



# Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
Основан в 2007 году

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ АГРОИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ВИМ»

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций  
(РОСКОМНАДЗОР)  
Свидетельство ПИ № ФС77-84201  
от 22 ноября 2022 г.

Журнал включен в перечень изданий,  
рекомендованных ВАК РФ для публи-  
кации трудов соискателей ученых  
степеней кандидата и доктора наук по  
специальностям: 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 /  
5.6.6.

Журнал включен в Российский индекс  
научного цитирования (РИНЦ)

Полные тексты статей  
размещены на сайте электронной  
научной библиотеки: <http://elibrary.ru>

Охраняется законом РФ № 5351-1  
«Об авторском праве и смежных правах» от 9 июля  
1993 года. Контент распространяется под лицен-  
зией Creative Commons Attribution 4.0 License. На-  
рушение закона будет преследоваться в судебном  
порядке.

#### НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:

В.В. Бижаев,  
Г.В. Быковская,  
Л.А. Горелова,  
Р.М. Нурбагандова  
Перевод – Светлана Сорокина

#### АДРЕС РЕДАКЦИИ:

109428, Москва,  
1-й Институтский проезд, 5, стр. 1.  
Телефоны: (499) 174-88-11  
(499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>  
e-mail: [smit@vim.ru](mailto:smit@vim.ru)

Мнение редакции не всегда совпадает  
с позицией авторов публикаций.  
Ответственность за достоверность  
изложенных фактов и правильность  
цитат несут авторы.  
Не принятые к публикации статьи не возвраща-  
ются и не рецензируются.

Выходит 4 раза в год  
(Свободная цена)  
Дата выхода в свет 15.06.2026  
Формат 60 x 90/8. Объем 11,5 печ.л.  
Тираж 500 экз  
Отпечатано в типографии  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2026

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Андрей Юрьевич Измайлов**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума  
Российской академии наук, директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ,  
Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=527153](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=527153)

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Яков Петрович Лобачевский (НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР)**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, академик-секретарь  
Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация,  
[https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=369308](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=369308)

**Алексей Семенович Дорохов**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заместитель директора  
по научно-организационной работе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва,  
Российская Федерация, [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=550644](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=550644)

**Михаил Никитичевич Ерохин**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный аграрный  
университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация,  
[https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=626708](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=626708)

**Юрий Анатольевич Иванов**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, главный  
научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская  
Федерация,  
[https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=672993](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=672993)

**Йошисуке Кишида**

академик, Президент компании «Шин-Норинша», г. Токио, Япония

**Юрий Федорович Лачуга**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума  
Российской академии наук, Москва, Российская Федерация,  
[https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=365637](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=365637)

**Антонин Махалек**

доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института сельскохозяйственной  
техники, г. Прага, Чешская Республика

**Владимир Дмитриевич Попов**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного  
направления Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного произ-  
водства, Санкт-Петербург, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=684252](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=684252)

**Синьминь Лю**

профессор, ректор Циндаоского аграрного университета, г. Циндао, Китайская Народная Республика

**Жарылкасын Сарсембекович Садыков**

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института агроинженерных  
проблем и новых технологий Казахского национального агроуниверситета, г. Алматы, Республика Казахстан

**Даврон Рустамович Норчаев**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории «Механиза-  
ции садоводства и овощеводства» Научно-исследовательского института механизации сельского  
хозяйства Республики Узбекистан, г. Карши, Кашкардаринская область, Республика Узбекистан

**Юлия Сергеевна Ценч**

доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Российской академии наук, заместитель ди-  
ректора по образовательной и редакционно-издательской деятельности Федерального научного  
агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация,  
[https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=816741](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=816741)

**Вячеслав Иванович Черноиванов**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный  
агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=552570](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=552570)

**Роман Алексеевич Фандо**

доктор исторических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук,  
Москва, Российская Федерация, [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=124382](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=124382)



SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL  
Founded in 2007

The journal is registered  
by Federal Agency for Supervision  
of Legislation Observance of Mass  
Communications Sphere  
and Cultural Heritage Protection  
Certificate ПИ No. ФС77-84201  
from November, 22, 2022

The Journal is included in the list  
of peer-reviewed scientific  
publications recommended  
by the Higher Attestation Commission  
for publishing the research results  
of studies and theses for Ph.D. and  
Dr.Sc. degrees in scientific  
specialties 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

The journal is included in the Russian  
Index of Scientific Citation (RISC).

**Full texts of articles are placed  
on the website of electronic  
library: elibrary.ru**

Protected by the Russian Federal Law  
RF №5351-1 "On Copyright and Related  
Rights" dated July 9, 1993. Content is  
distributed under Creative Commons  
Attribution 4.0 License. Violations are subject  
to prosecution.

#### EXECUTIVE EDITORS:

Bizhaev V.V.,  
Bykovskaya G.V.,  
Gorelova L.A.,  
Nurbagandova R.M.  
Translation into English –  
Svetlana Sorokina

#### EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

109428, Moscow,  
1st Institutskiy proezd, 5, bild. 1.  
Tel.: +7 (499) 174-88-11  
+7 (499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>  
e-mail: [smit@vim.ru](mailto:smit@vim.ru)

## [SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNologii]

**Founder and publisher: Federal State Budgetary Scientific Institution  
"Federal Scientific Agroengineering Center VIM" of the Russian Academy of Sciences**

#### EDITOR-IN-CHIEF

**Andrey Yu. Izmaylov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

#### EDITORIAL BOARD

**Yakov P. Lobachevskiy (SCIENTIFIC EDITOR)**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academician Secretary of Department of Agricultural Sciences at the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Aleksey S. Dorokhov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Mikhail N. Erokhin**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

**Yuriy A. Ivanov**

Dr.Sc.(Agr.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences; Chief Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Yoshisuke Kishida**

Academician, President Shin-Norinsha Co., LTD, Tokyo, Japan

**Yuriy F. Lachuga**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Antonin Machálek**

Dr.Sc.(Eng.), Director of the Research Institute of Agricultural Engineering, Prague, Czech Republic

**Vladimir D. Popov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Research Direction of the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production, St.Peterburg, Russian Federation

**Xinmin Liu**

Professor, Rector of Qingdao Agricultural University, Qingdao, People's Republic of China

**Zharylkasyn S. Sadykov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Director of Research Institute of Agroengineering Problems and New Technologies, Kazakh National Agrarian University, Almaty, Republic of Kazakhstan

**Davron R. Norchaev**

Dr.Sc.(Eng.), Senior Researcher, Head of the «Mechanization of Horticulture and Vegetable Growing» Laboratory of the Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization of the Republic of Uzbekistan, Karshi city, Kashkadarya region, Republic of Uzbekistan

**Yuliya S. Tsench**

Dr.Sc.(Eng.), Associate Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Educational, Editorial and Publishing Activities of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Vyacheslav I. Chernouvanov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Roman A. Fando**

Dr.Sc.(Hist.), Director of the Federal State Budgetary Institution of Science S.I. Vavilov Institute of History of Natural Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The opinion of the editorial board does not always coincide with the position of the authors of publications. Responsibility for the accuracy of the stated facts and correctness citations are carried by the authors. Articles not accepted for publication are not returned and are not reviewed.

**Published 4 times a year (open price). Publication date is 15.06.2026.**

**The format is 60 x 90/8. The volume is 11.5 print's sheets. The circulation is 500 copies.**

**Printed by FSBSI FSAC VIM.**



## ЭКОЛОГИЯ

- Белов А.А., Ковалев Д.А., Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Карелина М.Ю., Ковалев А.А.**  
Влияние гибридной плазмы коронных и искровых разрядов на выбросы анаэробно сброженных сточных вод ..... 4

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Казаков И.Б., Романенко В.Ю.**  
Разработка машины для очеса семенных коробочек льнотресты в условиях льнозавода ..... 14

- Прокопов М.А., Девянин С.Н., Кульчев А.Ю., Бурак П.И.**  
Разработка динамометрического стенда для комплексных испытаний мотор-колес ..... 21

- Тихомиров Д.А., Кузьмичев А.В., Хименко А.В.**  
Моделирование и разработка энергосберегающего ИК-обогревателя для телят ..... 30

- Гришин А.А., Дорохов А.А., Поручиков Д.В., Павлова Е.В., Широкова М.С.**  
Камера с управляемым микроклиматом и освещением для адаптации микроклонов растений к условиям *ex vitro* ..... 37

- Погосян В.М., Соколенко О.Н., Чаплыгин М.Е.**  
Обмолачивающее устройство с бильным барабаном для уборки кукурузы на зерно ..... 45

- Хасанов И.И., Хорт Д.О., Бережанский Н.В.**  
Прогнозирование временных рядов технологических параметров оборудования на основе рекуррентных нейронных сетей *LSTM* ..... 52

- Захаров А.М., Комоедов А.Д.**  
Автоматизированный секционный рабочий орган для борьбы с сорной растительностью в рядах картофеля ..... 59

## РАЗВИТИЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ

- Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И.**  
Система управления беспилотных воздушных судов и средства аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий ..... 67

- Филиппов Р.А., Смирнов И.Г.**  
Научно-технологические этапы создания первого серийного отечественного ягодоуборочного комбайна ..... 71

- Смык А.Ф., Гусева Е.А.**  
Годы Великой Отечественной войны в становлении современной агрофизики ..... 85

## ECOLOGY

- Belov A.A., Kovalev D.A., Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Karelina M.Yu., Kovalev A.A.**  
The effect of hybrid corona-spark discharges plasma on emissions of anaerobically digested wastewater ..... 4

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Kazakov I.B., Romanenko V.Yu.**  
Development of a machine for combing seed capsules from flax straw at a flax mill ..... 14

- Prokopov M.A., Devyanin S.N., Kulchev A.Yu., Burak P.I.**  
Development of a dynamometric test stand for comprehensive motor-wheel assembly testing ..... 21

- Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V., Khimenko A.V.**  
Modeling and development of an energy-saving infrared heater for calves ..... 30

- Grishin A.A., Dorokhov A.A., Poruchikov D.V., Pavlova E.V., Shirokova M.S.**  
Climate chamber with controlled microclimate and lighting for the adaptation of plant microclones to *ex vitro* conditions ..... 37

- Pogosyan V.M., Sokolenko O.N., Chaplygin M.E.**  
Threshing unit with a rasp-bar drum for maize grain harvesting ..... 45

- Khasanov I.I., Khort D.O., Berezhansky N.V.**  
Forecasting time series of technological parameters of equipment using LSTM recurrent neural networks ..... 52

- Zakharov A.M., Komoedov A.D.**  
Automated sectional working unit for weed control in potato rows ..... 59

## DEVELOPMENT OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

- Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I.**  
Control system and aerial imaging equipment for unmanned aircraft used in agricultural land monitoring ..... 67

- Filippov R.A., Smirnov I.G.**  
Scientific and technological development of the first domestically produced serial berry harvester ..... 71

- Smyk A.F., Guseva E.A.**  
The years of the Great Patriotic War in the development of modern agrophysics ..... 85

EDN: NMYYNK  
DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-4-13

Научная статья  
УДК 631.174/22.018/862/879.2/894



## Влияние гибридной плазмы коронных и искровых разрядов на выбросы анаэробно сброженных сточных вод

**Александр Анатольевич Белов<sup>1</sup>**,  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: belalexan85@gmail.com;

**Дмитрий Александрович Ковалев<sup>1</sup>**,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: kovalev\_da80@mail.ru;

**Алексей Семенович Дорохов<sup>1</sup>**,  
доктор технических наук, академик Российской  
академии наук, главный научный сотрудник,  
e-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;

**Дмитрий Юрьевич Павкин<sup>1</sup>**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: dimqaqa@mail.ru;

**Мария Юрьевна Карелина<sup>2</sup>**,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: karelinamu@mail.ru

**Андрей Александрович Ковалев<sup>1</sup>**,  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: kovalev\_ana@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Государственный университет управления, Москва, Российская Федерация

*Работа подготовлена при выполнении исследования в рамках соглашения № 075-15-2024-542 от 25.04.2024 г. к Гранту Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Обеспечение продовольственной безопасности страны на основе создания программно-аппаратных комплексов и интеллектуальных платформенных цифровых решений в сфере развития агропромышленных технологий полного жизненного цикла».*

**Реферат.** Интеграция в производственные цепочки животноводческих предприятий технологии анаэробного сбраживания сталкивается с проблемой утилизации органических сточных вод (эффлюента). Существующие способы утилизации могут сопровождаться побочными выбросами нежелательных веществ, что требует значительных затрат на материалы и оборудование. Альтернативной технологией ограничения выбросов является обработка стока плазмой, при которой возникает ряд нерешенных проблем. (Цель исследования) Изучение влияния плазмы разрядов на эффлюент. (Материалы и методы) Использовалась лабораторная установка с гибридной плазмой надводных коронных и подводных искровых разрядов. В качестве субстрата использовался мезофильный эффлюент свиноводческого предприятия. (Результаты и обсуждение) Применение гибридной плазмы приводило к снижению водородного показателя с 9 до 6, увеличению электропроводности с 1 до 2 миллисименсов на сантиметр и окислительно-восстановительного потенциала с 300 до 600 милливольт, что коррелировало со смягчающим выбросы газов эффектом. Наблюдалась прямая корреляция между снижением водородного показателя и повышением содержания нитратов с 0 до 600 миллиграммов на литр, что связано с их стабильностью и низкой реакционной активностью. Обратная взаимосвязь изменения показателя кислотности и двуокиси азота обусловлена ее участием в реакциях с кислородом с образованием пероксинитрита. Увеличение окислительно-восстановительного потенциала смещает химическое равновесие аммиак-аммоний в нелетучую форму, что приводит к снижению выбросов аммиака в окружающий воздух. Искровые разряды оказывали малое влияние на эффлюент, однако в составе гибридной плазмы их вклад был более значимым как в изменении электрохимических свойств (3-20 процентов), так и в приросте активных форм кислорода и азота на 7-9 процентов в сравнении с коронными разрядами. (Выводы) Повышенная экологичность, отсутствие образования побочных вредных химических соединений, сокращение выбросов газов, предотвращение пенообразования, масштабируемость являются преимуществами обработки гибридной плазмой разрядов в сравнении с существующими способами утилизации сточных вод.

**Ключевые слова:** животноводство, утилизация отходов, сточные воды, анаэробное сбраживание, подкисление, искровые и коронные разряды, гибридная плазма, аммиак, метан.

■ **Для цитирования:** Белов А.А., Ковалев Д.А., Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Карелина М.Ю., Ковалев А.А. Влияние гибридной плазмы коронных и искровых разрядов на выбросы анаэробно сброженных сточных вод // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. N2. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-4-13. EDN: NMYYNK.

## The Effect of Hybrid Corona–Spark Discharges Plasma on Emissions of Anaerobically Digested Wastewater

**Alexander A. Belov<sup>1</sup>,**  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: belalexan85@gmail.com;

**Dmitry A. Kovalev<sup>1</sup>,**  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: kovalev\_da80@mail.ru;

**Alexey S. Dorokhov<sup>1</sup>,**  
Dr.Sc.(Eng.), member of the Russian Academy  
of Sciences, chief researcher,  
e-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;

**Dmitry Yu. Pavkin<sup>1</sup>,**  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: dimqaqa@mail.ru;

**Maria Yu. Karelina<sup>2</sup>,**  
Dr.Sc.(Eng.), professor,  
e-mail:karelinamu@mail.ru;

**Andrey A. Kovalev<sup>1</sup>,**  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: kovalev\_ana@mail.ru

<sup>1</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>State University of Management, Moscow, Russian Federation

*The work was prepared as part of research carried out under Agreement No. 075-15-2024-542 dated 25 April 2024 and supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the grant “Ensuring National Food Security through the Development of Software and Hardware Complexes and Intelligent Platform-Based Digital Solutions for Full-Lifecycle Agro-Industrial Technologies.*

**Abstract.** The integration of anaerobic digestion technology into the production chains of livestock enterprises is associated with the challenge of managing organic wastewater (effluent). Existing disposal methods can generate by-product emissions and require substantial material and equipment costs. Plasma treatment of effluent represents a promising alternative technology for reducing such emissions, although several issues remain unresolved. (*Research purpose*) The study aimed to investigate the effect of discharge plasma on effluent. (*Materials and methods*) A laboratory setup generating hybrid plasma produced by above-water corona discharges and underwater spark discharges was used. Mesophilic effluent obtained from a pig-breeding enterprise was used as the substrate. (*Results and discussion*) The use of hybrid plasma resulted in a decrease in the potential of hydrogen from 9 to 6 and an increase in electrical conductivity from 1 to 2 millisiemens per centimeter, while the oxidation–reduction potential rose from 300 to 600 millivolts. These changes correlated with a reduction in gas emissions. A direct correlation was observed between the decrease in the potential of hydrogen and the increase in nitrate concentration from 0 to 600 milligrams per liter, which is associated with nitrate stability and low reactivity. The inverse relationship between acidity changes and nitrogen dioxide content is explained by its participation in reactions with oxygen to produce peroxyxynitrite. The increase in oxidation–reduction potential shifts the ammonia–ammonium chemical equilibrium toward a non-volatile form, thereby reducing ammonia emissions into the ambient air. When used separately, spark discharges had only a limited effect on the effluent; however, as part of the hybrid plasma system, their contribution was more pronounced, both in changing the electrochemical properties by 3–20 percent, and in increasing the concentration of reactive oxygen and nitrogen species by 7–9 percent compared with corona discharges. (*Conclusions*) Improved environmental safety, the absence of harmful chemical by-products, reduced gas emissions, foam prevention, and scalability are the main advantages of treatment with hybrid discharge plasma compared with existing wastewater disposal methods.

**Keywords:** livestock farming, waste disposal, wastewater, anaerobic digestion, acidification, spark and corona discharges, hybrid plasma, ammonia, methane.

■ **For citation:** Belov A.A., Kovalev D.A., Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Karelina M.Yu., Kovalev A.A. The effect of hybrid corona-spark discharges plasma on emissions of anaerobically digested wastewater. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-4-13. EDN: NMYYHK.

**А**наэробное сбраживание органических отходов животноводства относится к технологиям двойственного значения по своему эффекту. С одной стороны, получается биогаз (метан), который служит топливом и возобновляемым источником для получения электрической или ме-

ханической энергии [1]. С другой – утилизация этих отходов имеет экологический эффект. В промышленном отношении более выражена энергетическая составляющая [2]. Усиливается тенденция развития экологически чистых видов транспорта. Для сельского хозяйства значимы оба эффекта [3, 4].

При анаэробном сбраживании стоков животноводческих предприятий с целью получения органических продуктов в качестве удобрения (эффлюента) образуются вторичные продукты ферментации, в частности аммиак. Высокая концентрация аммиака может не только ограничивать полезное применение переработанных отходов, но и быть экологическим барьером при их открытом хранении в условиях естественной вентиляции [5]. В случае длительного хранения на поле органические стоки могут проникать в почвенную и водную среду [6], вызывая загрязнение почвы и эвтрофикацию водоемов.

В целях защиты окружающей среды применяются покрытия различных типов и размеров, предотвращающих контакт органических стоков с воздухом [7]. Специальные сооружения для закрытого хранения стоков не только ограничивают выбросы в воздух, но и позволяют устранять влияние на водные и почвенные ресурсы, что требует финансовых вложений на строительство и техническое обслуживание, особенно при больших объемах отходов.

В сравнении с использованием закрытых сооружений подкисление органических стоков до или во время открытого хранения позволяет улучшить показатели снижения эмиссии газов [8]. Перед вывозом в поля или непосредственно в полевых условиях в сток чаще всего добавляют неорганические кислоты, в основном серную кислоту [9]. Эта технология показала хорошую эффективность по снижению эмиссии метана [10]. Однако обработка серной кислотой связана с риском непреднамеренного избыточного внесения серосодержащих соединений в почву, что может вызвать истощение плодородия земли, отравление живых организмов, обитающих или пасущихся на территории. Помимо этого, в органическом стоке при длительном хранении могут образоваться сульфиды, приводящие к нежелательной эмиссии сероводорода в атмосферу [11].

