов.

Важной особенностью логистики АПК в Беларуси является необходимость обеспечения сохранности и качества сельскохозяйственной продукции в процессе всех транспортных операций. Логистические компании в стране активно работают над созданием и соблюдением оптимальных температурных и влажностных условий для сохранения качества продукции, помогая предотвратить порчу и потери при транспортировке.

Несмотря на положительные примеры, внедрение цифровых технологий в логистику, АПК в мировой и отечественной практике сталкивается с рядом проблем: во-первых, недостаток квалифицированных кадров, способных работать с новыми технологиями; во-вторых, высокие первоначальные инвестиции, что является проблемой для малых и средних предприятий; в-третьих, необходимость в модернизации инфраструктуры и обучении персонала, требующих дополнительных затрат; в-четвертых, неготовность работников к изменениям в производственных процессах, что требует дополнительного обучения и адаптации.

Исходя из этого, с целью повышения эффективности внедрения и использования цифровых технологий в логистику АПК необходимо:

– системная оценка существующих логистических процессов и выявление недостатков, которые могут быть оптимизированы с помощью цифровых технологий;

– научно обоснованная постановка целей по внедрению цифровых решений, предусматривающих снижение затрат, повышение скорости доставки или улучшение качества обслуживания;

– исследование доступных технологий и выбор наиболее подходящих для конкретных условий и задач компании на основе текущих потребностей и перспектив развития бизнеса;

– совершенствование системы обучения работников, включающего как начальную подготовку, так и последующее повышение квалификации;

– расширение инструментов поддержки разработки цифровых решений по повышению экономической эффективности и конкурентоспособности сельскохозяйственного производства посредством:

а) реализации грантовой поддержки в рамках специальных акселерационных программ для цифровых стартапов, имеющих перспективу внедрения в агропромышленном комплексе;

б) применения междисциплинарного подхода к реализации государственных научно-технических программ с привлечением к работе специалистов в области программирования для изучения перспектив цифровизации разрабатываемых технологий (решений) для сельского хозяйства, что упростит последующее «тиражирование» таких проектов.

Заключение

Выполненное обоснование направлений развития логистики АПК в контексте цифровой трансфор-

мации национальной экономики Республики Беларусь позволило получить следующие результаты:

1. Развитие цифровых технологий в логистике АПК Республики Беларусь имеет большой потенциал, но они требуют государственной поддержки и отраслевого взаимодействия. Установлено, что их внедрение способствует улучшению качества принимаемых управленческих решений, автоматизации сбора статистической информации, улучшению механизмов доставки продукции, доступность производителей к этим технологиям. При этом применение цифровых технологий в логистике становится важным инструментом для повышения экономической эффективности производства сельскохозяйственных товаров и конкурентоспособности субъектов хозяйствования. В то же время для развития логистики АПК в контексте цифровой трансформации экономики важно обеспечить надлежащий уровень развития традиционного сельского хозяйства.

2. Изучение международного опыта показало, что страны активно внедряют автоматизацию процессов (управление складами, управление транспортом), Интернет вещей (мониторинг состояния продукции, управление сельскохозяйственным производством), большие данные и аналитику (прогнозирование урожайности, оптимизация запасов), блокчейн (отслеживание происхождения товаров, управление контрактами). При этом со стороны разных государств наблюдается тенденция адресной поддержки организаций в виде предоставления грантов. Вместе с тем, как показывает опыт передовых стран, фундаментально важным считается поддержка информационно-коммуникационной инфраструктуры.

3. С целью повышения эффективности внедрения и использования цифровых технологий в логистику АПК необходимы: системная оценка существующих логистических процессов и их оптимизация с помощью цифровых технологий; научно обоснованная постановка целей по внедрению цифровых решений; исследование доступных технологий и выбор наиболее подходящих для конкретных условий и задач компании; совершенствование процесса обучения работников; расширение инструментов поддержки разработки цифровых решений по повышению экономической эффективности и конкурентоспособности сельскохозяйственного производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эванс, Дж. Р. Маркетинг / Дж. Р. Эванс, Б. Берман; пер. с англ. – М.: Сирин, 2000. – 308 с.
2. Oliver, K. Supply chain management: Logistics catches up with strategy / K. Oliver, M. Webber; in: Christopher M. (ed.) // *Logistics The Strategic Issues*. – London: Champan and Hall, 1982. – P. 63-75.
3. Котлер, Ф. Маркетинг. Менеджмент / Ф. Котлер, К.Л. Келлер. – СПб.: Питер Пресс, 2014. – 800 с.
4. 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.

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

6. Chartes, A. Measuring the Efficiency of Decision Making Units / A. Chartes, W.W. Cooper, E. Rhones // *European Journal of Operation Research*. – 1978. – № 3. – P. 429-444.

7. Larson, P. Supply chain management: definition growth and approaches / P. Larson, D. Rogers // *Journal of Marketing Theory and Practice*. – 1998. – № 3. – P. 1-5.

8. Гусаков, В.Г. Агропромышленный комплекс Беларуси в условиях трансформационной экономики / В.Г. Гусаков, А.П. Шпак // *Белорус. экон. журнал*. – 2018. – № 4. – С. 45-64.

9. Никитенко, П. Формирование и развитие ТПС: научный подход / П. Никитенко // *Товаропроводящая сеть Респ. Беларусь*. – 2007. – № 3. – С. 30-34.

10. Байгот, Л. Зарубежный опыт создания и функционирования информационно-консультационных служб в сельском хозяйстве / Л. Байгот, Н. Киреенко // *Агрэоэкономика*. – 1999. – № 10. – С. 3-5.

11. Байгот, М.С. Механизмы регулирования внешнеэкономической деятельности Беларуси в аграрной сфере: вопросы теории, методологии, практики / М.С. Байгот; под ред. В. Г. Гусакова. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 367 с.

12. Бельский, В.И. Механизм сбалансированного развития внешней торговли агропродовольственными товарами Беларуси в рамках ЕАЭС / В.И. Бельский, Н.В. Карпович. – Минск: Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2019. – 199 с.

13. Гаджинский, А.М. Логистика / А.М. Гаджинский. – М.: Дашков и К°, 2012. – 484 с.

14. Губский, М.И. Логистика в Республике Беларусь: проблемы институционализации / М.И. Губский // *Проблемы управления*. – 2009. – № 3 (22). – С. 199-202.

15. 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.

16. Дроздов, П.А. Основы логистики в АПК: учебник / П.А. Дроздов. – 2-е изд. – Минск: Изд-во Гревцова, 2013. – 288 с.

17. Еловой, И.А. Формирование транспортно-логистической системы Республики Беларусь: учеб.-метод. пособие / И.А. Еловой, А.А. Евсюк, В.В. Ясинский; Министерство образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 155 с.

18. Ефименко, А.Г. Формирование рыночной системы автотранспортного обслуживания АПК / А.Г. Ефименко. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 224 с.

19. Зорина, Т.Г. Современная парадигма логистического потенциала региона / Т.Г. Зорина, В.Э. Зубков // *Научные труды Белорусского государ-*

ственного экономического университета / [редкол.: В.Н. Шимов (гл. ред.) и др.]; Министерство образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. экон. ун-т. – Минск: БГЭУ, 2019. – Вып. 12. – С. 200-209.

20. Ивуть, Р.Б. Развитие транзитного потенциала Республики Беларусь в условиях формирования ее транспортно-логистической системы / Р.Б. Ивуть, А.Ф. Зубрицкий, А.С. Зиневич // Новости науки и технологий. – 2015. – № 1. – С. 19-33.

21. Киреенко, Н.В. Теория и методология формирования сбытовой системы в новых условиях хозяйствования (на примере АПК Республики Беларусь): автореф. дис. ... д-ра экон. наук: 08.00.05 / Киреенко Наталья Владимировна; Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси. – Минск, 2017. – 64 с.

22. Научные основы развития инфраструктуры товаропроводящей сети агропродовольственного рынка / А.-Н.Д. Магомедов [и др.]. – М.: Изд-во ИП Насирддинова В.В., 2012. – 147 с.

23. Молокович, А.Д. Формирование новых транспортных коридоров в проекте «Шелковый путь» / А. Д. Молокович, В.А. Лукша // Логистические системы и процессы в условиях экономической нестабильности: материалы III межд. заочной науч.-практ. конф., Минск, 26-27 нояб. 2015 г. / Ин-т бизнеса БГУ. – Минск, 2015. – С. 232-237.

24. 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.