Сравнительно недавно для биоподкисления органических стоков стали применять органические кислоты [12]. Выявлено снижение pH при добавлении сахаров, рисовых отрубей, подсырной сыворотки [13]. Комбинация биоподкисления с другими методами позволяет дополнительно сократить выбросы парниковых газов [14]. При всех достоинствах предлагаемых способов остаются нерешенными проблемы масштабируемости технологий биоподкисления в условиях ограниченной доступности биодобавок.

Новую и перспективную альтернативу методам химического и органического подкисления представляет применение холодной плазмы. В пользу этого варианта прежде всего рассматривается синергетический эффект плазмы: образование активных форм кислорода и азота с одновременным обеззараживанием.

Большинство технологий холодной плазмы заключается в производстве чистой плазменно-активированной воды, обладающей дезинфицирующими и окислительными свойствами, но не только в этом [15]. Ранее выявлено снижение общего количества бактерий в ливневых сточных водах при воздействии плазмой высоковольтных искровых разрядов [16]. Устранение кишечной палочки и вирусов в реакционном растворе, имитирующем сточные воды животноводческих ферм, показано в исследовании [17]. Опубликованы результаты о влиянии плазмы на присутствие нежелательного аммиака в эфлюенте [18]. В некоторых источниках сообщается об ингибировании метаногенеза в органических стоках с помощью плазменной обработки [19].

Органические отходы животноводства при активации плазмой могут служить хорошим удобрением благодаря увеличению доступного азота для сельскохозяйственных культур [20]. Имеются научные данные о влиянии внесения в почву плазменно-активированных органических стоков на урожайность зерновых культур [21]. Проведены исследования по обогащению эфлюента азотом путем воздействия плазмы при получении органического удобрения для выращивания райграсса [22]. Большинство авторов сходятся во мнении, что замена минеральных удобрений плазменно-активированными эфлюентами больше дает экологический эффект, чем влияет на повышение урожайности, хотя она остается в том же приблизительно диапазоне, без существенного снижения.

Внедрение технологии плазменной обработки животноводческих стоков находится на ранней стадии лабораторных исследований и публикации получаемых результатов, которых, вероятно, достаточно для обсуждения практической пользы от использования таких технологических приемов, но не для полноценного воплощения предлагаемых идей и технических решений на фермах.

Кроме того, в литературе отсутствует энергетическая оценка применения плазмы в хозяйствах. В сообщениях о замещении минеральных азотных удобрений плазменно-активированными растворами с близкими эффектами для почвы приводятся данные о неравнозначности результатов по энергетическим показателям [23]. Для достижения одинаковой концентрации азотных соединений за счет плазменной активации воды требуется существенно больше времени, следовательно, электрической энергии, чем при производстве дозы коммерческих азотных минеральных удобрений, добавление которой обеспечивает ту же концентрацию азота в воде.

Большинство исследований сосредоточено на рассмотрении газа одного вида, что не дает полную картину экологической обстановки, не обеспечи-

вает целостный взгляд на выбросы всех основных газов, таких как аммиак, метан, двуокись азота и др. [24]. В управлении отходами следует учитывать немаловажную роль вида сельскохозяйственных животных [25].

Также не встречается проработанный под ключ метод интеграции плазменной обработки в какую-либо технологическую линию утилизации отходов животноводства. Сравнительных исследований о встраивании плазмы в различные цепочки утилизации тоже не замечено.

Для решения подобных научных проблем и практических ограничений использования плазмы в рамках снижения вреда животноводческих отходов разрабатывается концепция исследования на базе метода интеграции обработки плазмой разрядов в технологический процесс анаэробного сбраживания, включающую следующие задачи:

- комплексная научная оценка влияния плазмы разрядов на перевод аммиака в аммоний, на фиксацию азота в виде нитратов и пероксинитрита;
- использование косвенной методики оценки влияния плазмы разрядов на выбросы загрязняющих газов по их электрохимическим свойствам по причине простоты измерения и контроля таких показателей;
- исследование надводной и подводной плазмы различных разрядов и выявление наибольшего эффекта каждого типа на достижимые результаты и проводимые процессы.

Предполагается, что решение поставленных задач внесет научный вклад в понимание общей стратегии создания и развития безотходных технологий. Внедрение недостающего звена в виде использования плазмы разрядов в процессы анаэробного сбраживания отходов будет способствовать интеграции этого инновационного и улучшенного метода в цикл замкнутого агропроизводства.

**Цель исследования:** изучение влияния плазмы разрядов на анаэробно сброженный сток свиноводческого предприятия.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Лабораторная установка.** Воздействие надводной плазмы коронных разрядов обеспечивает подкисление, а обработка подводной плазмой искровых разрядов – обеззараживание жидкого стока. Эти два принципа совмещены в лабораторной установке генерации пилотной гибридной плазмы.

Пилотная гибридная плазма технически была получена на базе ранее разработанного авторами прототипа – установки искровых разрядов, в которой реализован принцип подводной плазмы [26]. Искровые разряды образуются в рабочем пространстве между винтовыми электродами, размещенными в диэлектрических изоляторах, сформированных утолщениями торцевых стенок корпуса реактора [27].

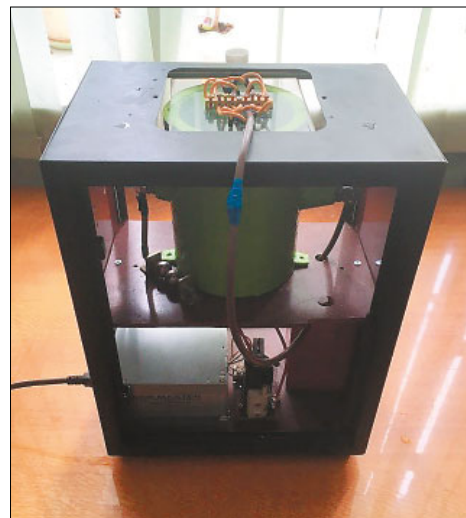


Рис. 1. Установка получения гибридной плазмы  
Fig. 1. Pilot setup for generating hybrid plasma

Физическая реализация в лабораторном масштабе гибридного метода генерации плазмы показана на рисунке 1.

Усовершенствование прототипа заключалось в дополнительной генерации надводной плазмы коронных разрядов. Медные игольчатые наконечники электрода высокого потенциала расположены на 10 мм выше поверхности стока. Требования к материалу игольчатых наконечников менее строгие, так как они меньше подвержены эрозии по сравнению с плоскими или сферическими наконечниками. Electrodes представляют собой покрытые изоляцией медные стержни, зафиксированные в диэлектрической крышке. Толщина игл 1,5 мм, количество 6. Диэлектрическая крышка удерживает производимые плазмой активные формы кислорода и азота в воздушном пространстве реактора. Коронные разряды в виде плазменных струй образуются в рабочей зоне реактора между поверхностями электрода и стока.

Основные технические характеристики установки: напряжение искровых разрядов 1 кВ; напряжение коронных разрядов 1 кВ; потребляемая мощность 25 Вт; габаритные размеры 0,2×0,3×0,4 м; масса 5 кг; разовая загрузка реактора (емкости) 1 л.

**Материалы.** Образцы стока были отобраны непосредственно после отделения на дуговом сите твердой фракции на свиноферме в Рязанской области в 2025 г. После доставки в лабораторию образцы хранились при 4 °С в холодильнике до использования в качестве субстрата в биогазовой установке анаэробного сбраживания в мезофильных условиях. После ферментации сток хранился при 4 °С в холодильнике до обработки плазмой. При этом сток разделяли на контрольные варианты (без обработки) и экспериментальные образцы, подвергаемые воздействию гибридной плазмы.

**Аналитические методы.** Измерения электрохимических показателей проводились количественно с применением рН-метра HI98103 *Checker 1*, кондуктометра *TDS BlueLab PENCON*, а также качественно лакмусовыми полосками, тест-полосками для комплексного определения состава водных растворов. Измерения нитратов и нитритов осуществляли визуальным методом экспресс-тестерами 2 в 1 на определение общего содержания в водных растворах/почве.

Измерения проводились в трехкратной повторяемости. Каждая технологическая операция экспериментов повторялась в трех вариантах.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Динамика изменения водородного показателя (рН), электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала анаэробно сброженного свиноводческого стока в зависимости от продолжительности обработки и вида разрядов (коронный, искровой, гибридный) показана на *рисунке 2*.

Обработка стока гибридной плазмой за 8 ч показала наибольшее снижение рН с 9 до 6 в сравнении с коронной (с 9 до 6,3) и искровой (с 9 до 8). Также среднее снижение рН в час было наибольшим при использовании гибридной плазмы и составляло примерно 0,5.

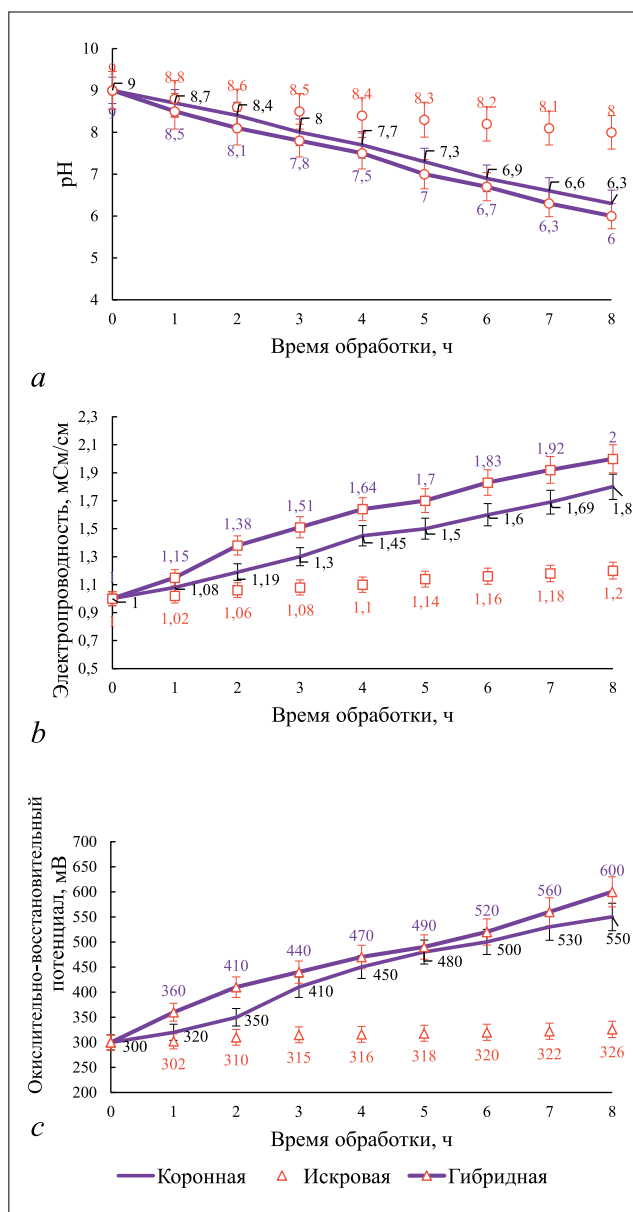
Электропроводность стока в случае гибридной плазмы повысилась до 2 мСм/см и была больше, чем при воздействии коронной – 1,8 мСм/см и, тем более, искровой плазмы – 1,2 мСм/см. В час в среднем электропроводность повышалась при гибридной плазме на 0,1 мСм/см.

Окислительно-восстановительный потенциал стока достигал максимальной величины в 600 мВ при использовании гибридной плазмы, при коронной был немногим меньше – 550 мВ, при искровой – 326 мВ.

Динамика общего содержания нитратов и нитритов в анаэробно сброженном стоке в зависимости от продолжительности обработки и вида разрядов (коронный, искровой и гибридный) показана на *рисунке 3*.

Влияние искровых разрядов на увеличение как нитратов, так и нитритов было несущественным по сравнению коронными и гибридными разрядами. Абсолютный прирост нитратов с околонулевых значений за 8 ч обработки подводной плазмой составлял 20 мг/л, надводной – 560 мг/л, гибридной – 600 мг/л; прирост нитритов соответственно 15, 95 и 100 мг/л.

Анаэробно сброженный органический сток наиболее эффективно может подкисляться при коронных разрядах надводной плазмы, при которой образуются активные формы кислорода и азота. Косвенной количественной мерой этих форм выступают электрохимические показатели.



*Рис. 2. Динамика изменения рН (а), электропроводности (б) и окислительно-восстановительного потенциала (с) в зависимости от продолжительности обработки и вида разрядов*

*Fig. 2. Changes in pH (a), electrical conductivity (b), and oxidation-reduction potential (c) depending on treatment duration and discharge type*

В отличие от исследований других авторов [28, 29], в данной работе кроме показателя рН предлагается рассматривать дополнительные электрохимические свойства – электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал для оценки влияния плазмы на вредные выбросы.

Механизм образования ключевых долгоживущих соединений гидроксильных радикалов наряду с нитратами при контакте плазмы с воздухом и анаэробно сброженным органическим стоком связан с реакциями в присутствии кислорода, азота и воды [30].

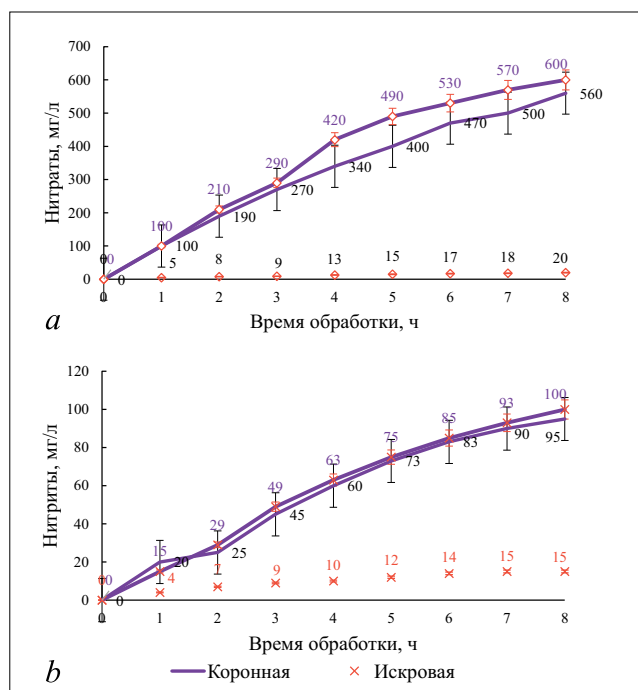


Рис. 3. Динамика изменения концентрации нитратов (а) и нитритов (б) в зависимости от продолжительности обработки и вида разряда

Fig. 3. Changes in the concentrations of nitrates (a) and nitrites (b) depending on treatment duration and discharge type

Образование соединений азота в плазменно-активированной воде подробно изучалось многими исследователями, тогда как механизм влияния плазмы на азот в органогенном стоке еще требует более подробного изучения, хотя и показан в некоторых поздних публикациях [31].

Динамика pH стока имеет прямую зависимость с изменением концентрации нитратов, нитритов и обратную связь с изменением двуокиси азота. Повышение нитратов, нитритов и снижение двуокиси азота с понижением pH вытекает из ряда химических реакций. Прежде всего, плазма обеспечивает разрыв связей молекул азота, и в присутствии донорных атомов кислорода, получаемых из воздуха или воды, образуются окиси азота, далее переводимые в двуокиси или нитраты в реакции с первичным кислородом.

Сопутствующие гидроксильные радикалы реагируют с двуокисью азота с получением пероксинитрита. Нитраты, имеющие более низкую реакционную способность и высокую стабильность, не вступают в цепочку образования пероксинитрита и их концентрация в сброженном стоке остается высокой. Увеличение и устойчивость во времени окислительно-восстановительного потенциала также указывает на образование нитратов, имеющих характеристики долгоживущих азотсодержащих соединений.

Уместно сравнить метод подкисления анаэробно ферментированного стока добавлением серной или органической кислоты, при котором общее содержание азота не изменяется, с плазменной обработкой, когда образуется окисленный неорганический азот в виде преимущественно нитратов и нитритов. Содержание общего окисленного неорганического азота в зависимости от существенного снижения pH будет значительно смещаться в сторону повышения. Одновременно будет повышаться уровень нитратов и нитритов.

Анаэробно сброженный органогенный сток после активации плазмой можно считать комбинированным удобрением с органическим и неорганическим компонентами. Такая характеристика будет наиболее полно отражать получаемые свойства обработанного органогенного стока, а также потенциал его применения.

Стоит отметить, что предложенная ранее оценка [32] плазменно-активированного анаэробно ферментированного органогенного стока, как только органического удобрения, не полностью отражает его свойства.

Механизм сокращения выбросов аммиака заключается в следующем. Плазма разрядов, воздействие которой приводит к снижению pH ферментированного стока, является решающим фактором, отражающим влияние на выбросы аммиака, но не единственным.

Электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал из ряда электрохимических показателей дополняют количественную оценку перевода аммиака в аммоний [33].

**Выводы.**

Опубликованные в небольшом количестве на настоящий момент научные сообщения о влиянии плазмы на выбросы вредных газов органогенным стоком нельзя считать всеобъемлющими, поскольку эта технология инновационная и требуются более тщательные дополнительные исследования для исчерпывающего объяснения возможных эффектов и потенциальных способов применения.

Косвенными индикаторами побочных выбросов были выбраны электрохимические свойства анаэробно сброженного органогенного стока. Кроме этого, оценка выбросов велась по наблюдениям за изменением активных форм кислорода и азота в обрабатываемом органогенном материале. Пилотная гибридная плазма надводных коронных и подводных искровых разрядов наиболее значимо влияла на исследуемые показатели.

Обработка плазмой приводит к снижению эмиссии аммиака, однако способствует повышению концентрации пероксида азота в анаэробно сброженном органогенном стоке.

В условиях обратной корреляции рН и реакционной способности двуоксида азота имеет значение стабильность химических соединений азота, которая у нитратов выше, что приводит к повышению их количества при снижении нитритов.