25. Пакуш, Л.В. Формирование логистической системы в свеклосахарном подкомплексе в Республике Беларусь / Л.В. Пакуш, Е.В. Кокиц. – Горки: БГСХА, 2019. – 218 с.

26. Полещук, И.И. Логистический потенциал Беларуси: его оценка и использование / И.И. Полещук // Белорус. экон. журнал. – 2013. – № 3. – С. 87-97.

27. Пурлик, В.М. Логистика торгово-посреднической деятельности / В.М. Пурлик. – М.: Высшая школа, 1995. – 202 с.

28. Международный опыт развития цифровизации в АПК: государственная поддержка, регулирование, практика. – URL: <https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/d62/Mezhdunarodnyy-opyt-razvitiya-tsifrovizatsii-v-APK-gosudarstvennaya-podderzhka-regulirovanie.pdf> (дата обращения: 02.02.2025).

29. О Государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 1 февр. 2021 г. № 59. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100059> (дата обращения: 02.02.2025).

30. О Государственной программе «Цифровое развитие Беларуси» на 2021-2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 2 февр. 2021 г. № 66. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100066> (дата обращения: 02.02.2025).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.02.2025

Навесной оборотный плуг ПНО-3-40/55



Плуг навесной оборотный ПНО-3-40/50 предназначен для гладкой вспашки старопахотных не засоренных камнями почв с удельным сопротивлением до 0,09 МПа. Плуг агрегируется с тракторами класса 2,0 («Беларус 1221»).

Преимущества разработки:

- регулируемая ширина захвата;
- цена на 30-40% ниже зарубежных аналогов.

гов.

Производство плугов освоено на ДП «Минойтовский ремонтный завод».

В 2010 году на сельскохозяйственной выставке в г. Москве плуг удостоен золотой медали.

Основные технические данные

Тип.....	навесной
Тип корпуса.....	полувинтовой
Производительность за 1 ч сменного времени, га.....	0,65...1,14
Конструкционная ширина захвата корпуса, мм.....	400/450/500/550
Рабочая скорость движения на основных операциях, км/ч.....	7...9
Масса плуга конструкционная, кг.....	не более 1150
Конструкционная ширина захвата плуга, м.....	1,20/1,35/1,50/1,65

УДК 330.15

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-44-48>

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ КОММЕРЧЕСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ АГРАРНОГО БИЗНЕСА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: МЕЖДУНАРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ, НАЦИОНАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И АДАПТАЦИОННЫЕ СТРАТЕГИИ

О.А. Балабанович,

доцент каф. экономики и управления БГЭУ, канд. экон. наук, доцент

В статье выделены подходы к оценке устойчивого развития организаций с учетом международных стандартов ESG и национальных ограничений. Проанализированы проблемы внедрения существующих методик в экономической среде аграрного бизнеса Республики Беларусь, включая регуляторные барьеры, санкционные ограничения и финансовые препятствия. Изучены российские и китайские альтернативные модели устойчивого развития, выявлены их преимущества и недостатки в контексте белорусской экономики. Предложены рекомендации по формированию эффективных инструментов оценки устойчивого развития, ориентированных на повышение прозрачности корпоративного управления и укрепление инвестиционной привлекательности коммерческих организаций.

Ключевые слова: устойчивое развитие, ESG, GRI, SASB, ESG-рейтинги, международные стандарты, национальная методология.

The article highlights approaches to assessing the sustainable development of organizations taking into account international ESG standards and national restrictions. The problems of implementing existing methods in the economic environment of the agrarian business in the Republic of Belarus, including regulatory barriers, sanctions restrictions and financial obstacles are analyzed. Russian and Chinese alternative models of sustainable development are studied; their advantages and disadvantages in the context of the Belarusian economy are identified. Recommendations on the formation of effective tools for assessing sustainable development, aimed at improving the transparency of corporate governance and strengthening the investment attractiveness of commercial organizations are proposed.

Key words: sustainable development, ESG, GRI, SASB, ESG ratings, international standards, national methodology.

Введение

Современные тенденции экономического развития свидетельствуют о возрастающей значимости концепции устойчивого развития (УР) как ключевого принципа стратегического управления коммерческими организациями, в том числе и в аграрном бизнесе. Данный подход основан на необходимости сбалансированного развития экономической, социальной и экологической сфер, что обуславливает трансформацию корпоративных стратегий и бизнес-моделей в соответствии с принципами УР. При этом важным инструментом для принятия стратегических решений, повышения прозрачности деятельности и привлечения инвестиций является оценка УР организаций.

В условиях глобальной экономики и усиливающейся регуляторной нагрузки возрастают требования к интеграции принципов ESG (Environmental, Social, Governance) в корпоративное управление. В современном виде ESG-принципы впервые сформулировал бывший генеральный секретарь ООН Кофи Аннан, когда предложил топ-менеджерам крупных мировых компа-

ний включать данные принципы в свои стратегии. Развитие международного права и международных стандартов деятельности компаний в области производства, логистики, экспорта-импорта показывает, что в ближайшем будущем мировые фонды перестанут инвестировать в компании, которые игнорируют принципы УР [1].

Анализ отмеченных проблем представляет собой одну из самых важных задач в современной научной и практической сфере, привлекающую внимание широкого круга ученых. Однако исследования, учитывающие отраслевую специфику, остаются недостаточно представленной частью научной литературы.

Особенности УР сельскохозяйственных организаций частично рассмотрены в трудах таких российских ученых, как Е.В. Барышевский [2], И.Н. Буздалов [3], В.Т. Водяников [4], А.А. Золотарев [5], Н.В. Медяник [6] и других. Разработке отдельных теоретико-методических положений УР сельского хозяйства посвятили свои исследования белорусские ученые, среди которых В.Г. Гусаков, А.П. Шпак, А.С. Сайганов, М.Н. Антоненко, Н.А. Бычков,

И.А. Казакевич, П.В. Расторгуев, Н.И. Соловцов, Т.Л. Савченко [7], Н.В. Киреенко [8], Г.И. Гануш, А.В. Чирич, А.А. Бурачевский [9]. В то же время, по мнению В.А. Гузей [10], из 50 диссертаций, посвященных теме УР, защищенных в период с 2017 г. по 2024 г., ни одна не затрагивает аналитические аспекты данной проблематики, что подчеркивает необходимость дальнейшего развития методологии предмета исследования. Таким образом, проблема унифицированного методического подхода к оценке УР организаций в Беларуси остается нерешенной.

Исходя из этого, цель данной статьи состоит в изучении теоретико-методических основ оценки УР коммерческих организаций и обосновании национального подхода, включающего эффективные механизмы мониторинга и управления корпоративной устойчивостью в аграрном бизнесе Республики Беларусь.

Материалы и методы исследования

В работе использованы комплексный и системный подходы к изучению методических аспектов оценки УР. Эмпирическую базу составили нормативно-правовые акты и стратегические документы Республики Беларусь, касающиеся вопросов оценки УР организаций, официальные статистические данные и аналитические отчеты международных организаций. Методология исследования включала структурно-функциональный анализ существующих рейтинговых систем и их применимость в условиях национальной экономики.

Основная часть

Аграрный бизнес является стратегически значимой отраслью национальной экономики, обеспечивая продовольственную безопасность, формируя основу для устойчивого социально-экономического развития и демонстрируя адаптивность в условиях санкцион-

ного давления и глобальных кризисов. Высокая степень его интеграции, включающая производство, переработку, логистику и сбытовую инфраструктуру, требует современных подходов к управлению, что актуализирует необходимость внедрения международных стандартов УР.

Трансформация аграрного бизнеса в соответствии с международными стандартами и ESG рейтингами способна повысить инвестиционную привлекательность отрасли, усилить ее конкурентоспособность на мировых рынках и обеспечить долгосрочную устойчивость в условиях меняющихся экономических процессов.

Для оценки УР применяются различные методики и инструменты, помогающие формировать стратегию долгосрочного развития (табл. 1).

Международные стандарты и рейтинги ESG, ориентированные на рыночные экономики с высокой степенью интеграции в глобальные финансовые потоки, несмотря на глобальное распространение, сталкиваются с трудностями при попытке адаптации в национальной экономике, включая АПК. Это связано с различиями в институциональных, нормативных и экономических условиях, характерных для национальной экономики. В связи с этим существующие методики оценки УР требуют существенной доработки, с учетом специфики белорусской экономической среды.

В этой связи ключевым направлением становится разработка национальной системы оценки УР, которая, с одной стороны, интегрировала бы лучшие международные практики, а с другой – учитывала национальную специфику и стратегические приоритеты государства.