Действие коронных разрядов направлено преимущественно на подкисление анаэробно сброжен-

ного органического стока. Наблюдаемое влияние плазмы разрядов на анаэробно ферментированные органические стоки может стать новым вкладом в развитие этого метода, как неотъемлемой части стратегии утилизации отходов животноводства путем анаэробного сбраживания.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Федотов А.В., Григорьев В.С., Ценч Ю.С. Энергетический потенциал продуктов деструкции органосодержащих отходов АПК при их переработке в сверхкритической водной среде // *Вестник аграрной науки Дона*. 2018. N4(44). С. 5-11. EDN: EMKSBO.
2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Федотов А.В. и др. Адсорбционно-окислительная технология переработки сточных вод предприятий агропромышленного комплекса // *Вестник Мордовского Университета*. 2018. Т. 28. N2. С. 207-221. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.207-221.
3. Aljehani J.H., Mostafa M.K., Abdulkarim S. et al. Conversion of livestock waste to energy: New technological transformation for energy recovery. *Series in Bioenergy*. 2026. 217-40. DOI: 10.1016/B978-0-443-29275-0.00016-5.
4. Enokida C.H., Tapparo D.C., Antes F.G. et al. Anaerobic codigestion of livestock manure and agro-industrial waste in a CSTR reactor: Operational aspects, digestate characteristics, and microbial community dynamics. *Renewable Energy*. 2025. 238:121865. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121865.
5. Maqdasli B., Alhseinat E., Rodriguez J., Al-Ali K. Ammonia recovery from wastewater: A critical review of technologies with emphasis on capacitive deionization. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. 24:100901. DOI: 10.1016/j.ceja.2025.100901.
6. Yong Hou, Velthof G.L., Lesschen J.P. et al. Nutrient recovery and emissions of ammonia, nitrous oxide, and methane from animal manure in Europe: effects of manure treatment technologies. *Environmental Science & Technology*. 2017. 51 (1). 375-383. DOI: 10.1021/acs.est.6b04524.
7. Yan X., Ying Y., Li K. et al. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 352. 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
8. VanderZaag A.C., Amon B., Bittman S., Kuczynski T. Ammonia abatement with manure storage and processing techniques. *Costs of Ammonia Abatement and the Climate Co-benefits*. 2015. 284. DOI: 10.1007/978-94-017-9722-1\_9.
9. Sokolov V.K., VanderZaag A., Habtewold J. et al. Dairy manure acidification reduces CH<sub>4</sub> emissions over short and long-term. *Environmental Technology*. 2020. 42(18). 2797-2804. DOI: 10.1080/09593330.2020.1714744.
10. Habtewold J., Gordon R., Sokolov V. et al. Reduction in methane emissions from acidified dairy slurry is related to inhibition of *Methanosarcina* species. *Front. Microbiol.* 2018. 9:2806. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02806.
11. Yusra Zireeni, Davey L. Jones, David R. Chadwick et al. Low-dose acidification of cattle slurry with sulfuric acid enhances oilseed-rape yield but risks elevated sulfide formation during prolonged storage. *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 970. 179014. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179014.
12. Regueiro I., Gómez-Muñoz B., Lübeck M. et al. Bio-acidification of animal slurry: Efficiency, stability and the mechanisms involved. *Bioresource Technology Reports*. 2022. Vol. 19. 101135. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101135.
13. Prado J., Chieppe J., Raymundo A., Fanguero D. Bio-acidification and enhanced crusting as an alternative to sulphuric acid addition to slurry to mitigate ammonia and greenhouse gases emissions during short term storage. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 263. 121443. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121443.
14. Umar W., Vandenbussche C., Dinuccio E. et al. Acidification of animal slurry in housing and during storage to reduce NH<sub>3</sub> and GHG emissions-recent advancements and future perspectives. *Waste Management*. 2025. Vol. 203. 114856. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114856.
15. Ranieri P., Sponsel N., Kizer J. et al. Plasma agriculture: Review from the perspective of the plant and its ecosystem. *Plasma Processes and Polymers*. 2021. 18:2000162. DOI: 10.1002/ppap.202000162.
16. Белов А.А. Применение технологии холодной атмосферной плазмы для обработки атмосферных сточных вод с целью повторного использования в сельском хозяйстве // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2024. Т. 17. N2(81). С. 107-116. DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2024\_2\_107.
17. Wenhui Zhang, Yanhan Lu, Xin Wang et al. Simultaneous elimination of antibiotic resistance gene and viruses in liquid manure by plasma/peracetic acid combination system. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 362. Part 3. 131881. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.131881.
18. Pedersen J., Labouriau R., Feilberg A. Effect of slurry separation and air-plasma treatment on NH<sub>3</sub> and VOC emissions from field applied biogas digestate and pig slurry to grassland. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 247. 257-266. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.09.014.
19. Nyvold M., Dörsch P. Complete elimination of methane formation in stored livestock manure using plasma tech-

- nology. *Front. Sustain. Food Syst.* 2024. 8:1370542. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1370542.
20. Rollett A.J., Williams J.R., Priest H. Ammonia emissions and nitrogen use efficiency of untreated and plasma treated liquid organic materials. *Soil Use and Management.* 2025. 41. 70004. DOI: 10.1111/sum.70004.
21. Cottis T., Mousavi H., Solberg S.Ø. Plasma treated cattle slurry moderately increases Cereal Yields. *Agronomy*, 2023. 13(6). 1549. DOI: 10.3390/agronomy13061549.
22. Mousavi H., Cottis T., Hoff G., Solberg S.Ø. Nitrogen enriched organic fertilizer (NEO) and its effect on ryegrass yield and soil fauna feeding activity under controlled conditions. *Sustainability.* 2022. 14(4). 2005. DOI: 10.3390/su14042005.
23. Guo D., Liu H., Zhou L. et al. Plasma-activated water production and its application in agriculture. *J Sci Food Agric.* 2021. 101: 4891-4899. DOI: 10.1002/jsfa.11258.
24. Xiaojie Yan, Yongfei Ying, Kunkun Li et al. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management.* 2024. Vol. 352. 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
25. Dennehy C., Lawlor P.G., Jiang Y. et al. Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: a critical analysis. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2017. 11. 11. DOI: 10.1007/s11783-017-0942-6.
26. Belov A., Vasilyev A., Dorokhov A. et al. Effect of high-voltage spark discharges on reduction of the concentration of total bacterial count in wastewater. *Journal of Water Process Engineering.* 2022. Vol. 45. 102465. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102465.
27. Белов А.А., Князева И.В. Повторное использование гидропонных растворов после обработки искровыми разрядами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета.* 2025. Т. 20. N2(78). С. 5-9. DOI: 10.12737/2073-0462-2025-5-9-5-9.
28. Nyang'au J.O., Sørensen P., Bjarne Møller H. Effects of plasma treatment of digestates on pH, nitrification and nitrogen turnover during storage and after soil application. *Environmental Technology & Innovation.* 2024. Vol. 34. 103578. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103578.
29. Huang J., Qu Z., Gao Y. et al. Sustainable liquid nitrogen fertilizer production via air plasma bubbles: insights into plasma-enabled N<sub>2</sub> fixation chemistry. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2025. Vol. 58. N11. DOI: 10.1088/1361-6463/ada6c7.
30. Brisset J.L., Pawlat J. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2016. 36. 355-381. DOI: 10.1007/s11090-015-9653-6.
31. Lloyd I.L., Grayson R.P., Galdos M.V. et al. Nitrous oxide and methane fluxes from plasma-treated pig slurry applied to winter wheat. *NutrCyclAgroecosyst.* 2024. 129. 505-520. DOI: 10.1007/s10705-024-10363-8.
32. Cottis T., Mousavi H., Solberg S.Ø. Plasma treated cattle slurry with modest fertilizer effect on grass. *European Journal of Agronomy.* 2025. Vol. 168. 127649. DOI: 10.1016/j.eja.2025.127649.
33. Overmeyer V., Trimborn M., Clemens J. et al. Acidification of slurry to reduce ammonia and methane emissions: Deployment of a retrofittable system in fattening pig barns. *Journal of Environmental Management.* 2023. Vol. 331. 117263. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117263.

## REFERENCES

1. Lobachevsky Ya.P., Fedotov A.V., Grigoriev V.S., Tsench Yu.S. The energy potential of the degradation products of organ-containing agricultural waste during their processing in a supercritical aquatic environment. *Don Agrarian Science Bulletin.* 2018. N4(44). 5-11 (In Russian). EDN: EMKSBO.
2. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Fedotov A.V. et al. Adsorption-oxidation technology of wastewater recycling in agroindustrial complex enterprises. *Mordovia University Bulletin.* 2018. Vol. 28. N2. 207-221 (In Russian). DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.207-221.
3. Aljehani J.H., Mostafa M.K., Abdulkarim S. et al. Conversion of livestock waste to energy: New technological transformation for energy recovery. *Series in Bioenergy.* 2026. 217-40. DOI: 10.1016/B978-0-443-29275-0.00016-5.
4. Enokida C.H., Tapparo D.C., Antes F.G. et al. Anaerobic codigestion of livestock manure and agro-industrial waste in a CSTR reactor: Operational aspects, digestate characteristics, and microbial community dynamics. *Renewable Energy.* 2025. 238:121865. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121865.
5. Maqdasi B., Alhseinat E., Rodríguez J., Al-Ali K. Ammonia recovery from wastewater: A critical review of technologies with emphasis on capacitive deionization. *Chemical Engineering Journal Advances.* 2025. 24:100901. DOI: 10.1016/j.cej.2025.100901.
6. Yong Hou, Velthof G.L., Lesschen J.P. et al. Nutrient recovery and emissions of ammonia, nitrous oxide, and methane from animal manure in Europe: Effects of manure treatment technologies. *Environmental Science & Technology.* 2017. 51(1). 375-383. DOI: 10.1021/acs.est.6b04524.
7. Yan X., Ying Y., Li K. et al. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management.* 2024. Vol. 352. 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
8. VanderZaag A.C., Amon B., Bittman S., Kuczynski T. Ammonia abatement with manure storage and processing techniques. *Costs of Ammonia Abatement and the Climate Co-benefits.* 2015. 284. DOI: 10.1007/978-94-017-9722-1\_9.
9. Sokolov V.K., VanderZaag A., Habtewold J. et al. Dairy manure acidification reduces CH<sub>4</sub> emissions over short

- and long-term. *Environmental Technology*. 2020. 42(18). 2797-2804. DOI: 10.1080/09593330.2020.1714744.
10. Habtewold J., Gordon R., Sokolov V. et al. Reduction in methane emissions from acidified dairy slurry is related to inhibition of Methanosarcina species. *Frontiers in Microbiology*. 2018. 9:2806. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02806.
  11. Yusra Zireeni, Davey L. Jones, David R. Chadwick et al. Low-dose acidification of cattle slurry with sulfuric acid enhances oilseed-rape yield but risks elevated sulfide formation during prolonged storage. *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 970. 179014, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179014.
  12. Regueiro I., Gómez-Muñoz B., Lübeck M. et al. Bio-acidification of animal slurry: Efficiency, stability and the mechanisms involved. *Bioresource Technology Reports*. 2022. Vol. 19. 101135. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101135.
  13. Prado J., Chieppe J., Raymundo A., Fanguero D. Bio-acidification and enhanced crusting as an alternative to sulphuric acid addition to slurry to mitigate ammonia and greenhouse gases emissions during short term storage. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 263. 121443. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121443.
  14. Umar W., Vandebussche C., Dinuccio E. et al. Acidification of animal slurry in housing and during storage to reduce NH<sub>3</sub> and GHG emissions-recent advancements and future perspectives. *Waste Management*. 2025. Vol. 203. 114856. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114856.
  15. Ranieri P., Sponsel N., Kizer J. et al. Plasma agriculture: Review from the perspective of the plant and its ecosystem. *Plasma Processes and Polymers*. 2021. 18:2000162. DOI: 10.1002/ppap.202000162.
  16. Belov A.A. Cold atmospheric plasma technology application at atmospheric wastewater treatment for the purpose of their reusing in agriculture. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024. 17(2). 107-116 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2024\_2\_107-116.
  17. Zhang W., Lu Y., Wang X. et al. Simultaneous elimination of antibiotic resistance gene and viruses in liquid manure by plasma/peracetic acid combination system. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 362. Part 3. 131881. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.131881.
  18. Pedersen J., Labouriau R., Feilberg A. Effect of slurry separation and air-plasma treatment on NH<sub>3</sub> and VOC emissions from field applied biogas digestate and pig slurry to grassland. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 247. 257-266. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.09.014.
  19. Nyvold M., Dörsch P. Complete elimination of methane formation in stored livestock manure using plasma technology. *Front. Sustain. Food Syst.* 2024. 8:1370542. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1370542.
  20. Rollett A.J., Williams J.R., Priest H. Ammonia emissions and nitrogen use efficiency of untreated and plasma treated liquid organic materials. *Soil Use and Management*. 2025. 41. 70004. DOI: 10.1111/sum.70004.
  21. Cottis T., Mousavi H., Solberg S.Ø. Plasma treated cattle slurry moderately increases cereal yields. *Agronomy*. 2023. 13(6). 1549. DOI: 10.3390/agronomy13061549.
  22. Mousavi H., Cottis T., Hoff G., Solberg S.Ø. Nitrogen enriched organic fertilizer (NEO) and its effect on ryegrass yield and soil fauna feeding activity under controlled conditions. *Sustainability*. 2022. 14(4). 2005. DOI: 10.3390/su14042005.
  23. Guo D., Liu H., Zhou L. et al. Plasma-activated water production and its application in agriculture. *J Sci Food Agric*. 2021. 101: 4891-4899. DOI: 10.1002/jsfa.11258.
  24. Yan X., Ying Y., Li K. et al. A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 352. 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
  25. Dennehy C., Lawlor P.G., Jiang Y. et al. Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: a critical analysis. *Front. Environ. Sci. Eng*. 2017. 11. 11. DOI: 10.1007/s11783-017-0942-6.
  26. Belov A., Vasilyev A., Dorokhov A. et al. Effect of high-voltage spark discharges on reduction of the concentration of total bacterial count in wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 45. 102465. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102465.
  27. Belov A.A., Knyazeva I.V. Reuse of hydroponic solutions after spark discharge treatment. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2025. Vol. 20. N2 (78). 5-9 (In Russian). DOI: 10.12737/2073-0462-2025-5-9-5-9.
  28. Nyang'au J.O., Sørensen P., Bjarne Møller H. Effects of plasma treatment of digestates on pH, nitrification and nitrogen turnover during storage and after soil application. *Environmental Technology & Innovation*. 2024. Vol. 34. 103578. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103578.
  29. Huang J., Qu Z., Gao Y. et al. Sustainable liquid nitrogen fertilizer production via air plasma bubbles: insights into plasma-enabled N<sub>2</sub> fixation chemistry. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58. N11. DOI: 10.1088/1361-6463/ada6c7.
  30. Brisset J.L., Pawlat J. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2016. 36. 355-381. DOI: 10.1007/s11090-015-9653-6.
  31. Lloyd I.L., Grayson R.P., Galdos M.V. et al. Nitrous oxide and methane fluxes from plasma-treated pig slurry applied to winter wheat. *NutrCyclAgroecosyst*. 2024. 129. 505-520. DOI: 10.1007/s10705-024-10363-8.
  32. Cottis T., Mousavi H., Solberg S.Ø. Plasma treated cattle slurry with modest fertilizer effect on grass. *European Journal of Agronomy*. 2025. Vol. 168. 127649. DOI: 10.1016/j.eja.2025.127649.
  33. Overmeyer V., Trimborn M., Clemens J. et al. Acidification of slurry to reduce ammonia and methane emissions: Deployment of a retrofittable system in fattening pig barns. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 331. 117263. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117263.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявленный вклад соавторов:**

Белов А.А. – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов, формирование текста;

Ковалев Д.А. – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов исследования;

Дорохов А.С. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;

Павкин Д.Ю. – литературный анализ, доработка текста и общих выводов;

Карелина М.Ю. – формулирование основных направлений исследования, литературный анализ, доработка текста и общих выводов;

Ковалев А.А. – проведение экспериментальных исследований, формирование текста и визуализация, доработка текста и общих выводов.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

**Coauthors' contribution:**

Belov A.A. – conducting experimental studies, processing the results, and drafting the manuscript;

Kovalev D.A. – conducting experimental studies and processing the results;

Dorokhov A.S. – scientific supervision and formulation of the main research concepts;

Pavkin D.Yu. – literature review, manuscript revision, and formulation of the general conclusions;

Karelina M.Yu. – formulation of the main research concepts, literature review, manuscript revision, and formulation of the general conclusions;

Kovalev A.A. – conducting experimental studies, drafting the manuscript, preparing visual materials, manuscript revision, and formulation of the general conclusions.

*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

03.04.2026  
15.05.2026



## Разработка машины для очеса семенных коробочек льнотресты в условиях льнозавода

**Роман Анатольевич Ростовцев**,  
доктор технических наук,  
член-корреспондент Российской академии наук,  
e-mail: r.rostovcev@fncl.k.ru;  
**Виктор Григорьевич Черников**,  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
член-корреспондент Российской академии наук,  
e-mail: v.chernikov@fncl.k.ru;

**Игорь Борисович Казаков**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: i.kazakov@fncl.k.ru;  
**Владислав Юрьевич Романенко**,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: v.romanenko@fncl.k.ru

Федеральный научный центр лубяных культур, г. Тверь, Российская Федерация

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).*

**Реферат.** Отметили, что используемые в настоящее время очесывающие устройства должны обеспечивать выполнение агротехнических требований в отношении полноты отделения коробочек, отхода стеблей в путанину и повреждения стеблей. Применяемые очесывающие устройства не отвечают этим требованиям из-за большого количества образующейся путанины и наносят повреждения стеблям льна при входе зубьев в ленту. *(Цель исследования)* Разработка нового устройства машины для очеса стеблей на льноперерабатывающем предприятии. Обоснование рациональных параметров и режимов работы машины. *(Материалы и методы)* Разработана и изготовлена стационарная экспериментальная установка с транспортером подачи лент льна для очеса, которая позволяет смоделировать процесс отделения семенных коробочек от стеблей льна-долгунца при очесе. В качестве исходного растительного материала в опытах использовали лен-долгунец сорта Визит. Для проведения эксперимента применялись очесывающие гребенки с разным профилем зубьев. *(Результаты и обсуждение)* Исследования проводили по методике математического планирования многофакторного эксперимента, с применением плана второго порядка Бокса – Бенкина. Наиболее оптимальным профилем оказался зуб в форме окружности. *(Выводы)* Чистота очеса ленты льна-долгунца не менее 98,5 процентов достигается при использовании очесывающей гребенки с круглым сечением зуба, скорости транспортера ленты льна 1,25 метра в секунду и частоте вращения очесывающей гребенки 2,8 оборота в секунду. Полученные данные могут быть применены для изготовления серийных очесывающих установок в линии по переработке льна. Установка адаптирована для встраивания в отечественные линии получения длинного и короткого волокна.

**Ключевые слова:** лен-долгунец, очесывающая гребенка, чистота очеса, машины для очеса стеблей льна.

■ **Для цитирования:** Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Казаков И.Б., Романенко В.Ю. Разработка машины для очеса семенных коробочек льнотресты в условиях льнозавода // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 14-20. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-14-20. EDN: SCBVJL.

Scientific article

## Development of a Machine for Combing Seed Capsules from Flax Straw at a Flax Mill

**Roman A. Rostovtsev**,  
Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, e-mail: r.rostovcev@fncl.k.ru;  
**Viktor G. Chernikov**,  
Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher, corresponding member of the Russian Academy of Sciences,  
e-mail: v.chernikov@fncl.k.ru;

**Igor B. Kazakov**,  
junior researcher,  
e-mail: i.kazakov@fncl.k.ru;  
**Vladislav Yu. Romanenko**,  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: v.romanenko@fncl.k.ru

Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Tver, Russian Federation

*This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops (No. FGSS-2022-0005).*

**Abstract.** Modern combing must meet agrotechnical requirements by ensuring complete separation of flax capsules, preventing stem entanglement, and minimizing damage to flax stems. However, existing designs do not fully satisfy these requirements, as the penetration of comb teeth into the flax ribbon causes excessive entanglement and stem damage. (*Research purpose*) The purpose of the research was to develop a stem-combing device for flax-processing enterprises and to substantiate the rational design parameters and operating modes of the machine. (*Materials and methods*) A stationary experimental setup equipped with a conveyor for feeding flax ribbons into the combing zone was designed and manufactured. The setup made it possible to simulate the separation of seed capsules from fiber flax stems during the combing process. Fiber flax of the Visit variety was used as the initial plant material in the experiments. Combs with different tooth profiles were tested. (*Results and discussion*) The experiments were conducted using the methodology of mathematical design of multifactor experiments based on a second-order Box–Behnken design. Among the tested variants, the comb with a circular profile proved to be the most effective. (*Conclusions*) A combing purity of at least 98.5% for fiber flax ribbons was achieved when using a comb with a circular tooth cross-section, a flax ribbon conveyor speed of 1.25 meters per second, and a comb rotational frequency of 2.8 meter per second. The obtained results can be used in the manufacture of serial combing units for flax processing lines. The proposed unit is suitable for integration into domestic production lines for both long and short flax fiber.

**Keywords:** fiber flax, comb, combing purity, flax stem combing machine.

**■ For citation:** Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Kazakov I.B., Romanenko V.Yu. Development of a machine for combing seed capsules from flax straw at a flax mill. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 14-20 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-14-20. EDN: SCBVJL.