В данном контексте автором предлагается использовать адаптированные версии методик (так как международные инструменты формально неприменимы): разрабатывать внутренние корпоративные стандарты УР, основанные на лучших практиках GRI и ESG, но

Таблица 1. Методики и инструменты оценки устойчивого развития

№	Параметр	Описание	Методология	Преимущества	Недостатки
<i>1. Международные стандарты и методики:</i>					
1.1	Глобальная инициатива по отчетности (GRI)	Один из самых распространенных стандартов нефинансовой отчетности. Включает экологические, социальные и управленческие показатели (ESG). Обеспечивает сравнимость данных между компаниями	GRI основан на принципах существенности, заинтересованных сторон, устойчивого развития и полноты раскрытия данных. Компании составляют отчеты, соответствующие международным требованиям, обеспечивая прозрачность и подотчетность	Гибкость в применении для различных отраслей, сопоставимость отчетов	Сложность внедрения для малых и средних организаций; подготовка отчетности требует значительных затрат на сбор и анализ данных; стандарт GRI не отражает влияние устойчивости на финансовые результаты организации
1.2	Цели устойчивого развития ООН (SDGs)	Компании оценивают свою деятельность по 17 глобальным целям ООН, направленным на ликвидацию бедности и социального неравенства, борьбу с изменением климата. Многие западные компании разрабатывают свою ESG-стратегию на основе SDGs	Оценка производится по направлениям: экология (выбросы углерода, управление отходами, энергоэффективность);	Глобальное признание; ориентация на долгосрочные стратегии	Отсутствие четких критериев оценки
1.3	ESG-рейтинги	Оценивают уровень экологической, социальной и управленческой ответственности компаний. Ключевые	Оценка производится по направлениям: экология (выбросы углерода, управление отходами, энергоэффективность);	Применяются инвесторами для оценки рисков; подходят для	Разные методики расчета у различных агентств, что затрудняет сравнение; компании могут манипулировать

Продолжение таблицы 1.

№	Параметр	Описание	Методология	Преимущества	Недостатки
		агентства (Sustainalytics, S&P Global, MSCI ESG Ratings, Moody's ESG, FTSE4Good) анализируют по критериям устойчивого развития	социум (права работников, инклюзивность, взаимодействие с обществом); управление (структура совета директоров, антикоррупционные меры, прозрачность отчетности)	компаний любого масштаба	отчетностью, улучшая рейтинг без реальных изменений
1.4	ISO 14001 (экологический менеджмент) и ISO 26000 (социальная ответственность): оценивают воздействие на окружающую среду и социальную ответственность				
<i>2. Индексы и рейтинги устойчивого развития</i>					
2.1	Dow Jones Sustainability Index (DJSI)	Один из ведущих мировых индексов, который отслеживает финансовую устойчивость, а также аспекты экологии, социальной политики и корпоративного управления	Анализирует около 600 показателей (корпоративное управление, экологическая политика, социальные факторы); оценивает компании в сравнении с конкурентами	Высокая репутация среди инвесторов	Подходит для крупных корпораций; большие затраты на аудит; методологию оценки критикуют за недостаточную прозрачность и сложности в оценке реальной устойчивости
2.2	Рейтинги CDP (Carbon Disclosure Project) оценивают информацию о выбросах CO ₂ и климатические рисками. FTSE4Good Index включает компании с высокими показателями ESG. MSCI ESG Ratings анализирует корпоративные риски и возможности, связанные с устойчивым развитием				
<i>3. Корпоративные методики и инструменты</i>					
3.1	Методика Triple Bottom Line (TBL)	Оценка бизнеса по трем показателям: People (люди), Planet (планета), Profit (прибыль)	Оцениваются количественные и качественные показатели (например, объем выбросов CO ₂ , уровень удовлетворенности сотрудников и др.); анализируется интеграция устойчивого развития в стратегию компании.	Ориентирована на баланс экономических, социальных и экологических факторов	Сложность (невозможность) количественной оценки
3.2	SASB (Sustainability Accounting Standards Board)	Организация, разрабатывающая стандарты для корпоративной отчетности по вопросам устойчивого развития. SASB ориентирован на предоставление инвесторам информации о финансовых рисках, связанных с экологическими, социальными и управленческими факторами. Методология адаптирована к 77 отраслям экономики		Интеграция с финансовыми показателями; адаптация к конкретным отраслям	Сложность использования без финансовых знаний; требует значительных ресурсов для реализации; стандарты SASB не имеют универсального применения по сравнению с GRI
3.3	Методики оценки углеродного следа (GHG Protocol, TCFD) позволяют оценить воздействие на климат и разработать стратегию декарбонизации				
3.4	Методики оценки социального воздействия (SROI – Social Return on Investment) оценивают социальную и экономическую ценность проектов				
<i>4. Государственные и отраслевые подходы</i>					
4.1	Таксономия ЕС по устойчивому финансированию определяет, какие виды деятельности можно считать экологически устойчивыми				
4.2	Зеленые облигации и устойчивое финансирование – финансовые инструменты, привлекающие капитал в проекты устойчивого развития				
4.3	Национальные стратегии устойчивого развития (например, стратегия ESG в России, Китае, США, ЕС) – государственные программы, регулирующие деятельность бизнеса в сфере устойчивого развития				
<i>Примечание. Составлена автором на основе источников [11-19]</i>					