**Л**ен-долгунец относится к важнейшим техническим культурам. Значение льна как возобновляемого источника натурального текстильного сырья возросло из-за снижения поставок хлопка и необходимости обеспечения текстильных предприятий конкурентоспособным отечественным сырьем и оборудованием [1]. Самой трудоемкой и затратной операцией в льноводстве является уборка, а наиболее важной и ответственной – отделение от стеблей семенных коробочек [2, 3].

Согласно агротехническим требованиям очесывающие устройства должны обеспечить полноту отделения коробочек не менее 98%, отход в путанину стеблей – не более 3% и повреждение стеблей – не более 5%. Применяемые очесывающие устройства не отвечают агротехническим требованиям, так как при входе зубьев в ленту повреждаются стебли льна и образуется много путанины [4]. При создании очесывающих устройств прежде всего надо учитывать возможность уменьшить повреждение стеблей, разрывы волокна, сократить отход льнотресты в путанину. Значительная экономия будет получена за счет снижения затрат на сушку вороха и дальнейшую его переработку, а также увеличения выхода длинного волокна [5].

**Цель исследования.** Разработка нового очесывающего устройства машины для очеса стеблей непосредственно на льноперерабатывающем предприятии. Обоснование рациональных параметров и режимов работы очесывающей машины.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являются очесывающие аппараты, применяемые

для уборки льна-долгунца на отечественных и зарубежных машинах. В процессе исследования применялись методы сравнительного и системного анализа данных.

Очесыватель предназначен для отделения вороха льна. Особенность отделения семян на линии заключается в том, что в очесывающий аппарат подается лента льнотресты высокой степени растянутости с относительным перекосом стеблей и присутствием скрученных стеблей [6].

Несмотря на то, что семенные коробочки льна вызревшие, влажностью 12-14%, легко разрушаются и отрываются от плодоножки, применение в линиях очесывающих аппаратов колебательного типа с одним гребневым рабочим органом сопровождается повреждением стеблей, отходом их в путанину (до 8%), высокой повреждаемостью семян, намотками на рабочий орган [7]. Для снижения отрицательного воздействия очесывающего аппарата гребневой рабочий орган заменили на гребенку с измененной формой зуба [8].

Исследования проводились по типичным, общепринятым методикам с применением приборов и оборудования в соответствии с ГОСТ СТО АИСТ 1. 13-2011. В опытах использовали лен-долгунец сорта Визит селекции ОП НИИЛ (г. Торжок).

Характеристика льна-долгунца сорта Визит: фаза спелости – ранняя желтая; скороспелость – среднеспелый; регион возделывания – Северо-Западный; густота стеблестоя – 600 шт/м<sup>2</sup>; средняя общая длина стеблей – 1,05 м; средний диаметр стеблей – 1,30 мм; зона расположения семенных

коробочек в стеблестое – 0,20 см; номер длинного льноволокна – 11,7; содержание волокна в стеблях – 32,0%; выход длинного волокна – 29,0%; урожайность, ц/га: семян – 4,6, соломы – 79,8, волокна – 25,5.

С помощью прицепного льноуборочного комбайна ЛК-4А с отключенным очесывающим аппаратом лен тербели и укладывали в ленту. Вручную вязали снопы, ставили в бабки на поле для сушки. Для дальнейшей обработки растительный материал перевозили в научно-производственную лабораторию ФНЦ лубяных культур (рис. 1) [9].



Рис. 1. Ленты и снопы льна  
Fig. 1. Windrowed flax and flax sheaves

Для исследований процесса очеса лент льна на опытном производстве изготовлена стационарная экспериментальная установка с транспортером подачи лент льна (рис. 2). Установка адаптирована для встраивания в отечественные линии получения длинного и короткого волокна.

#### Технические характеристики лабораторной установки

Производительность, кг/мин	5-25
Линейная скорость транспортера (колеса), м/мин	1,2-4,0
Ширина рабочей зоны, мм	1100
Расчетная скорость подачи ленты, м/с	1,0-2,0
Профиль зуба гребенки	Прямоугольник / ромб / окружность
Мощность, кВт	3,7
Габаритные размеры, мм	2720×1420×2815
Масса машины, кг	1550

Льнотреста с конвейера сушилки 4 подается по конвейеру 3 в зону очеса между рабочим колесом 1 и верхней ветвью зажимного транспортера 2. В этой зоне происходит отрыв семенных коробочек от находящихся в ленте стеблей при возвратно-поступательных движениях очесывающей гребенки 5 за счет движения качалки 6 с эксцентриком. Для регулирования частоты вращения гребенки и скорости движения транспортера с трестой установлены частотные преобразователи [10].

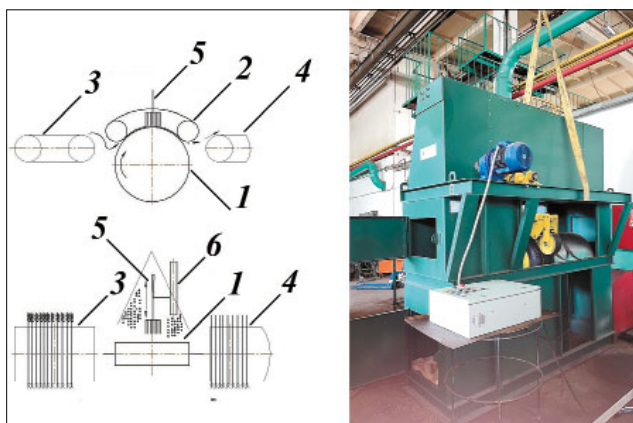


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема и общий вид экспериментальной установки для очеса лент льна  
Fig. 2. Schematic diagram and general view of the experimental setup for flax ribbon combing

Ленты льна очесывали съемными гребенками с различными формами зубьев (рис. 3). Гребенки изготовлены в научно-производственной лаборатории ФНЦ лубяных культур с учетом особенностей строения стебля и должны гарантировать качественный очес, минимизировать образование путанины в ворохе и обеспечивать минимальное усилие на прочес. Ширина рабочей зоны гребенок – 365 мм; количество зубьев – 19, длина зуба 210 мм, толщина зуба: прямоугольного (Z1) и ромбического (Z2) – 8 мм, круглого (Z3) – 10 мм; габаритные размеры гребенки 365 × 72 × 210.



Рис. 3. Гребенки очесывающего устройства с зубьями разной формы: Z1 – прямоугольные; Z2 – ромбические; Z3 – круглые

Fig. 3. Combs of the combing unit with teeth of different cross-sectional shapes: Z1 – rectangular; Z2 – diamond-shaped; Z3 – circular

Сноп льна раскладывали на столе перед очесывателем в ленту на отрезке длиной 2 м, выравнивая по верхушечной части и толщине. Лента равномерно подавалась в зажимной транспортер, расположенный в камере очеса. Гребенкой семенные коробочки отделялись от стеблей и образовывался семенной ворох из семенных коробочек, свободных семян и путанины (рис. 4).

Очесанный материал собирался в бункер вороха (рис. 5), а очесанная лента выходила с другой стороны установки. Ворох со свободными семенами собирали в тару, нумеровали и взвешивали на электронных весах марки ВЛТЭ-1100Т. На ленте

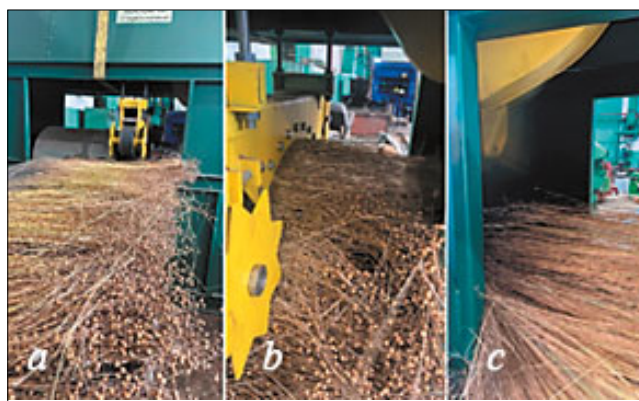


Рис. 4. Экспериментальная установка для очеса ленты льна: а – подача ленты; б – очес ленты; с – выход ленты  
 Fig. 4. Experimental setup for combing a flax ribbon: a – ribbon feeding; b – ribbon combing; c – discharge of the combed ribbon



Рис. 5. Очесанный льноворох из бункера (а), стебли после очеса и отсортированный ворох (б)  
 Fig. 5. Combed flax material discharged from the hopper (a); flax stems after combing and sorted material (b)

подсчитывали неочесанные со стеблей семенные коробочки и определяли чистоту очеса.

Опыты проводили в трехкратной повторности и для исключения влияния неконтролируемых факторов рандомизированно.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Критерием оптимизации работы очесывающего аппарата на основании теоретических исследований была выбрана чистота очеса. По выполненным ранее исследованиям выделены наиболее существенные факторы, влияющие на качество очеса:  $X_1$  – форма зуба гребенки ( $Z_x$ );  $X_2$  – скорость движения ленты льна, м/с;  $X_3$  – частота вращения очесывающего барабана,  $c^{-1}$ .

Выявлено, что очес лент льна гребенками со всеми тремя профилями зуба осуществляется на разных уровнях варьирования факторов  $X_1, X_2, X_3$ . Для реализации уравнения был принят некомпозиционный план второго порядка Бокса–Бенкина. Матрица планирования некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов представлена в таблице [11].

После обработки данных многофакторного эксперимента программным пакетом *Statgraphics 18* получены значения функций отклика. Уравнение регрессии с учетом значимости коэффициентов имеет вид:

$$Y = 97,381 + 0,46X_1 - 0,92X_2 + 2,52X_3 + 0,0625X_1X_2 - 0,1625X_1X_3 + 0,0625X_2X_3 + 0,26875X_1^2 - 0,13125X_2^2 - 1,63135X_3^2,$$

где  $X_1, X_2$  и  $X_3$  – кодированные значения факторов.

Анализ уравнений регрессии показал, что на чистоту очеса наибольшее влияние оказывает фактор  $X_3$ , т.е. частота вращения очесывающей гребенки. Для регрессионной модели построены поверхности отклика и их двумерные сечения в соответствии с рисунком б.

Таблица		МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА / EXPERIMENTAL DESIGN MATRIX			Table
Опыт	Фактор			Средняя чистота очеса	
	Форма зуба гребенки, $X_1$	Скорость транспортера, $X_2$	Частота вращения гребенки, $X_3$		
1	Z3	1,8	3,0	97,9	
2	Z1	1,8	3,0	97,2	
3	Z3	1,0	3,0	99,3	
4	Z1	1,0	3,0	98,8	
5	Z3	1,8	2,5	93,3	
6	Z1	1,8	2,5	91,9	
7	Z3	1,0	2,5	94,9	
8	Z1	1,0	2	93,8	
9	Z3	1,4	2,5	98,1	
10	Z1	1,4	2,5	97,2	
11	Z2	1,8	2,5	95,9	
12	Z2	1,0	2,5	98,6	
13	Z2	1,4	3,0	98,7	
14	Z2	1,4	2	92,8	

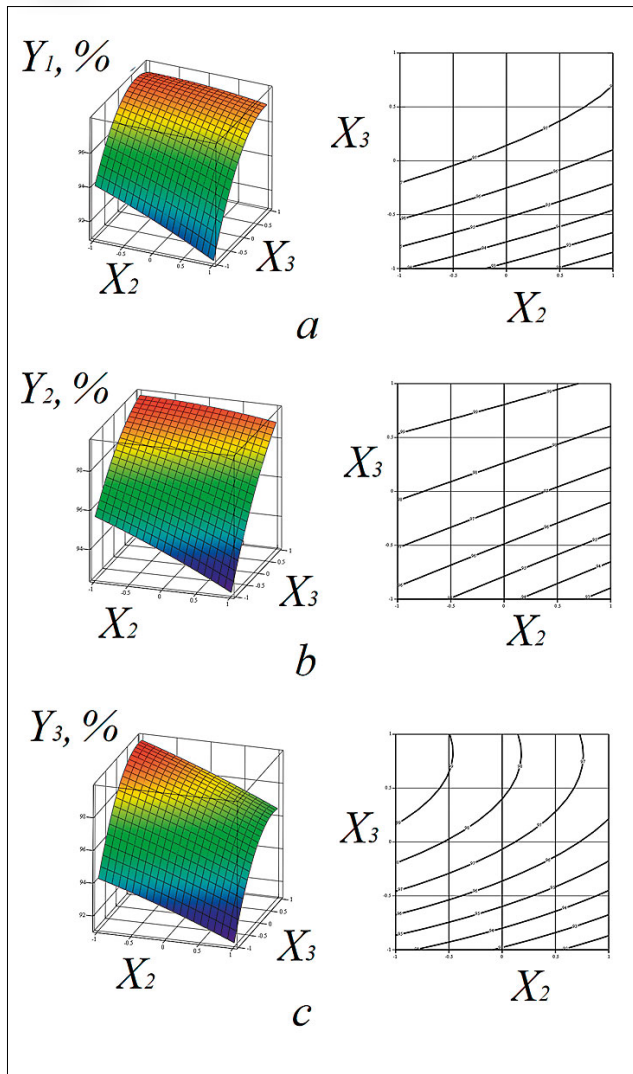


Рис. 6. Поверхность отклика и двумерное сечение, характеризующие зависимость чистоты очеса от скорости движения ленты льна  $X_2$  и частоты вращения очесывающей гребенки  $X_3$ : а – при использовании гребенки Z1; б – при использовании гребенки Z2; с – при использовании гребенки Z3

Fig. 6. Response surfaces and two-dimensional sections characterizing the dependence of combing efficiency on the flax windrow travel speed,  $X_2$ , and the rotational speed of the comb,  $X_3$ : a – for comb Z1; b – for comb Z2; c = for comb Z3

Поверхности откликов регрессионной модели представляют собой эллиптический параболоид. Анализ поверхностей откликов показывает, что с

увеличением скорости подачи ленты льна к очесывающей гребенке снижается чистота очеса, особенно при очесе гребенкой с прямоугольной формой зуба. Это объясняется тем, что с ростом подачи увеличивается количество очесываемых стеблей в единицу времени.

Очесывающая гребенка с зубьями в форме ромба оказывает режущее воздействие на очесываемый материал, в связи с этим увеличивается повреждение стеблей. Наименьшее количество путанины и наивысшая чистота очеса получены при использовании гребенки с круглыми зубьями.

Таким образом, при работе в промышленных условиях будет возникать вероятность быстрого забивания путаниной зубьев прямоугольной формы. В случае использования гребенки с зубьями ромбовидной формы высока вероятность порчи волокна, снижения качества очеса и повышения энергозатрат. По этой причине наиболее оптимальный круглый профиль зубьев очесывающей гребенки [12, 13].

Разработана методика проведения многофакторного эксперимента по определению чистоты очеса. Опытным путем подтверждены теоретические исследования конструкции и режима работы очесывающего гребня. Предложенная в результате лабораторных исследований математическая модель позволила определить значения факторов, при которых достигается максимальная степень очеса: скорость подачи ленты льна – 1,25 м/с; частота вращения рабочего органа – 2,8 с<sup>-1</sup>. Полученные данные могут быть применены для изготовления серийных очесывающих установок для линий переработки лент льна.

**Выводы.** Научно обоснованы и экспериментально подтверждены параметры и режимы работы машины для очеса стеблей льна: линейная скорость транспортера 1,3-1,5 м/с; рабочий орган гребневого типа с гладкими конусообразными зубьями и частота его вращения 2,5-3 с<sup>-1</sup>, позволяющие уменьшить потери семян на 10%, снизить трудоемкость и энергоемкость процесса уборки льна-долгунца на 8%.

Изготовлен опытный образец машины для очеса семенных коробочек на перерабатывающем предприятии с предлагаемым устройством гребневого типа, обеспечивающий чистоту очеса не менее 98,5% и снижение повреждения стеблей на 7%.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Инновационные достижения агробиотехнологических научных учреждений в условиях развития цифровых систем в сельском хозяйстве // *Техника и оборудование для села*. 2024. N5(323). С. 2-8. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-5-2-8.
2. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. Исследование технологий уборки льна льноуборочными ма-

- пинами // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 19-24. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24.
3. Пучков Е.М., Медведев Ю.А., Галкин А.В., Шишин Д.А. Ресурсосберегающие технологии и технические средства для переработки и сушки льновороха, адаптированные к комбайновой, раздельной и комбинированной уборке льна // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2018. №1(56). С. 155-164. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.1.155.
  4. Радишевский Г.А., Гурнович Н.П., Портянко Г.Н., Белый С.Р. Выбор параметров однобарабанного очесывающего аппарата льноуборочных машин // *Агропанорама*. 2022. №2(150). С. 21-24. EDN: WMCNHI.
  5. Зинцов А.Н., Шевченко В.С., Ковалев М.М., Перов Г.А. Влияние рабочих органов машин при раздельной уборке льна-долгунца на распределение изгибной жесткости стеблей по технической длине растений // *Аграрный вестник Нечерноземья*. 2025. №4(20). С. 60-70. EDN: WKCBET.
  6. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. Оценка возможности ориентирования ленты льна в подборщиках-очесывателях // *Аграрный вестник Нечерноземья*. 2025. №1(17). С. 36-43. DOI: 10.52025/2712-8679\_2025\_01\_36.
  7. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Соловьев С.В., Казаков И.Б. Технология и установка очеса в линии первичной переработки льна-долгунца // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №3. С. 43-47. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-43-47.
  8. Лачуга Ю.Ф., Ковалев М.М., Перов Г.А., Галкин А.В. Методика определения закономерности растяжения группы стеблей растительных материалов // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. №1. С. 67-71. DOI: 10.31857/S2500262721010166.
  9. Соловьев С.В. Совершенствование технологического процесса теребления льна-долгунца при раздельной уборке // *Тракторы и сельхозмашины*. 2025. Т. 92. №3. С. 302-311. DOI: 10.17816/0321-4443-634963.
  10. Романенко В.Ю., Соловьев С.В. К анализу процесса очеса льна-долгунца на корню // *Таврический вестник аграрной науки*. 2023. №3(35). С. 189-198. DOI: 10.5281/zenodo.10141680.
  11. Фирсов А.С., Сизов И.В., Пак Л.Н. Лабораторно-полевые исследования высевающей системы при мозаичном посеве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. №19(2). С. 72-77. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-72-77.
  12. Абрамов И.Л. Нелинейная математическая модель разрушения натурального льняного волокна с учетом анизотропии и повреждаемости // *Техника и оборудование для села*. 2026. №1(343). С. 11-14. DOI: 10.33267/2072-9642-2026-1-11-14.
  13. Королева Е.Н., Новиков Э.В., Безбабченко А.В. Прогнозирование производственных значений выхода и номера трепаного льна по результатам лабораторных исследований // *Техника и оборудование для села*. 2022. №6(300). С. 2-5. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-6-2-5.

## REFERENCES

1. Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogonov Yu. K. Innovative achievements of agroengineering scientific institutions in the context of the development of digital systems in agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024. №5(323). 2-8 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2024-5-2-8.
2. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. Research of flax harvesting technologies by flax harvesting machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. №1. 19-24 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24.
3. Puchkov E.M., Medvedev Yu.A., Galkin A.V., Shishin D.A. Resource-saving technologies and technical means for processing and drying flax heap, adapted to combine, separate and combined harvesting of flax. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2018. №1 (56). 155-164 (In Russian). DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.1.155.
4. Radishevsky G.A., Gurnovich N.P., Portyanko G.N., Bely S.R. The choice of parameters of a single-drum combining machine of flax harvesters. *Agropanorama*. 2022. №2(150). 21-24 (In Russian). EDN: WMCNHI.
5. Zintsov A.N., Shevchenko V.S., Kovalev M.M., Perov G.A. The influence of the working bodies of machines during separate harvesting of fiber flax on the distribution of the bending rigidity of stems along the technical length of plants. *Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem Region*. 2025. №4(20). 60-70 (In Russian). EDN: WKCBET.
6. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Assessment of the possibility of orienting flax strips in balers. *Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem region*. 2025. №1(17). 36-43 (In Russian). DOI: 10.52025/2712-8679\_2025\_01\_36.
7. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Soloviev S.V., Kazakov I.B. Technology and installation of baling in the line of primary processing of flax. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. №3. 43-47 (In Russian). DOI: 10.22314/2073759920231734347.
8. Lachuga Yu.F., Kovalev M.M., Perov G.A., Galkin A.V. Method for determining the pattern of stretching groups of stems of plant materials. *Russian Agricultural Sciences*. 2021. №1. 67-71 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262721010166.
9. Solovyov S.V. Improvement of the technological process of spinning flax with separate harvesting. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025. Vol. 92. №3. 302-311 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-634963.
10. Romanenko V.Yu., Solovyov, S.V. On the analysis of the flax-flax harvesting process at the root. *Tauride Bulletin*

of *Agrarian Science*. 2023. N3(35). 189-198 (In Russian). DOI: 10.5281/zenodo.10141680.