без дорогостоящих сертификаций; применять методологию TBL для внутреннего аудита воздействия бизнеса на экономику, экологию и общество.

В развитие этого необходимо рассматривать (ввиду экономической интеграции) альтернативные модели УР (табл. 2) [20-26].

Так, российская модель УР ориентирована на национальные интересы и учитывает особенности экономики, в которой преобладают крупные госкорпорации и сырьевой сектор. Основные ее принципы предусматривают фокус на энергоэффективность и импортозамещение вместо глобального экологического регулирования, поддержку со стороны государ-

ства – ESG; ориентацию на российские рейтинги и стандарты (Национальный ESG-стандарт, ESG-индекс).

В свою очередь, китайская модель ESG поддерживается государством, встроена в стратегию национального развития и служит инструментом государственного управления экономикой. Она является частью долгосрочной государственной политики, направленной на модернизацию экономики, усиление контроля над бизнесом и достижение национальных стратегических целей. Основными ее принципами являются: «экологическая цивилизация» (Green China) – национальная стратегия низкоуглеродного

Таблица 2. Отличия российской и китайских методик оценки УР от западных

№	Параметр	Западные ESG (MSCI, GRI, SASB)	Российская модель (РСПП, Банк России)	Китайская модель ESG
1	Кто регулирует	Частные компании и инвесторы	Государство	
2	Оценка	Международные рейтинги (MSCI, Sustainalytics)	Национальные рейтинги (РСПП, Эксперт РА)	Государственные рейтинговые агентства
3	Финансирование	Частные инвесторы и банки	Государственная поддержка, госбанки	
4	Регулирование	Жесткие экологические требования, низкоуглеродная повестка	Энергоэффективность и импортозамещение	Национальная стратегия низкоуглеродного развития
5	Прозрачность	Полное и обязательное раскрытие данных, открытые ESG-отчеты	Частичное раскрытие данных, добровольная отчетность	Ограниченное раскрытие, государственный контроль

Примечание. Составлена автором на основе источников [19-26]

развития, государственное регулирование ESG, цифровизация и Big Data.

Республика Беларусь активно работает с зарубежными партнерами (ЕАЭС, ЕС, Китай, страны СНГ). Жесткая государственная система ESG может усложнить интеграцию белорусских компаний в международные цепочки поставок и создать барьеры для экспорта. Также стоит принимать во внимание, что обе модели ориентированы на крупные компании [27-29] и некоторые западные партнеры могут не признавать российские и китайские ESG-стандарты.

В основу формирования национальной системы оценки УР автором предлагается положить методологию Российского союза промышленников и предпринимателей (РСПП), учитывающую национальные интересы субъектов хозяйствования, обеспечивая более релевантные оценки для бизнеса, делающую акцент на социальные факторы, включая уровень занятости, социальную политику, развитие регионов и корпоративное управление. Для Республики Беларусь, где важную роль играет социально ориентированная экономика [30-33], подобный подход позволит опираться на национальные программы социальной поддержки и создать более сбалансированную систему оценки УР организаций.

Аграрный бизнес выполняет не только производственные, но и социальные функции, обеспечивая занятость на сельских территориях, развитие инфраструктуры и поддержание жизнедеятельности малых населенных пунктов. Методология РСПП уделяет особое внимание социальной составляющей, что позволит учитывать вклад аграрных организаций в развитие регионов и повышение качества жизни сельского населения. Кроме того, она предлагает сбалансированный подход, учитывающий как необходимость экологической модернизации, так и экономическую реальность сельхозпроизводителей, что позволяет проводить разумные экологические реформы без ущерба для конкурентоспособности отрасли.