11. Firsov A.S., Sizov I.V., Pak L.N. Laboratory and field studies of the seeding system for mosaic sowing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 72-77. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-72-77.
12. Abramov I.L. Nonlinear mathematical model of natural linen fiber destruction taking into account anisotropy and

damageability. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2026. N1(343). 11-14 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2026-1-11-14.

13. Koroleva E.N., Novikov E.V., Bezbabchenko A.V. Prediction of production values for the yield and number of scutched flax based on the results of laboratory studies. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N6(300). 2-5 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-6-2-5.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Ростовцев Р.А. – научное руководство, постановка проблемы;  
 Черников В.Г. – формирование общих выводов, редактирование текста статьи;  
 Казаков И.Б. – сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, проведение опытов;  
 Романенко В.Ю. – литературный анализ, проведение математического анализа, доработка текста, подготовка материала к публикации.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Coauthors' contribution:

Rostovtsev R.A. – conceptualization, supervision;  
 Chernikov V.G. – formulation of the general conclusions, manuscript editing;  
 Kazakov I.B. – collection and analysis of theoretical and experimental materials, experimental investigation;  
 Romanenko V.Yu. – literature review, mathematical analysis, manuscript revision, preparation of the paper for publication.  
*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
 The paper was accepted for publication on

02.03.2026  
 20.04.2026

EDN: KFBGAD

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-21-29



Научная статья

УДК 629.3.014.5:621.313.13



## Разработка динамометрического стенда для комплексных испытаний мотор–колес

**Максим Анатольевич Прокопов**<sup>1,2</sup>,  
аспирант, ведущий советник отдела,  
e-mail: maprokov26@yandex.ru;  
**Сергей Николаевич Девянин**<sup>1</sup>,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: devta@rambler.ru;

**Андрей Юрьевич Кульчев**<sup>1,3</sup>,  
аспирант, научный сотрудник,  
e-mail: andreikulchev@yandex.ru;  
**Павел Иванович Бурак**<sup>2</sup>,  
доктор технических наук,  
заместитель директора департамента,  
e-mail: p.burak@mcx.gov.ru

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Министерство сельского хозяйства РФ, Москва, Российская Федерация;

<sup>3</sup>Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Развитие электрифицированного транспорта сдерживается отсутствием унифицированных методик и стендов для оценки характеристик мотор-колес в условиях, приближенных к реальным. Существенное ограничение аналогов – невозможность синхронной регистрации электрических и механических параметров при совместном действии вертикальной нагрузки и горизонтального тягового сопротивления. (*Цель исследования*) Разработка динамометрического стенда с комбинированной системой нагружения и методики комплексных испытаний. (*Материалы и методы*) Стенд включает раму в виде подвижной платформы с мотор-колесом и площадками для грузов, создающих вертикальную нагрузку, и платформу имитации нагрузки, создающую регулируемое тяговое сопротивление. Задняя часть через силоизмерительный узел гибко соединена с платформой имитации нагрузки. Микроконтроллерный блок синхронно регистрирует силу тока, напряжение, частоту вращения, температуру и время. (*Результаты и обсуждение*) Испытания проведены на асфальтобетоне при нагрузке на колесо 300 ньютонов, базе модуля 0,6 метра, радиусе колеса 0,125 метра, начальном показании вертикального динамометра 50 ньютонов, коэффициентах сопротивления качению 0,02 и сцепления 0,7. Варьировали нагрузку на платформу (50-400 ньютонов), мощность (50-600 ватт). Выведены кинематические зависимости. При нагрузке 100 ньютонов и мощности 50-350 ватт касательная сила составила 58,7 ньютона, тяговое усилие – 52,7 ньютона, показание вертикального датчика – 37,8 ньютона, сопротивление качению – 6,0 ньютонов, крутящий момент – 7,3 ньютона на метр. При 350 ньютонах касательная сила возросла до 192 ньютонов, тяговое усилие – до 186 ньютонов, вертикальное уменьшилось до 10 ньютонов, сопротивление качению – 6,0 ньютонов, момент – 24 ньютонов на метр. Момент изменялся за счет нагрузки платформы и почти не зависел от мощности. При нагрузке выше 384 ньютона зафиксировано буксование. (*Выводы*) Стенд позволяет синхронно получать временные зависимости электрических и механических параметров для оценки коэффициента полезного действия мотор-колеса, определения сопротивления качению, валидации математических моделей и обоснования алгоритмов управления тяговым электроприводом в диапазоне эксплуатационных нагрузок.

**Ключевые слова:** мотор-колесо, динамометрический стенд, комбинированное нагружение, тягово-энергетические характеристики, синхронная регистрация, сопротивление качению, крутящий момент, электропривод.

■ **Для цитирования:** Прокопов М.А., Девянин С.Н., Кульчев А.Ю., Бурак П.И. Разработка динамометрического стенда для комплексных испытаний мотор-колес // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 21-29. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-21-29. EDN: KFBGAD.

Scientific article

## Development of a Dynamometric Test Stand for Comprehensive Motor–Wheel Assembly Testing

**Maxim A. Prokopov**<sup>1,2</sup>,  
graduate student, lead advisor,  
e-mail: maprokov26@yandex.ru;

**Sergei N. Devyanin**<sup>1</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), professor,  
e-mail: devta@rambler.ru;

**Andrei Yu. Kulchev**<sup>1,3</sup>,  
graduate student, researcher,  
e-mail: andreikulchev@yandex.ru;

**Pavel I. Burak**<sup>2</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), deputy director of department,  
e-mail: pi.burak@mcx.gov.ru

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Moscow;

<sup>3</sup>Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The development of electrified transport is constrained by the lack of unified methods and test stands for evaluating the characteristics of motor-wheel assemblies under conditions close to real operation. A significant limitation of existing analogues is their inability to synchronously record electrical and mechanical parameters under the combined effect of vertical load and horizontal tractive resistance. (*Research purpose*) The study aimed to develop a dynamometric test stand with a combined loading system and a methodology for comprehensive testing. (*Materials and methods*) The test stand consists of a frame designed as a movable platform equipped with a motor-wheel assembly and weight platforms used to apply a vertical load, as well as a load simulation platform that generates adjustable tractive resistance. The rear section of the movable platform is flexibly connected to the load simulation platform through a force-measuring unit. A microcontroller unit synchronously records current, voltage, rotational speed, temperature, and time. (*Results and discussion*) Tests were carried out on asphalt concrete at a wheel load of 300 newtons, a module base length of 0.6 meters, a wheel radius of 0.125 meters, an initial vertical dynamometer reading of 50 newtons, a rolling resistance coefficient of 0.02, and an adhesion coefficient of 0.7. The platform load was varied from 50 to 400 newtons, and the power input from 50 to 600 watts. Kinematic relationships were derived. At a platform load of 100 newtons and a power range of 50–350 watts, the tangential force was 58.7 newtons, the tractive force was 52.7 newtons, the vertical sensor reading was 37.8 newtons, the rolling resistance was 6.0 newtons, and the torque was 7.3 newton-meters. At a platform load of 350 newtons, the tangential force increased to 192 newtons, the tractive force to 186 newtons, while the vertical force decreased to 10 newtons, the rolling resistance remained 6.0 newtons, and the torque reached 24 newton-meters. The torque varied with the platform load and was almost independent of the power input. Slippage was recorded at loads above 384 newtons. (*Conclusions*) The test stand enables synchronous acquisition of time-dependent electrical and mechanical parameters for evaluating the efficiency of a motor-wheel assembly, determining rolling resistance, validating mathematical models, and substantiating control algorithms for traction electric drives over the operating load range.

**Keywords:** motor-wheel assembly, dynamometric test stand, combined loading, traction and energy characteristics, synchronous recording, rolling resistance, torque, electric drive.

■ **For citation:** Prokopov M.A., Devyanin S.N., Kulchev A.Yu., Burak P.I. Development of a dynamometric test stand for comprehensive motor-wheel assembly testing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 21-29 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-21-29. EDN: KFBGAD.

Развитие транспорта и самоходных машин характеризуется трендом на электрификацию и декарбонизацию [1]. В современном мире традиционные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) постепенно вытесняются тяговыми электродвигателями [2], обеспечивающими лучшие экологические характеристики и возможности оперативного управления. Требования к снижению выбросов углекислого газа, повышению топливной эффективности и улучшению экологических факторов стимулируют переход на электродвигатели и гибридные системы [3]. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге находится на этапе постепенного перехода от опытных образцов (макетов) к мелкосерийному производству [4]. К наиболее перспективным направлениям относится внедрение мотор-колес, представляющих собой бесщеточный синхронный двигатель, встроенный непосредственно в ступицу колеса [5].

Неоспоримое преимущество мотор-колеса состоит в возможности индивидуального привода для многоосных машин. Однако его широкому внедрению препятствует ряд ограничений: адаптивные алгоритмы управления, эффективное отведение тепла от электродвигателя, ресурс аккумуляторных батарей, отсутствие серийного производства, отсутствие стандартизации продукции [6], довольно низкий уровень развития инфраструктуры, особенно для интегральных решений типа мотор-колесо [7]. Также существуют научно-технические проблемы, наиболее актуальная из них заключается в отсутствии унифицированных методик и оборудования для комплексных испытаний мотор-колес в условиях, приближенных к реальной эксплуатации [8].

Отсутствие испытательных стендов, позволяющих воспроизвести реальные тягово-сцепные свойства [9], – одна из главных причин возникновения существенных расхождений между расчетными и

реальными энергетическими затратами при эксплуатации тракторов с электрической тягой [10], а значительная доля неисправностей связана именно с некорректным моделированием внешних нагрузок [11].

Кроме того, выбор режимов испытания электродвигателей в лабораторных условиях должен базироваться на данных о реальных нагрузочных циклах, в противном случае результаты испытаний не могут быть экстраполированы на натурную эксплуатацию [12].

**Цель исследования:** разработка стенда, позволяющего моделировать комплексные эксплуатационные нагрузки на мотор-колесо и осуществлять синхронную фиксацию его основных параметров для определения эффективных режимов работы.

**Материалы и методы.** Проведен обзор и сравнительный анализ стендов для испытаний колес и электродвигателей (Патенты RU 2838715, 180157, 2793016, 2778737) по следующим критериям: возможность создания комбинированного нагружения (вертикальная и горизонтальная составляющие), наличие синхронной регистрации электрических и механических параметров, возможность испытаний на деформируемых опорных поверхностях. Анализ выполнен с учетом общих принципов построения динамометрических стендов, математического моделирования испытательного оборудования [13], а также результатов исследований энергоэффективности самоходных машин [14].

В результате анализа выявлен общий недостаток существующих аналогов – невозможность моделирования совместного воздействия вертикальной нагрузки и горизонтального тягового сопротивления при качении по реальным деформируемым поверхностям с одновременным контролем электрических характеристик тягового электродвигателя, силовых параметров тяги и сопротивлений. Наиболее близким по совокупности существенных признаков является стенд для испытаний колес и подвесок мобильных роботов (Патент RU 2778737), содержащий поворотную раму, устройство для имитации веса, конвейерную ленту с грунтозацепами и канал, заполненный грунтом. Недостаток прототипа – отсутствие системы для создания и измерения регулируемого горизонтального тягового сопротивления, имитирующего работу с сельскохозяйственным орудием, и недостаточность измерительного комплекса для синхронного контроля электрических и механических параметров.

На основе анализа эксплуатационных режимов мотор-колес сформулированы требования к синхронной регистрации параметров. Определен перечень регистрируемых величин: электрические – сила тока и напряжение; механические – частота вращения, крутящий момент, тяговое усилие. Ана-

лиз схемотехники тяговых электроприводов [15] подтверждает необходимость синхронной регистрации указанных выше величин. Установлено, что в большинстве известных аналогов не предусмотрена возможность синхронной регистрации указанных параметров в единой системе сбора данных [16].

Для определения требуемых диапазонов вертикальных и горизонтальных нагрузок, воспроизводимых стендом, использован аналитический метод на основе уравнений тягового баланса мотор-колеса, а также учтены зависимости энергопотребления от характеристик двигателя [17] и опубликованные результаты моделирования работы электрического трактора в составе агрегата [18].

**Результаты и обсуждение.** Технической проблемой, на решение которой направлено изобретение, является необходимость создания стенда, используемого для моделирования комплексных эксплуатационных нагрузок на мотор-колесо и синхронной фиксации его основных рабочих параметров в лабораторно-полевых условиях [19]. Технический результат изобретения: расширение функциональных возможностей стенда за счет обеспечения независимого дозированного создания вертикальной и горизонтальной нагрузок при качении дифференцируемым поверхностям и комплексного контроля механических и электрических параметров.

Оригинальное техническое решение в виде конструкции стенда для комплексных испытаний мотор-колес представлено на *рисунке 1*.

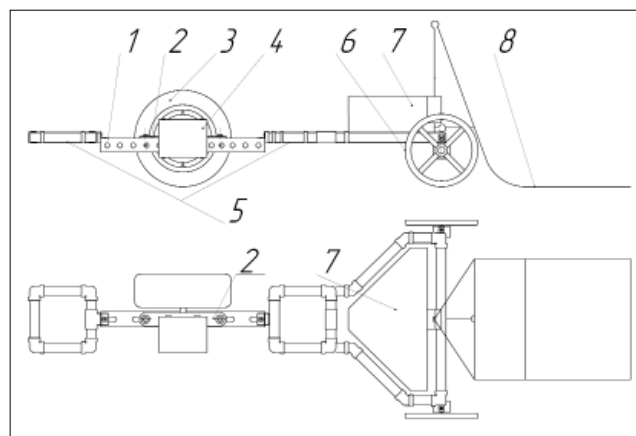


Рис. 1. Общий вид стенда для комплексных испытаний мотор-колес с комбинированной системой нагружения (Патент RU 2026109012)

Fig. 1. General view of the combined-loading test stand for comprehensive testing of motor-wheel assemblies (Patent RU 2026109012)

Стенд изготовлен в виде двух разборных модулей.

Первый модуль представляет собой подвижную платформу 1, в передней части которой смонтировано крепление 2 для установки испытуемого мо-

тор-колеса 3 с возможностью вращения. Измерительный блок 4 выполнен на базе программируемого вычислителя (микроконтроллера или персонального компьютера) с устройством сбора данных и средством визуализации. В составе блока – средства измерения времени ( $t$ , с), частоты вращения мотор-колеса ( $n$ , мин<sup>-1</sup>), температуры электродвигателя ( $t$ , °С), силы тока ( $I$ , А) и напряжения ( $U$ , В) в цепи. По обе стороны мотор-колеса симметрично закреплены горизонтальные площадки 5 для съемных грузов, создающих дозированную вертикальную нагрузку. В задней части платформа дополнительно снабжена вспомогательными опорными элементами (колесами-роликами) 6, обеспечивающими устойчивость при нагружении, и через силоизмерительный узел 7 гибко соединена со вторым модулем – платформой имитации нагрузки 8. Силоизмерительный узел 7 включает как минимум один датчик силы для измерения горизонтальной ( $P_{\Gamma}$ , Н) и вертикальной ( $P_{\text{В}}$ , Н) составляющих [20]. Платформа имитации нагрузки 8 взаимодействует с опорной поверхностью и предназначена для создания регулируемого горизонтального тягового сопротивления, аналогичного соединению с рабочим органом (например, ковшем или волокушей).

Отличительные признаки, обеспечивающие новый технический результат:

- наличие на одной подвижной платформе двух независимых систем нагружения – вертикальной (через грузовые площадки) и горизонтальной (через платформу имитации нагрузки), что позволяет точно моделировать реальные условия работы мотор-колеса, например, колеса трактора, на которое действует вес агрегата и сопротивление почвы;
- комплексный измерительный блок, объединяющий средства контроля механических и электрических параметров, а также термометр для контроля температуры электродвигателя;
- силоизмерительный узел с двумя датчиками силы, ориентированными на измерение горизонтальной и вертикальной составляющих реакции рабочего органа, что обеспечивает возможность расчета крутящего момента мотор-колеса.

Предлагаемая архитектура обеспечивает синхронную регистрацию всех измеряемых параметров, возможность гибкой настройки системы, алгоритмов обработки данных и сохранение результатов испытаний для последующего анализа.

Конструкция стенда позволила реализовать следующую методику испытаний мотор-колес. Испытуемое мотор-колесо закрепляется в передней части подвижной платформы. На горизонтальные площадки и платформу имитации нагрузки размещаются грузы, масса которых соответствует требуемой вертикальной нагрузке. Стенд находится на опорной поверхности, соответствующей ти-

пу грунта или дорожного покрытия, подлежащего моделированию. Уровень вертикальной и горизонтальной нагрузок определяется планом испытаний.

Мотор-колесо приводится во вращение задаваемым током питания, а система нагружения создает заданное горизонтальное тяговое сопротивление. Силоизмерительный узел 7 регистрирует горизонтальную и вертикальную составляющие силы, действующей на подвижную платформу. Одновременно измерительный блок фиксирует механические, электрические параметры, температуру элементов конструкции и время.

Программируемое устройство осуществляет сбор данных со средств измерения, их обработку и отображение на средстве визуализации.

По завершении испытаний формируется протокол, содержащий временные зависимости всех регистрируемых параметров, а также рассчитанные тягово-энергетические характеристики.

Кинематическая схема процесса измерения изображена на рисунке 2. Максимальная сила тяги, которую может реализовать мотор-колесо без пробуксовки, определяется коэффициентом сцепления и вертикальной нагрузкой на колесо.

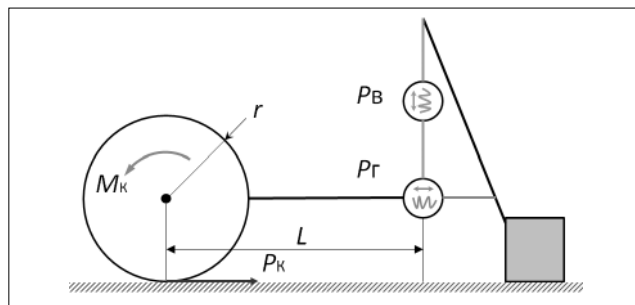


Рис. 2. Кинематическая схема процесса измерения:  $M_K$  – крутящий момент;  $P_{\Gamma}$  – тяговое усилие;  $P_{\text{В}}$  – сила вертикальной реакции;  $r$  – радиус мотор колеса;  $L$  – постоянное плечо стэнда;  $P_K$  – касательная сила сопротивления

Fig. 2. Kinematic diagram of the measurement process:  $M_K$  – torque;  $P_{\Gamma}$  – traction force;  $P_{\text{В}}$  – vertical reaction force;  $r$  – motor-wheel radius;  $L$  – fixed lever arm of the test stand;  $P_K$  – tangential resistance force

В установленном режиме динамометр, измеряющий тяговое усилие ( $P_{\Gamma}$ , Н), показывает отношение приложенного момента ( $M_K$ , Н·м) к радиусу мотор-колеса ( $r$ , м) за вычетом силы сопротивления качению ( $P_f$ , Н):

$$\frac{M_K}{r} = P_K = P_{\Gamma} + P_f. \quad (1)$$

Крутящий момент стремится перевернуть основную платформу, создавая вертикальную реакцию на плече ( $L$ , м), что изменяет силу вертикального динамометра ( $P_{\text{В}}$ , Н) на величину  $\Delta P_{\text{В}}$ . Таким образом, крутящий момент определяется произведением вертикальной реакции на постоянное плечо

чо стенда (основную платформу) и характеризуется следующей формулой:

$$M_k = \Delta P_B \cdot L. \quad (2)$$

Принимая во внимание связь крутящего момента с тяговым усилием через динамический радиус мотор-колеса ( $r$ ), получаем:

$$\Delta P_B \cdot L = M_k = \frac{M_k}{r} \cdot r = (P_T + P_f) \cdot r,$$

$$\frac{\Delta P_B}{(P_T + P_f)} = \frac{r}{L}. \quad (3)$$

Данное соотношение сил является практически постоянным и показывает, что результаты измерений динамометров определяются исключительно геометрическими параметрами стенда и силой сопротивления качению.

Сила сопротивления качению может быть определена по результатам измерений с использованием выражения (3) по зависимости:

$$P_f = \frac{L}{r} \cdot \Delta P_B - P_T. \quad (4)$$

Измеряемые силы будут варьироваться в зависимости от условий испытаний мотор-колеса на стенде: мощности, подведенной к колесу, величины установленного груза на платформе, вида опорной поверхности и др.

Для оценки результатов измерений в процессе экспериментов проведены расчетные исследования характеристик мотор-колеса: максимальная частота вращения – 2000 мин<sup>-1</sup>; максимальный крутящий момент – 57 Н·м; радиус мотор-колеса – 0,125 м; диаметр оси – 16 мм; масса – 3,6 кг.

Исследования проводились для движения по асфальтобетонной поверхности с коэффициентом сопротивления качению  $f = 0,02$  и коэффициентом сцепления колеса с опорной поверхностью  $\varphi_k = 0,7$ . Изменение сопротивления платформы нагружения обеспечивалось за счет съемных грузов от 50 до 400 Н при коэффициенте сопротивления движению платформы  $\varphi_c = 0,6$ . Показания вертикального датчика в положении покоя, когда мотор-колесо не нагружено моментом:  $P_{B0} = 50$  Н. База модуля 1 составляла  $L = 0,6$  м. Весовая нагрузка на мотор-колесо (модуль 1) принималась постоянной:  $G_k = 300$  Н. Подводимая мощность к мотор-колесу изменялась в диапазоне от 50 до 600 Вт.

На рисунке 3 представлены результаты влияния подводимой к мотор-колесу мощности ( $N_k$ ) при нагружении платформы весом  $G_c = 100$  Н.

При увеличении подводимой к мотор-колесу мощности от 50 до 350 Вт значения действующих сил оставались постоянными: касательная сила мотор-колеса  $P_k = 58,7$  Н, показания датчика тяги (горизонтального)  $P_T = 52,7$  Н, вертикального датчика  $P_B = 37,8$  Н, сопротивление качению мотор-колеса

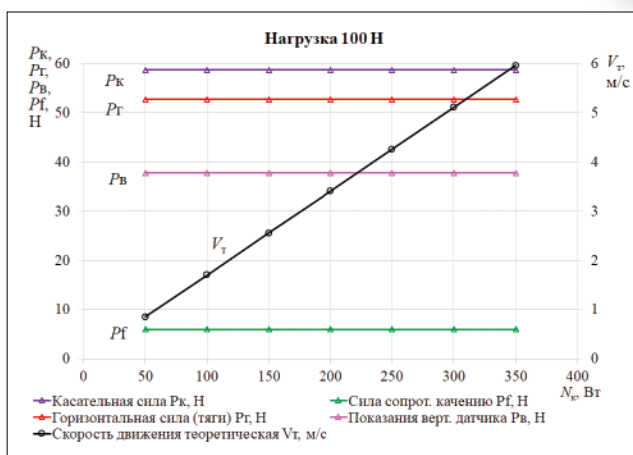


Рис. 3. Влияние подводимой к мотор-колесу мощности на действующие силы и скорость движения при нагружении платформы весом 100 Н

Fig. 3. Effect of input power supplied to the motor-wheel assembly on the acting forces and travel speed under a platform load of 100 N

$P_f = 6,0$  Н. Изменение подводимой мощности приводит к увеличению теоретической скорости движения ( $V_T$ ) от 0,85 до 5,96 м/с.

Изменение мощностей на привод для движения платформы  $N_{кр}$  (модуль 2), на преодоление сопротивления качению мотор-колеса  $N_f$ , крутящего момента на мотор-колесе ( $M_k$ , Н·м) и угловой частоты вращения колеса ( $\omega_k$ , с<sup>-1</sup>) показано на рисунке 4.

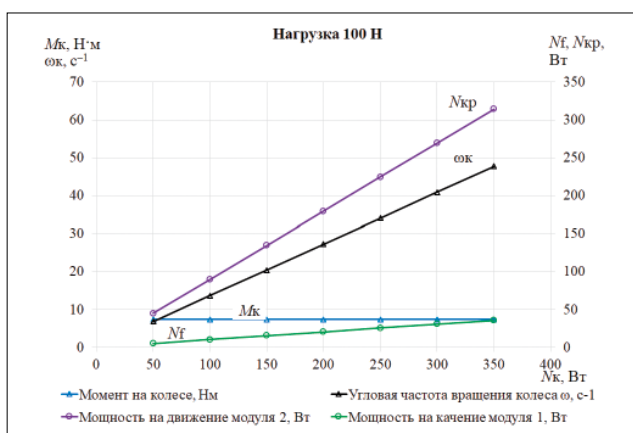


Рис. 4. Влияние подводимой к мотор-колесу мощности на привод для движения платформы и на преодоление сопротивления качению мотор-колеса при нагружении платформы весом 100 Н

Fig. 4. Effect of input power supplied to the motor-wheel assembly on the power required to drive the platform and the power required to overcome motor-wheel rolling resistance under a platform load of 100 N

Приведенные результаты показывают, что при увеличении подводимой к мотор-колесу мощности от 50 до 350 Вт величина крутящего момента на мотор-колесе сохраняет постоянное значение:  $M_k = 7,3$  Н·м.

Угловая частота вращения мотор-колеса ( $\omega_k$ ) увеличивается с 6,8 до 47,7  $\text{с}^{-1}$ , что приводит к повышению скорости движения и росту мощностей сопротивления качению ( $N_f$ ) с 5,1 до 35,8 Вт и на движение платформы ( $N_{кр}$ ) с 44,9 до 314,2 Вт.

Исследовано влияние подводимой к мотор-колесу мощности  $N_k$  при нагружении платформы весом  $G_c = 350$  Н (рис. 5). При увеличении подводимой к мотор-колесу мощности от 50 до 600 Вт величины действующих сил, также как и при нагружении платформы весом 100 Н, сохраняют постоянные значения.

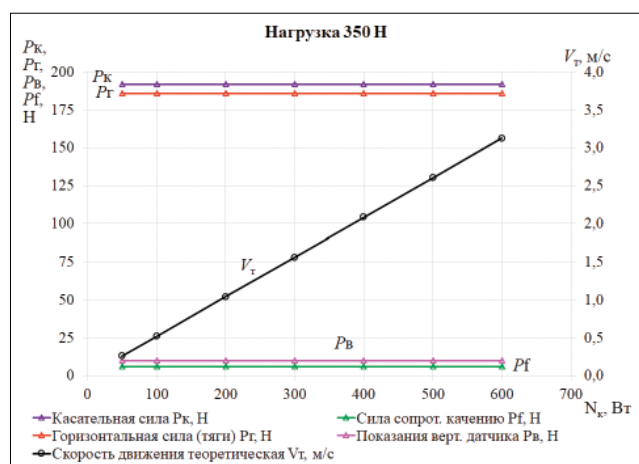


Рис. 5. Влияние подводимой к мотор-колесу мощности на действующие силы и скорость движения при нагружении платформы весом 350 Н

Fig. 5. Effect of input power supplied to the motor-wheel assembly on the acting forces and travel speed under a platform load of 350 N

Касательная сила мотор-колеса увеличилась до  $P_k = 192$  Н, показания датчика тяги (горизонтального) увеличились до  $P_r = 186$  Н, вертикального датчика уменьшились до  $P_v = 10$  Н, сопротивление качению мотор-колеса сохранилось:  $P_f = 6,0$  Н. Изменение подводимой мощности приводит к росту теоретической скорости движения ( $V_t$ ) с 0,26 до 3,13 м/с.

Изменение мощностей на привод в движение модуля 2 ( $N_{кр}$ ) и на преодоление сопротивления качению мотор-колеса ( $N_f$ ) крутящего момента на мотор-колесе ( $M_k$ ) и угловой частоты вращения колеса ( $\omega_k$ ) показано на рисунке 6. При увеличении подводимой к мотор-колесу мощности от 50 до 600 Вт величина крутящего момента на мотор-колесе также сохраняет постоянное значение, которое увеличилось до 24 Н·м.

Угловая частота вращения мотор-колеса ( $\omega_k$ ) увеличивается с 2,08 до 25,0  $\text{с}^{-1}$ , что приводит к увеличению скорости движения и росту мощностей сопротивления качению ( $N_f$ ) с 1,6 до 18,8 Вт и на движение платформы ( $N_{кр}$ ) с 48,4 до 581,2 Вт.

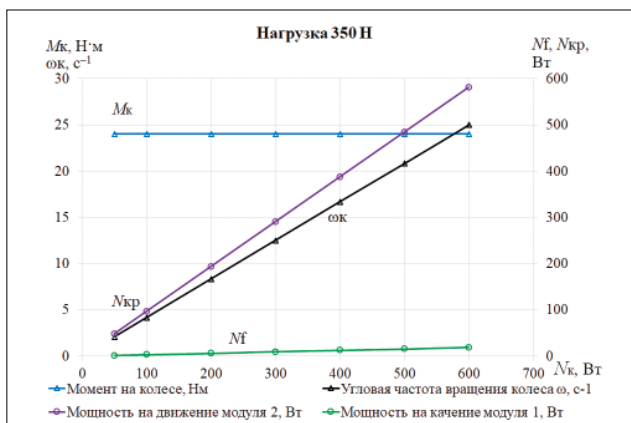


Рис. 6. Влияние подводимой к мотор-колесу мощности на привод для движения платформы и на преодоление сопротивления качению мотор-колеса при нагружении платформы весом 350 Н

Fig. 6. Effect of input power supplied to the motor-wheel assembly on the power required to drive the platform and overcome motor-wheel rolling resistance under a platform load of 350 N

Степень влияния весовой нагрузки платформы ( $G_c$ ) исследовалось при постоянной подводимой к мотор-колесу мощности  $N_k = 300$  Вт на силовые и мощностные характеристики мотор-колеса. На рисунке 7 представлены результаты исследований при изменении нагружения платформы весом ( $G_c$ ) от 50 до 400 Н. При увеличении весовой нагрузки ( $G_c$ ) от 50 до 384 Н касательная сила мотор-колеса ( $P_k$ ) монотонно увеличивается с 32 до 210 Н, показания датчика тяги ( $P_r$ ) синхронно с силой сопротивления движения платформы ( $P_{кр}$ ) увеличиваются с 26 до 204 Н.

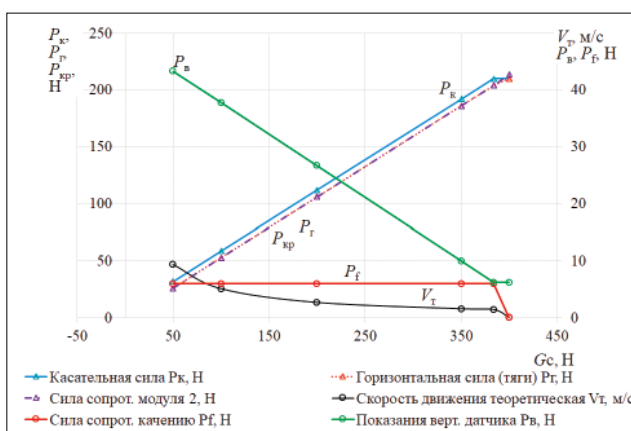


Рис. 7. Влияние весовой нагрузки платформы на действующие силы и скорость движения при подводимой к мотор-колесу мощности 300 Вт

Fig. 7. Effect of platform load on the acting forces and travel speed at an input power of 300 W supplied to the motor-wheel assembly

Показания вертикального датчика ( $P_v$ ) уменьшаются с 43,3 до 6,3 Н, а сопротивление качению

мотор-колеса ( $P_f$ ) сохраняется на уровне 6,0 Н. Повышение сопротивления движению приводит к гиперболическому снижению теоретической скорости движения ( $V_T$ ) с 9,4 до 1,4 м/с.

При весовой нагрузке платформы  $G_c > 384$  Н происходит скольжение мотор-колеса по опорной поверхности, что приводит к прекращению роста касательной силы ( $P_c$ ) и снижению силы ( $P_v$ ). Сила сопротивления движения платформы ( $P_{кр}$ ) становится больше силы тяги ( $P_T$ ) и качение мотор-колеса прекращается:  $V_T = 0$  м/с. Сила сопротивления качению падает до нуля, что приводит к некоторому увеличению показания датчика тяги ( $P_T$ ) до 210 Н.

Изменение характеристик мотор-колеса при изменении весовой нагрузки платформы показано на рисунке 8. С увеличением весовой нагрузки ( $G_c$ ) от 50 до 384 Н величина крутящего момента на мотор-колесе ( $M_k$ ) монотонно растет с 4 до 26,3 Н·м. Угловая частота вращения мотор-колеса ( $\omega_k$ ) снижается с 75 до 11,4 с<sup>-1</sup>, что приводит к снижению скорости движения и мощности сопротивления качению ( $N_f$ ) от 56,3 до 8,6 Вт. Мощность на движение платформы ( $N_{кр}$ ) увеличивается с 243,8 до 291,4 Вт, причем темп роста постепенно снижается.

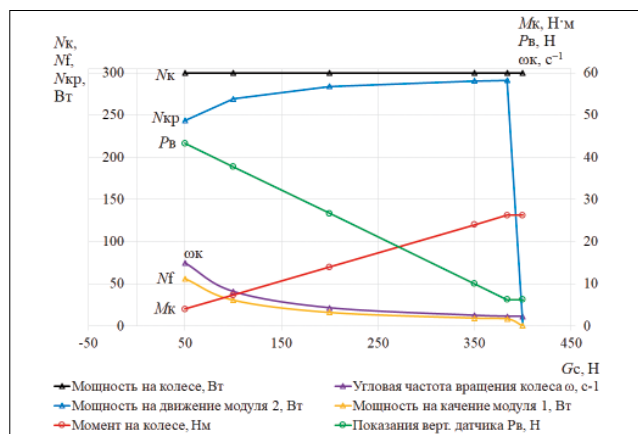


Рис. 8. Влияние весовой нагрузки платформы на характеристики мотор-колеса при подводимой к нему мощности 300 Вт

Fig. 8. The influence of the weight load of the platform on the characteristics of the motorized wheel with a power supply of 300 watts

При весовой нагрузке платформы  $G_c > 384$  Н мощность на движение платформы ( $N_{кр}$ ) и мощность сопротивления качению ( $N_f$ ) падают до нуля из-за прекращения движения, а крутящий момент на мотор-колесе ( $M_k$ ), показания вертикального датчика ( $P_v$ ) и угловая частота вращения колеса ( $\omega_k$ ) остаются на уровне значений, как при весовой нагрузке  $G_c = 384$  Н.

Результаты исследований показали возможность изменения режима работы мотор-колеса на указан-

ном динамометрическом стенде изменением подводимой к колесу мощности и величиной весовой нагрузки на платформе. Превышение весовой нагрузки сверх критической величины, приводящей к силе сопротивления платформы более высокой сцепной силы колеса с опорной поверхностью, приводит к остановке стенда.

Крутящий момент, создаваемый мотор-колесом, в основном изменяется за счет весовой нагрузки платформы и практически не зависит от подводимой к мотор-колесу мощности. А изменение подводимой мощности приводит в основном к изменению скорости движения. Если подводимая к колесу мощность меньше необходимой на преодоление сопротивления качению колеса и передвижение платформы, то стенд останавливается.

В процессе испытаний необходимо обеспечивать начальное значение вертикальной нагрузки  $P_{в0} > M_{kmax}/L$ , т.е. распределить весовую нагрузку на модуле 1 таким образом, чтобы в процессе испытаний на режимах, близких к максимальному значению крутящего момента, не снизить значения силы  $P_v$  до нуля.

Проведенные исследования подтвердили работоспособность стенда, возможность изменения режима (крутящего момента, тягового усилия и скорости движения) испытуемого мотор-колеса, а также продемонстрировали его способность обеспечивать моделирование совместного действия вертикальной и горизонтальной нагрузок. Синхронная регистрация механических и электрических параметров позволяет оценивать не только механическую, но и электрическую эффективность испытуемого мотор-колеса.

**Выводы.** Применение предложенного стенда для испытаний на деформируемых грунтах (почвогрунтах сельскохозяйственного фона) позволяет получать тягово-энергетические характеристики мотор-колеса с учетом реального взаимодействия шины с почвой (буксование, сдвиг), что корректно для выбора режимов работы электропривода самоходной сельскохозяйственной техники при выполнении полевых операций (вспашка, культивация, транспортные работы).

Показана возможность изменения крутящего момента колеса и скорости движения за счет изменяемой весовой нагрузки и подводимой к колесу мощности. Весовые нагрузки модуля 1 и модуля 2 стенда должны быть согласованы между собой в процессе изменения режимов испытаний.

Выведенные в результате анализа зависимости дают возможность определять крутящий момент при изменении тягового усилия и скорости движения мотор-колеса на различных видах опорной поверхности, сопротивление качению колеса, а также оценивать адекватность и корректность получаемых опытных данных.