Беларусь и Россия находятся в процессе углубления интеграции в рамках Союзного государства и ЕАЭС. Использование схожего подхода к оценке УР упростит привлечение инвестиций, гармонизирует регулирование и повысит прозрачность взаимного сотрудничества. Это особенно актуально в условиях международной турбулентности, когда независимые механизмы оценки бизнеса становятся стратегически важными.

Заключение

Таким образом, анализ международных методик (GRI, SASB, ESG-рейтинги) показал их высокую значимость для корпоративного управления и стратегического планирования. Однако их применение в Беларуси ограничено из-за геополитических, экономических и законодательных факторов. В связи с этим требуется адаптация существующих стандартов или разработка национального методического инструментария, который учитывал бы национальные экономические и социальные интересы и обеспечивал объективную оценку УР организаций.

Установлено, что практический интерес представляет российская (фокусирующаяся на государственном регулировании и импортозамещении) и китайская (интегрированная в стратегию государственного планирования) модели. Для основы формирования белорусской системы оценки УР предложено использовать основные положения и принципы методологии РСПП, применение которых позволит внедрить отраслевые стандарты оценки УР, механизмы государственной поддержки устойчивого аграрного бизнеса, единую систему нефинансовой отчетности, а также обеспечить гармонизацию национальной модели с российскими и китайскими аналогами для упрощения интеграции в региональные рынки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Берендеева, А.Б. Институциональная среда устойчивого развития и ESG-трансформации российской экономики: мега-, макро-, мезо- и микроуровни (статья 2) / А.Б. Берендеева // Теоретическая экономика. – 2024. – № 2. – С.92-115.
2. Баришевский, Е.В. Оценка устойчивости развития сельскохозяйственного производства с учетом изменения внешней среды / Н.В. Быковская, Е.В. Баришевский // Russian Journal of Management. – 2021. – Т. 9. – № 3. – С. 136-140.
3. Буздалов, И.Н. Методологические аспекты устойчивости сельского развития / И.Н. Буздалов // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2017. – № 6. – С. 2-4.
4. Водяников, В.Т. Показатели и пути повышения устойчивости развития молочного скотоводства /