Полученные в ходе испытаний временные зависимости электрических и механических параметров могут служить основой для оценки коэффициента полезного действия мотор-колеса, валидации математических мо-

делей движения тракторного агрегата, а также использованы для обоснования алгоритмов управления тяговым электроприводом в диапазоне эксплуатационных нагрузок на различных типах опорных поверхностей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Девянин С.Н., Марков В.А., Савастенко А.А., Савастенко Э.А. Проблемы электрификации автомобильного транспорта России // *Двигателестроение*. 2022. N1(287). С. 21-31. EDN: UTDHTO.
2. Окунев Г.А., Шепелев С.Д., Кузнецов Н.А. Тенденции переоснащения парка тракторов // *Сельский механизатор*. 2025. N4. С. 6-8. DOI: 10.47336/0131-7393-2025-4-6-7-8.
3. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // *Техника и оборудование для села*. 2021. N2(284). С. 2-7. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.
4. Ценч Ю.С., Шаров В.В. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N3. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13.
5. Прокопов М.А., Кульчев А.Ю. Применение бесколлекторных двигателей в гидротехнике и мелиорации // *Сельский механизатор*. 2025. N6. С. 40-41. DOI: 10.47336/0131-7393-2025-6-40-41.
6. Бижаев А.В., Ветрова С.М., Барчукова А.С., Кривых Н.С. Использование индивидуального привода колес трактора посредством электрической тяги // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 78-85. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-78-85.
7. Drexler D., Kampker A., Born H. et al. Advances in electric motors: a review and benchmarking of product design and manufacturing technologies. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2025. Vol. 142. N5. 312-345. DOI: 10.1007/s00502-025-01331-3.
8. Бяков К.Е., Иваненков В.В., Холоденко В.Б., Чудаков О.И. Обзор конструкций современных динамометрических стендов для испытаний колесных транспортных средств // *Транспортные системы*. 2021. N4(22). С. 4-15. DOI: 10.46960/62045\_2021\_4\_4.
9. Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 33-42. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.
10. Plizga K. Analysis of energy consumption by electric agricultural tractor model under operating conditions. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25. N1. 1-12. DOI: 10.2478/agriceng-2021-0001.
11. Бурак П.И., Голубев И.Г., Шахов В.А. Анализ отказов электрооборудования и электронных блоков управления сельскохозяйственной техники при испытаниях // *Техника и оборудование для села*. 2025. N10(340). С. 40-42. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-10-40-42.
12. Лобов Н.В., Афанасьев В.В. Выбор режимов испытания электродвигателей электромотоцикла в лабораторных условиях // *Мир транспорта и технологических машин*. 2024. N4-3(87). С. 62-67. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-3(87)-62-67.
13. Горобцов А.С., Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С. и др. Математическая модель испытательного стенда // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. 2016. N4(16). С. 16-21. EDN: WMTNZZD.
14. Jasper S.P., Mendonça W.S.De., Jung E.A. et al. Energy efficiency of four-wheel drive tractor in sowing operation. *Ciencia Rural*. 2025. Vol. 55. N1. DOI: 10.1590/0103-8478cr20240141.
15. Флоренцев С.Н., Уваров А.А., Байда С.В., Журов И.О. Схемотехника, конструкции преобразователей и алгоритмы управления тяговыми электроприводами // *Электротехника*. 2025. N6. С. 36-46. DOI: 10.53891/00135860-2025-6-36-46.
16. Воробьев А.Р., Федоров В.Б. Методика контроля характеристик измерительного оборудования для испытания двигательных установок // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2024. N1. С. 187-191. EDN: NXUVSU.
17. Kwon D., Ahn D.V., Kim J.G., Park Y.J. Effect analysis of motor power characteristics on the energy consumption of dual motor driven powertrain for electric tractor. *Journal of Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 49. N4. 465-475. DOI: 10.1007/s42853-024-00245-w.
18. Baek S.Y., Jeon H.H., Kim W.S. et al. Simulation analysis of motor and battery characteristics using a validated model of an electric tractor. *Electronics*. 2025. Vol. 14. N24. 4872. DOI: 10.3390/electronics14244872.
19. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Майстренко Н.А. и др. Лабораторные исследования МЭС сельскохозяйственного назначения с автономным электроприводом тягового класса 0,6 // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27. N4. С. 15-24. DOI: 10.26897/2687-1149-2025-4-15-24.
20. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Измерение силы тяги на крюке трактора в агрегате с навесной сельскохозяйственной машиной // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N4. С. 15-19. DOI: 10.17816/0321-4443-66128.

### REFERENCES

1. Devyanin S.N., Markov V.A., Savastenko A.A., Savastenko E.A. Problems of electrification of motor transport in Russia. *Engines Construction*. 2022. N1(287). 21-31 (In Russian). EDN: UTDHTO.
2. Okunev G.A., Shepelev S.D., Kuznetsov N.A. Tractor fleet retooling trends. *Selskiy Mehanizator*. 2025. N4. 6-8 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2025-4-6-7-8.
3. Lachuga Yu.F., Izmajlov A.Yu., Lobachevskij Ya.P. Prior-

- ity areas of scientific and technical development of the domestic tractor industry. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N2(284). 2-7 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.
4. Tsench Yu.S., Sharov V.V. Advancement of domestic mobile agricultural machinery powered by electric traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13.
  5. Prokopov M.A., Kulchev A.Yu. Use of brushless engines in hydraulic engineering and reclamation. *Selskiy Mehanizator*. 2025. N6. 40-41 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2025-6-40-41.
  6. Bizhaev A.V., Vetrova S.M., Barchukova A.S., Krivykh N.S. Using individual tractor wheel drive through electric traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 78-85 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-78-85.
  7. Drexler D., Kampker A., Born H., et al. Advances in electric motors: a review and benchmarking of product design and manufacturing technologies. *Electrical Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 142. N5. 312-345 (In English). DOI: 10.1007/s00502-025-01331-3.
  8. Byakov K.Ye., Ivanenkov V.V., Kholodenko V.B., Chudakov O.I. Review of designs of modern dynamometer stands for testing wheeled vehicles. *Transport Systems*. 2021. N4(22). 4-15 (In Russian). DOI: 10.46960/62045\_2021\_4\_4.
  9. Bizhaev A.V. Research of tractor power unit with electric drive parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 33-42 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.
  10. Plizga K. Analysis of Energy Consumption by Electric Agricultural Tractor Model Under Operating Conditions. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25. N1. 1-12 (In English). DOI: 10.2478/agriceng-2021-0001.
  11. Burak P.I., Golubev I.G., Shakhov V.A. Analysis of the failures of electrical equipment and electronic control units of agricultural machinery during testing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025. N10(340). 40-42 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2025-10-40-42.
  12. Lobov N.V., Afanasyev V.V. Selection of test modes for electric vehicle motors in laboratory conditions. *World of transport and technological machines*. 2024. N4-3(87). 62-67 (In Russian). DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-3(87)-62-67.
  13. Gorobtsov A.S., Lyashenko M.V., Sokolov-Dobrev N.S. et al. Mathematical model of test stand. *Energy and Resource Saving: Industry and Transport*. 2016. N4(16). 16-21 (In Russian). EDN: WMTNZD.
  14. Jasper S.P., Mendonça W.S.De., Jung E.A. et al. Energy efficiency of four-wheel drive tractor in sowing operation. *Ciencia Rural*. 2025. Vol. 55. N1 (In English). DOI: 10.1590/0103-8478cr20240141.
  15. Florentsev S.N., Uvarov A.A., Bayda S.V., Zhurov I.O. Circuitry, converter designs, and control algorithms for traction electric drives. *Russian Electrical Engineering*. 2025. T. 96. N6. 442-452 (In Russian). DOI 10.53891/00135860-2025-6-36-46.
  16. Vorob'ev A.R., Fedorov V.B. Methodology for monitoring the performance of measuring equipment for testing the propulsion systems. *Russian Aeronautics*. 2024. T. 67. N1. 209-214 (In Russian). EDN: NXUVSU.
  17. Kwon D., Ahn D.V., Kim J.G., Park Y.J. Effect analysis of motor power characteristics on the energy consumption of dual motor driven powertrain for electric tractor. *Journal of Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 49. N4. 465-475 (In English). DOI: 10.1007/s42853-024-00245-w.
  18. Baek S.Y., Jeon H.H., Kim W.S. et al. Simulation analysis of motor and battery characteristics using a validated model of an electric tractor. *Electronics*. 2025. Vol. 14. N24. 4872 (In English). DOI: 10.3390/electronics14244872.
  19. Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Maistrenko N.A. et al. Laboratory studies of agricultural mobile power vehicles with an autonomous electric drive of traction class 0.6. *Agricultural Engineering*. 2025. Vol. 27. N4. 15-24 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2025-4-15-24.
  20. Parkhomenko S.G., Parkhomenko G.G. Measurement of tractive effort at the drawbar of tractor in aggregate with mounted agricultural machine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016. N4. 15-19 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-66128.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Прокопов М.А. – проведение исследования и описание результатов, подготовка текста;  
 Девянин С.Н. – постановка задачи, формулирование основной концепции исследования;  
 Кульчев А.Ю. – техническая подготовка стенда, сбор и обработка данных;  
 Бурак П.И. – анализ литературы, статистическая обработка.  
 Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2026

15.05.2026

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Prokopov M.A. – conducting the study, describing the results, and preparing the manuscript;  
 Devyanin S.N. – problem statement and formulation of the main research concept;  
 Kulchev A.Yu. – test stand technical preparation, data collection and processing;  
 Burak P.I. – literature analysis and statistical processing.  
 The authors read and approved the final manuscript.



## Моделирование и разработка энергосберегающего ИК-обогревателя для телят

**Дмитрий Анатольевич Тихомиров**,  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
член-корреспондент Российской академии наук,  
e-mail: tihda@mail.ru;

**Алексей Васильевич Кузьмичев**,  
научный сотрудник,  
e-mail: alkumkuzm@mail.ru;  
**Алексей Викторович Хименко**,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: avmkh87@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0004.*

**Реферат.** Содержание телят в индивидуальных пластиковых домиках на открытых площадках помимо положительных сторон имеет и риски. При заморозках отмечены случаи обморожения, заболеваний и гибели животных. Для регионов с длительным холодным периодом (4–6 месяцев) актуальна задача обеспечения обогрева индивидуальных домиков. (*Цель исследования*) Разработка рациональной конструкции и обоснование параметров электрического инфракрасного обогревателя. (*Материалы и методы*) Для обогрева телят предпочтительно с теплоэнергетической точки зрения использовать «темные» инфракрасные излучатели с длиной волны 2–5 микрон с возможностью регулирования теплового потока в зависимости от положения животного в домике. Установлена расчетная зависимость величины теплового потока от обогревателя к теленку от температуры ограждающих конструкций домика и нормируемой температуры воздуха окружающей среды. (*Результаты и обсуждение*) Предложена функционально-технологическая схема установки для обогрева телят в индивидуальных домиках. Обоснованы теплоэнергетические и конструкционные параметры электрического инфракрасного обогревателя линейного типа на основе расчетной модели теплообмена теленка в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей. Представлены результаты физического моделирования процесса обогрева теленка при различных режимах. Разработан действующий образец обогревателя. (*Выводы*) С применением физического моделирования обоснованы параметры, режимы работы, предложена функциональная схема, изготовлен экспериментальный образец электрического инфракрасного обогревателя при содержании телят в индивидуальном домике на открытом воздухе в холодный период года.  
**Ключевые слова:** обогрев телят, индивидуальный домик, электрический инфракрасный обогреватель, физическое моделирование, тепловой поток.

■ **Для цитирования:** Тихомиров Д.А., Кузьмичев А.В., Хименко А.В. Моделирование и разработка энергосберегающего ИК-обогревателя для телят // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 30–36. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-30-36. EDN: ERYWVW.

Scientific article

### Modeling and Development of an Energy-Saving Infrared Heater for Calves

**Dmitry A. Tikhomirov**,  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, corresponding member  
of the Russian Academy of Sciences,  
e-mail: tihda@mail.ru;

**Alexey V. Kuzmichev**,  
researcher,  
e-mail: alkumkuzm@mail.ru;  
**Alexey V. Khimenko**,  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: avmkh87@gmail.com

*This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops (No. FGUN-2025-0004).*

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Keeping calves in individual plastic hutches on outdoor sites offers a number of advantages, but it also involves certain risks. During frosts, cases of frostbite, disease, and animal mortality have been reported. Therefore, for regions with a long cold period of 4–6 months, ensuring heating in individual calf hutches is an important task. (*Research purpose*) The study aimed to develop a rational design and substantiate the parameters of an electric infrared heater. (*Materials and methods*) From a thermal-energy perspective, “dark” infrared emitters with a wavelength of 2–5  $\mu\text{m}$  are preferable for heating calves, as they allow the heat flux to be regulated depending on the animal’s position inside the hutch. A calculated relationship was established between the heat flux transferred from the heater to the calf, the temperature of the hutch enclosing structures, and the standard ambient air temperature. (*Results and discussion*) A functional and technological diagram of a calf-heating system for individual hutches was proposed. The thermal-energy and design parameters of a linear electric infrared heater were substantiated based on a calculated heat-exchange model describing a calf within a system of isothermal, diffusely absorbing and emitting surfaces. The results of physical modelling of the calf heating process under different operating modes are presented, and an operating prototype of the heater was developed. (*Conclusions*) Physical modelling was used to substantiate the parameters and operating modes of an electric infrared heater for calves housed in individual outdoor hutches during the cold season. A functional diagram was proposed, and an experimental prototype of the heater was manufactured.

**Keywords:** calf heating, individual calf hutch, electric infrared heater, physical modelling, heat flux.

■ **For citation:** Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V., Khimenko A.V. Modeling and development of an energy-saving infrared heater for calves. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 30–36 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-30-36. EDN: ERYWVW.

**В** животноводстве набирает популярность холодный способ содержания молодняка крупного рогатого скота в индивидуальных пластиковых домиках на открытых площадках [1]. Телят переводят в домики на 2–3 день после рождения [2, 3], где они находятся до 60–70-дневного возраста [4–6]. При холодном содержании животные вырастают наиболее крепкие и устойчивые к заболеваниям [7–9]. В сильные морозы (ниже  $-25^{\circ}\text{C}$ ) маленьким телятам в возрасте до 15 дней следует одевать накидки (попоны, жилеты) [10]. При заморозках до  $-29^{\circ}\text{C}$  и холоднее были случаи обморожения кончиков ушей, носового зеркала, пуповины, хвоста, кожи, других органов, даже гибели телят [11].

В средней полосе и более северных регионах при продолжительной холодной погоде (4–6 месяцев) предлагается применять локальные электрические ИК-излучатели для обогрева поросят и телят в клетках и в профилакториях [12]. Недостатками облучателей с использованием в качестве источника ИК-излучения ламп типа ИКЗК являются низкий срок службы, невысокий КПД, недостаточное преобразование потребляемой энергии в ИК-излучение (60–70%), негативное воздействие постоянного светового излучения на животных, неравномерность теплового потока в зоне обогрева животных.

Более рационально применять керамические источники ИК-излучения типа ЭРА, ЕРК, Interheat и др., у которых практически нет недостатков ламп ИКЗК. В спектре таких «темных» источников с длинной волны  $\lambda = 2\text{--}5$  мкм практически отсутствует излучение видимого света, и они не оказывают слепящего действия на животных. Такие источники выпускаются на различную мощность и могут использоваться со стандартной арматурой типа ССПО

и др. Основной недостаток керамических излучателей состоит в конструкции цоколя Е27, который на открытом воздухе достаточно быстро окисляется и нарушается электрический контакт. Также тепловой поток от такого излучателя с учетом отражателя светильника на плоскости пола в домике получается недостаточно равномерный [13].

Применение в индивидуальных домиках для телят других промышленно выпускаемых ИК-обогревателей с большими мощностью и массогабаритными показателями не оправдано.

**Цель исследования:** разработать рациональную конструкцию и обосновать параметры электрического инфракрасного обогревателя при содержании телят в индивидуальных домиках на открытых площадках.

**Материалы и методы.** Установлено, что при обогреве телят белого и черного окраса «светлыми» ИК-излучателями с температурой около 2300 К интегральный коэффициент поглощения кожей теленка составляет 0,7 и 0,85 отн. ед. соответственно, а при обогреве телят комбинированного окраса «темными» излучателями с температурой около 800 К этот показатель равен 0,9 отн. ед. Для обогрева телят с теплоэнергетической точки зрения предпочтительно использовать «темные» ИК-излучатели (Растимешин С.А. Локальный обогрев молодняка животных. М.: Агропромиздат. 1991. 140 с.).

В соответствии с биологическими циклами, связанными с периодичностью кормления и отдыха телят в течение суток, а также для закаливания молодняка рекомендуются определенные режимы чередования включения-отключения ИК-обогревателей, изменяющиеся по мере роста животных. Также необходимо регулировать тепловой поток в

зависимости от положения теленка в домике. По данным зооинженеров около 50-60% времени суток теленка проводят в лежачем положении.

Высота в холке теленка стоя в 2-2,6 раза больше, чем когда он лежит, и находится ближе к поверхности подвешенного сверху ИК-облучателя. За счет этого для формирования заданного теплового потока мощность нагревательного элемента облучателя может быть снижена в 1,5-2 раза. Как правило, ИК-облучатели длительное время остаются над животным на одной высоте, их мощность и тепловой поток не регулируются. Таким образом, при стоячем положении теленка происходит необоснованный перерасход тепловой энергии. Кроме того, у большинства конструкций установок локального обогрева выявлено несоответствие обогреваемой площади стандартным размерам зон нахождения молодняка (станки, клетки и т.д.).

Требуемый для обогрева животного дополнительный тепловой поток ( $Q_{\text{доп}}$ ) от сторонних источников определяется по температуре ограждающих конструкций помещения ( $t_r$ ) и по нормируемой температуре воздуха окружающей среды ( $t_{\text{н.в}}$ ) [14]:

$$Q_{\text{доп}}/F = C_0 \varepsilon_{\text{пр1-R}} b_{1-R} \varphi_{1-R} (t_{\text{н.в}} - t_r), \quad (1)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $F$  – поверхность животного, участвующая в теплообмене, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{\text{пр1-R}}$  – приведенный относительный коэффициент излучения теплообменивающих поверхностей;  $b_{1-R}$  – температурный коэффициент;  $b_{1-R} = 0,81 + 0,005(t_{\text{ж}} - t_r)$ ,  $t_{\text{ж}} = 24,5 + 0,43t_{\text{в}}$  – экспериментальная зависимость температуры поверхности теленка;  $\varphi_{1-R}$  – коэффициент облученности;  $t_{\text{в}}$  – температура воздуха внутри помещения, °С.

Общая постановка задачи при расчете обогрева зон содержания молодняка определяется системой уравнений общего теплообмена в помещении и условиями комфортности. Решение для полной системы из нескольких уравнений оказывается достаточно сложным, поэтому используются упрощенные расчетные схемы. Для этого задается температура наружных ограждений, обращенных в помещение, которая в реальных условиях может значительно отличаться от температуры воздуха внутри. Искомой является величина тепловой энергии, вносимой в зону нахождения животных для поддержания требуемых условий теплового комфорта.

На *рисунке 1* показано изменение удельной тепловой энергии относительно нормируемой температуры воздуха и температуры ограждающих конструкций в помещении с животным:  $q = Q_{\text{доп}}/F$ .

Необходимая тепловая энергия, вносимая в зону животного для создания необходимых комфортных условий:

$$Q = qF_3, \quad (2)$$

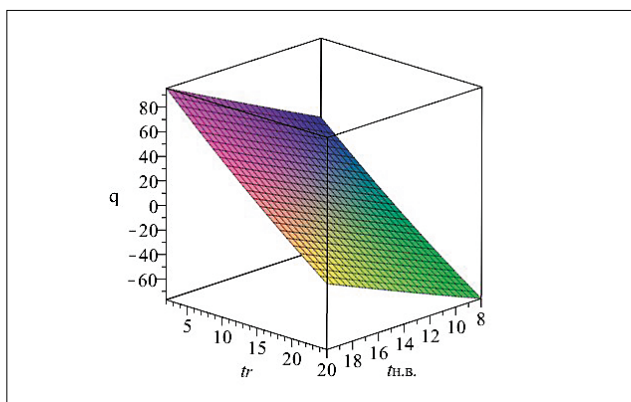


Рис. 1. Изменение удельной тепловой энергии:  $q$  – поступление (удаление) тепла в зону содержания животного, Вт/м<sup>2</sup>;  $t_r$  – радиационная температура ограждений, °С;  $t_{\text{н.в}}$  – нормируемая температура воздуха, °С

Fig. 1. Variation in heat flux density:  $q$  – heat supplied to or removed from the animal housing zone, W/m<sup>2</sup>;  $t_r$  – radiant temperature of the enclosing structures, °С;  $t_{\text{н.в}}$  – standard air temperature, °С

где  $F_3$  – обогреваемая зона для теленка, по нормативным материалам она составляет 1,5-2 м<sup>2</sup>.

Температура воздуха в помещении  $t_{\text{в}}$  является основным нормативным параметром.

Проведенный тепловой расчет для типового пластикового домика показал, что мощность отопительной установки должна составлять 100-200 Вт в зависимости от температуры наружного воздуха. ИК-обогреватель с арматурой следует устанавливать внутри домика с креплением к потолку.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Предложены функционально-технологическая схема обогрева телят в индивидуальных домиках, в нее входят блок питания, управления и защиты, ИК-обогреватель, датчик положения теленка и датчик температуры воздуха в зоне обогрева (*рис. 2*).

Согласно предложенной нами расчетной модели теплообмена теленка в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей [15] и полученных результатов обоснованы теплоэнергетические и конструкционные параметры ИК-обогревателя линейного типа (длина волны  $\lambda = 2-5$  мкм; мощность 100-300 Вт; высота расположения источника излучения от пола  $h = 1,0-1,3$  м; площадь обогрева 1,2-1,8 м<sup>2</sup>). Разработана физическая модель обогревателя.

Тепловая облученность от обогревателя в домике (*рис. 3*) измерялась прибором ТКА-ИТО (производитель ООО «НТП «ТКА», Россия), который регистрирует тепловое излучение с углом обзора 360°. Прибор позволяет упростить и ускорить необходимые измерения интенсивности ИК-облучения. На основе этого возможно рассчитать среднюю радиационную температуру и величину экспозиции теплового облучения.

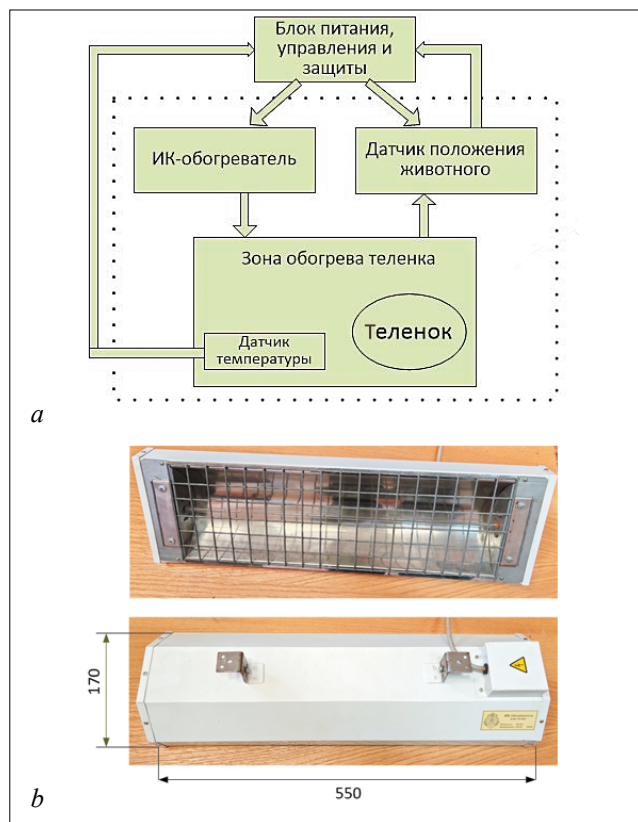


Рис. 2. Функционально-технологическая схема обогрева телят в домике (а) и общий вид ИК-обогревателя линейного типа (б)  
 Fig. 2. Functional and technological diagram of calf heating in a hutch (a) and general view of a linear-type infrared heater (b)

Для прибора ТКА-ИТО диапазон измерений плотности теплового потока составляет 10-3500 Вт/м<sup>2</sup>; основная абсолютная погрешность измерений плотности теплового потока равна 2,0 + 0,08ИВ (ИВ – значение измеряемой облученности); время установления рабочего режима не менее 15 мин.

Приведены результаты измерений распределения теплового потока разработанной физической

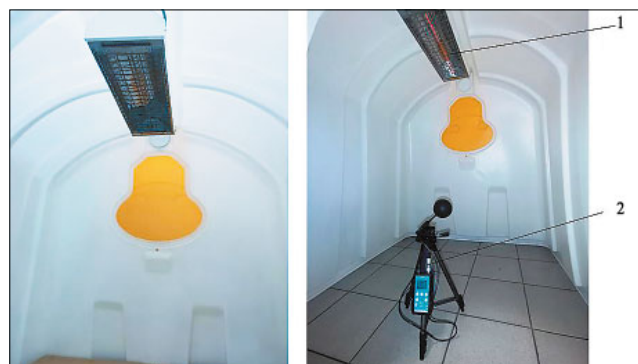


Рис. 3. Расположение ИК-обогревателя (1) с измерителем тепловой облученности ТКА-ИТО (2)  
 Fig. 3. Arrangement of the IR heater (1) with the TKA-ITO thermal irradiance meter (2)

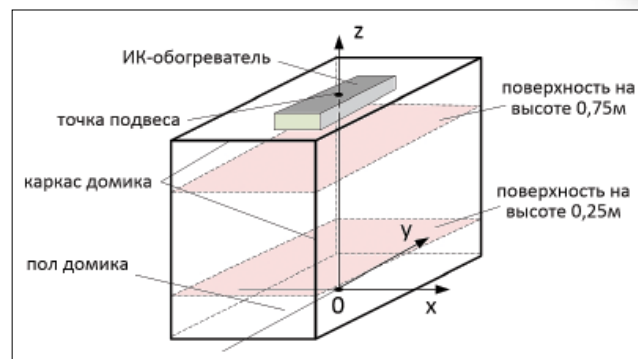


Рис. 4. Схема измерения распределения теплового потока от ИК-обогревателя внутри домика для телят  
 Fig. 4. Schematic diagram for measuring the heat flux distribution from the IR heater inside the calf hutch

модели ИК-обогревателя с регулируемой мощностью на высоте от пола  $h = 0,25$  и  $h = 0,75$  м, что соответствует расположению телят лежа и стоя (рис. 4).

Результаты физического моделирования процесса обогрева телят ИК-обогревателем и экспериментальных исследований после статистической обработки представлены на рисунках 5-7.

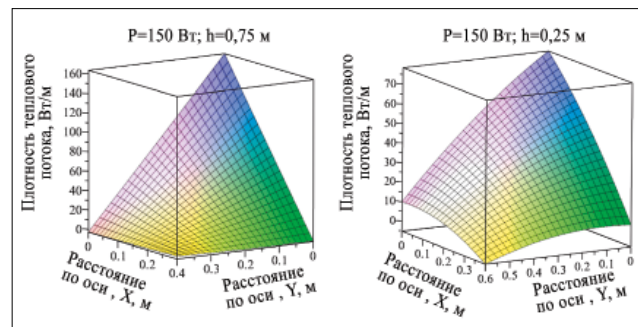


Рис. 5. Зависимость распределения плотности теплового потока от расстояния по осям x и y при установленной мощности ИК-обогревателя 150 Вт на высоте от пола 0,75 и 0,25 м

Fig. 5. Heat flux density distribution versus distance along the x and y axes for an IR heater operating at 150 W and installed at heights of 0.75 and 0.25 m above the floor

Зависимость распределения плотности теплового потока на определенной высоте от пола домика ( $z = h$ ) от расстояния по осям x и y от центральной оси подвеса ИК-обогревателя Oz ( $x = 0, y = 0$ ) в декартовой системе координат и от установленной мощности ИК-обогревателя 150 Вт, показана на рисунке 5. При мощности ИК-обогревателя 150 Вт,  $h = 0,75$  м и  $h = 0,25$  м получены уравнения регрессии определения плотности теплового потока:

$$q_1 = 13,4x^2 + 1407,5xy + 12,5y^2 - 421,8x - 556,6y + 163,6, \quad (3)$$

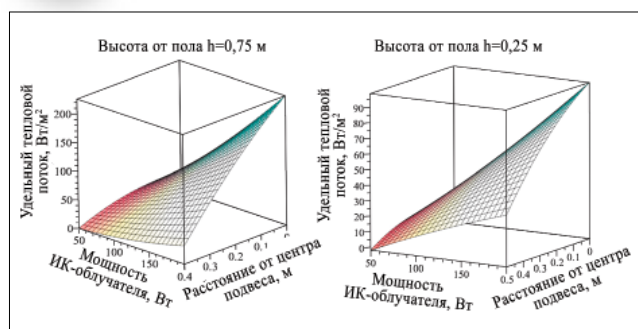


Рис. 6. Зависимость распределения плотности теплового потока от мощности ИК-обогревателя и расстояния от центра его подвеса на высоте от пола 0,75 и 0,25 м

Fig. 6. Heat flux density distribution versus IR heater power and distance from the heater suspension center at heights of 0.75 and 0.25 m above the floor

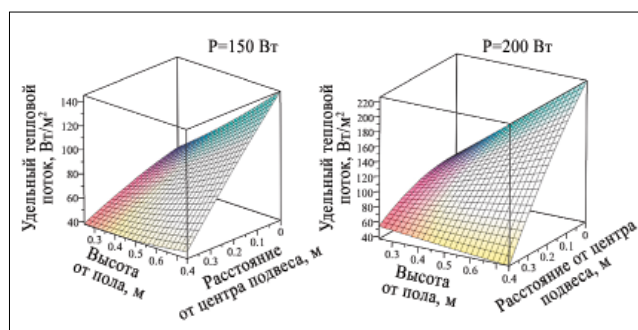


Рис. 7. Зависимость распределения плотности теплового потока от высоты и расстояния от центра подвеса ИК-обогревателя мощностью 150 и 200 Вт

Fig. 7. Heat flux density distribution versus height and distance from the IR heater suspension center at power levels of 150 W and 200 W

$$q_2 = 50,2x^2 + 238,9xy - 117,3y^2 - 84,1x - 134,0y + 78,4, \quad (4)$$

где  $x$ ,  $y$  – расстояния от центральной оси подвеса ИК-обогревателя по осям  $x$  и  $y$ .

Получены уравнения регрессии определения плотности теплового потока в зависимости от мощности ИК-обогревателя ( $P$ , Вт) и расстояния от центра его подвеса вдоль оси  $x$  (рис. 6) при  $h = 0,75$  м и  $P = 0,25$  м:

$$q_3 = -310,7x^2 - 2,72xP + 0,001P^2 + 183,8x + 1,1P - 25,5, \quad (5)$$

$$q_4 = -121,4x^2 - 0,75xP + 0,00026P^2 + 76,1x + 0,7P - 23,3. \quad (6)$$

Получены уравнения регрессии определения плотности теплового потока в зависимости от высоты и расстояния от центра подвеса вдоль оси  $x$  при мощности ИК-обогревателя 150 Вт и 200 Вт (рис. 7).

$$q_5 = -59,5x^2 - 350xh + 41,6h^2 + 32,5x + 109,2h + 40,1, \quad (7)$$

$$q_6 = 271,4x^2 - 760,0xh + 4,8h^2 + 203,9x + 265,2h + 24,1. \quad (8)$$

Приведенные выше зависимости позволяют оценить величину и неравномерность теплового потока в соответствии с условиями комфортности содержания телят в индивидуальных домиках, уточнить и обосновать рациональные теплоэнергетические параметры ИК-обогревателя при его проектировании.

По итогам моделирования обоснованы теплоэнергетические и конструкционные параметры ИК-обогревателя, обеспечивающие требуемый тепловой поток в зоне расположения теленка. Разработан действующий образец со следующими параметрами: номинальная мощность 200 Вт; глубина регулирования теплового потока 30-100%; масса 3,5 кг; габаритные размеры 550×170×120 мм (рис. 8).



Рис. 8. Действующий образец ИК-обогревателя линейного типа для телят в индивидуальном домике: 1 – ИК-обогреватель; 2 – щит автоматического управления; 3 – датчик положения животного

Fig. 8. Operating prototype of a linear-type IR heater for calves housed in an individual calf hutch: 1 – IR heater; 2 – automatic control panel; 3 – animal position sensor

Потребителями ИК-обогревателей являются животноводческие предприятия, фермерские и крестьянские хозяйства, где используется технология содержания телят в индивидуальных пластиковых домиках стандартного образца на открытых площадках в холодный период года.

**Выводы.** Установлено, что температура ограждающих конструкций домика для телят оказывает значимое влияние на величину лучистого теплообмена и должна быть учтена в расчетах теплового баланса и ИК-обогревателя.

Полученные уравнения регрессии позволяют определить распределение теплового потока в зоне нахождения теленка с учетом его положения (стоячее или лежачее) в зависимости от мощности ИК-обогревателя и в заданной точке.

По результатам физического моделирования обоснованы параметры, режимы работы, разработаны функционально-технологическая схема уста-

новки и экспериментальный образец электрического ИК-обогревателя. Технический и экономический эффекты от применения установки: повышение сохранности телят, увеличение привесов за счет создания комфортных тепловых условий в соответствии с рекомендациями по технологическому проектированию ферм и комплексов для КРС.

Снижение энергозатрат до 25% по сравнению с существующими промышленными электрическими ИК-обогревателями молодняка животных за счет рациональной конструкции предлагаемого ИК-обогревателя линейного типа, теплоизоляции корпуса и автоматического регулирования теплового потока.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филиппова О.Б., Кийко Е.И. Групповое и индивидуальное содержание молодняка крупного рогатого скота // *Вестник ВНИИМЖ*. 2019. N3(35). С. 84-88. EDN: QVFOGR.
2. Москалев А.А. Продуктивность и поведение телят до 6-месячного возраста в зависимости от технологических параметров их содержания // *Зоотехническая наука Беларуси*. 2024. Т. 59. N2. С. 214-223. EDN: DUEKXW.
3. Минаков В.Н., Базылев М.В., Разумовский Н.П. и др. Инновационные подходы оптимизации выращивания ремонтного молодняка в молочном скотоводстве // *Ветеринарный журнал Беларуси*. 2024. N2(21). С. 95-99. EDN: GHVKNC.
4. Макаров А.В., Ханипова В.А., Федотова А.С. и др. Сравнительная характеристика систем выращивания молодняка крупного рогатого скота для откорма. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023. N9(37). 7. DOI: 10.23649/JAE.2023.37.5.
5. Москалев А.А. Влияние продолжительности содержания телят в индивидуальных домиках на их естественную резистентность и состояние здоровья // *Зоотехническая наука Беларуси*. 2022. Т. 57. N2. С. 177-184. DOI: 10.47612/0134-9732-2022-57-2-177-184.
6. Москалев А.А. Продуктивность и оценка комфортности телят при различной продолжительности их содержания в индивидуальных домиках // *Зоотехническая наука Беларуси*. 2022. Т. 57. N2. С. 184-191. DOI: 10.47612/0134-9732-2022-57-2-184-191.
7. Костеша Н.Я., Макаревич В.Г. Функциональное состояние организма телят при холодном методе выращивания // *Живые и биокосные системы*. 2015. N13. 13. DOI: 10.18522/2308-9709-2015-13-13.
8. Шилова Е.Н., Ряпосова М.В., Соколова О.В. Влияние «холодного» метода выращивания телят на показатели естественной резистентности при ОРВИ крупного рогатого скота // *Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии*. 2017. N3(23). С. 63-67. EDN: ZHTUPD.
9. Крупицын В.В., Бурцев С.А. Совершенствование элементов технологии выращивания молодняка крупного рогатого скота с целью повышения адаптационных свойств организма к условиям пониженных температур при холодном способе содержания // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2011. N3(30). С. 53-56. EDN: OJOCFF.
10. Еременко О.Н., Куликова Н.И., Малахова А.О., Сергеева Н.В. Попоны – это комфорт, здоровье, интенсивность роста для телят // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2015. N56. С. 180-184. EDN: VKXIBB.
11. Лоретц О.Г., Горелик О.В., Беляева Н.В. Особенности роста и развития телок при холодном методе выращивания // *Аграрный вестник Урала*. 2017. N6(160). С. 9-16. EDN: ZHDAYF.
12. Буяров В.С. Научное обоснование применения инфракрасного излучения при выращивании телят // *Вестник аграрной науки*. 2020. N4(85). С. 42-55. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2020.4.42.
13. Кузьмичёв А.В., Лямцов А.К., Тихомиров Д.А. Теплоэнергетические показатели ИК облучателей для молодняка животных // *Светотехника*. 2015. N3. С. 57-58. EDN: TWKONR.
14. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Создание нормированного теплового режима при содержании телят в помещениях с облегченными ограждающими конструкциями // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. N2(59). С. 72-78. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-2-72-78.
15. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Сравнительный анализ методов расчета лучистого обогрева молодняка в животноводческих помещениях // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N1. С. 10-18. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-10-18.

### REFERENCES

1. Filippova O.B., Kiiiko E.I. Group and individual young cattle's keeping. *Journal of VNIMZH*. 2019. N3(35). 84-88 (In Russian). EDN: QVFOGR.
2. Moskalev A.A. Productivity and behavior of calves up to 6 months of age depending on technological parameters of their keeping. *Zootechnical Science of Belarus*. 2024. Vol. 59. N2. 214-223 (In Russian). EDN: DUEKXW
3. Minakov V.N., Bazylev M.V., Razumovsky N.P. et al. Innovative approaches to optimizing the growing of repair young cattle in dairy cattle breeding. *Veterinarnyy zhurnal Belarusi*. 2024. N2(21). 95-99 (In Russian). EDN: GHVKNC.
4. Makarov A.V., Khanipova V.A., Fedotova A.S. et al. A comparative characterization of systems for growing young stock of cattle for fattening. *Journal of Agriculture and*

- Environment*. 2023. N9(37). 7. DOI: 10.23649/JAE.2023.37.5.
5. Moskalev A.A. Influence of the duration of keeping calves in individual houses on their natural resistance and state of health. *Zootechnical Science of Belarus*. 2022. Vol. 57. N2. 177-184 (In Russian). DOI: 10.47612/0134-9732-2022-57-2-177-184.
  6. Moskalev A.A. Calf performance and comfort assessment with different durations of their keeping in individual houses. *Zootechnical Science of Belarus*. 2022. Vol. 57. N2. 184-191 (In Russian). DOI: 10.47612/0134-9732-2022-57-2-184-191.
  7. Kostesha N.Ya., Makarevich V.G. Functional state of the body of calves raised by the cold method of farming. *Live and Bio-Abiotic Systems*. 2015. N13. 13 (In Russian). DOI: 10.18522/2308-9709-2015-13-13.
  8. Shilova E.N., Ryaposova M.V., Sokolova O.V. Influence of the «cold» method of growing calves on indexes of natural resistance in acute respiratory viral infections of cattle. *Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology*. 2017. N3(23). 63-67 (In Russian). EDN: ZHTUPD.
  9. Krupitsyn V.V., Burtsev S.A. Improving elements of young cattle rearing technology to enhance their adaptation to low temperature conditions in cold housing. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*. 2011. N3(30). 53-56 (In Russian). EDN: OJOCFF.
  10. Eremenko O.N., Kulikova N.I., Malakhova A.O., Sergeeva N.V. Blankets – is comfort, health, growth rate for calves. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2015. N56. 180-184 (In Russian). EDN: VKXIBB.
  11. Lorets O.G., Gorelik O.V., Belyaeva N.V. Peculiarities of growth and development in heifers at cold method of cultivation. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2017. N6(160). 9-16 (In Russian). EDN: ZHDAYF.
  12. Buyarov V.S. Scientific substantiation of the application of infrared radiation while calves growing. *Bulletin of Agrarian Science*. 2020. Iss. 4(85). 42-55 (In Russian). DOI: 10.17238/issn2587-666X.2020.4.42.
  13. Kuzmichev A.V., Lyamtsov A.K., Tikhomirov D.A. Thermal and energy indicators of IR irradiators for young animals. *Light & Engineering*. 2015. N3. 57-58 (In Russian). EDN: TWKOHR.
  14. Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., and Khimenko A.V. Creating a standardized thermal regime for keeping calves in rooms with lightweight enclosures. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2025. Vol. 72. N2(59). 72-78 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-2-72-78.
  15. Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Comparative analysis of methods for calculating radiant heating of young animals in livestock premises. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N1. 10-18 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-10-18.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Тихомиров Д.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, подготовка начального варианта статьи;

Кузьмичев А.В. – формулирование цели и задачи исследования, разработка теоретических предпосылок;

Хименко А.В. – доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Tikhomirov D.A. – scientific supervision; formulation of the main research concept; preparation of the draft manuscript;

Kuzmichev A.V. – formulation of the research purpose and objectives, development of the theoretical framework;

Khimenko A.V. – manuscript revision; formulation of the general conclusions; literature review.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

05.04.2026

18.05.2026

EDN: FIGRSQ

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-37-44



Научная статья

УДК 631.544.45



## Камера с управляемым микроклиматом и освещением для адаптации микроклонов растений к условиям *ex vitro*

**Андрей Александрович Гришин**,  
кандидат экономических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: 5145412@mail.