- В.Т. Водяников, Д.И. Дородных // Вестник Федерального гос. образовательного учреждения высш. проф. образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». – 2017. – № 3 (79). – С. 59-65.
5. Золотарев, А.А. Оценка устойчивости развития сельскохозяйственного предприятия на основе экономического анализа активов и капитала / А. А. Золотарев, Д.Г. Бадмаева // Петербургский экономический журнал. – 2020. – № 1. – С. 88-98.
6. Медяник, Н.В. Формирование сбалансированной системы индикаторов для оценки степени достижения целей устойчивого развития в национальной агропродовольственной системе / Н.В. Медяник, О.А. Чередниченко, Н.А. Довготько // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2021. – № 12-1. – С. 132-142.
7. Современные проблемы устойчивого развития АПК: вопросы теории и методологии / В.Г. Гусаков [и др.]; под ред. В.Г. Гусакова. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2017. – 129 с.
8. Киреенко, Н.В. Устойчивые продовольственные системы: мировая практика и опыт государств – членов Евразийского экономического союза / Н.В. Киреенко // Белорусский экономический журнал. – 2021. – № 1. – С. 70-86.
9. Гануш, Г.И. Перспективы устойчивого развития сельского хозяйства Республики Беларусь / Г.И. Гануш, А.В. Чирич, А.А. Бурачевский // Агропанорама. – 2024. – № 4. – С. 30-35.
10. Гузей, В.А. Теоретические, методологические и целевые установки системы анализа устойчивого развития субъектов предпринимательства / В.А. Гузей // Социальное предпринимательство и корпоративная социальная ответственность. – 2023. – Т. 4. – С. 75-86.
11. Carbon Disclosure Project. CDP Standards. – URL: <https://www.cdp.net> (date of access: 13.12.2024).
12. Global Reporting Initiative. GRI Standards. – URL: <https://www.globalreporting.org> (date of access: 13.12.2024).
13. International Integrated Reporting Council. The International Integrated Reporting Framework. – URL: <https://integratedreporting.org> (date of access: 13.12.2024).
14. MSCI. ESG Ratings Methodology. – URL: <https://www.msci.com/esg-ratings> (date of access: 13.12.2024).
15. Sustainability Accounting Standards Board. SASB Standards. – URL: <https://www.sasb.org> (date of access: 13.12.2024).
16. Sustainalytics. ESG Ratings. – URL: <https://www.sustainalytics.com/esg-ratings> (date of access: 13.12.2024).
17. United Nations. Sustainable Development Goals (SDGs). – URL: <https://sdgs.un.org> (date of access: 13.12.2024).
18. United Nations Global Compact. The Ten Principles of the UN Global Compact. – URL: <https://www.unglobalcompact.org> (date of access: 13.12.2024).
19. World Bank. ESG Indicators and Sustainable Finance. – URL: <https://www.worldbank.org> (date of access: 13.12.2024).
20. Bank of China. ESG Reporting Guidelines. – URL: <http://www.boc.cn> (date of access: 01.02.2025).
21. China Environmental Protection Fund. Recommendations on Corporate Environmental Reporting. – URL: <http://www.cepf.org.cn> (date of access: 01.02.2025).
22. Chinese Environmental Management Certification Committee. – URL: <http://www.cems.org.cn> (date of access: 01.02.2025).
23. People's Bank of China. Green Finance Taxonomy. – URL: <http://www.pbc.gov.cn> (date of access: 01.02.2025).
24. Shanghai Stock Exchange. ESG Reporting Standards. – URL: <http://www.sse.com.cn> (date of access: 01.02.2025).
25. Банк России. Рекомендации по ESG-финансированию. – URL: <https://www.cbr.ru> (дата обращения: 01.02.2025).
26. Российский Союз Промышленников и Предпринимателей (РСПП). Методика внедрения корпоративной социальной ответственности. – URL: <https://www.rspp.ru> (дата обращения: 01.02.2025).
27. Wong, W.C. Does ESG Certification add Firm Value? / W.C. Wong, J.A. Batten, A.H. Ahman [et al.] // Finance Research Letters. – 2021. – Vol. 39. – P. 101.
28. Артемьев, Н.В. Устойчивое развитие Российской Федерации в условиях глобальных вызовов и угроз экономической безопасности / Н.В. Артемьев, А.Д. Петров, М.Ю. Маковецкий [и др.]. – М.: Московский университет им. С.Ю. Витте, 2023. – 189 с.
29. Мещерякова, Т.С. Экосистема промышленного предприятия в условиях ESG-трансформации / Т.С. Мещерякова, М.В. Черняев // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17. – № 12. – С. 1747-1756.
30. Госстандарт Республики Беларусь. Стандарты в области устойчивого развития. – URL: <http://www.gosstandart.gov.by> (дата обращения: 20.11.2024).
31. Министерство экономики Республики Беларусь. Программы устойчивого развития. – URL: <http://www.economy.gov.by/ru> (дата обращения: 20.11.2024).
32. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Отчеты по устойчивому развитию. – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 20.11.2024).
33. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г. / Министерство экономики Республики Беларусь. – URL : <http://www.economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNP/A/Kontseptsiya-na-sajt.pdf> (дата обращения: 20.11.2024).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.03.2025

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

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

ФАКУЛЬТЕТ «ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК»

**РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«БЕЛАГРОСЕРВИС»**

Уважаемые коллеги!

**Приглашаем Вас принять участие в работе
Международной научно-практической конференции,
посвященной 25-летию образования факультета
«Технический сервис в АПК»**

***«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ
И ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА В АПК»***,
которая состоится в Белорусском государственном
аграрном техническом университете

4 - 5 июня 2025 г.

Основные направления работы конференции:

- **Современные тенденции развития технического сервиса в АПК**
- **Инновации в проектировании и производстве машин и оборудования для АПК**
- **Охрана труда, защита населения и окружающей среды**
- **Духовное и физическое развитие современной молодежи в контексте образовательного процесса**

г. Минск, пр-т Независимости, 99, корпус 1

Контактные телефоны:

(+375-17) 323-44-64; 272-12-54; 373-83-74; 272-81-15

**E-mail: dekanat.fts@bsatu.by
dekanatfts.conf2025@gmail.com**

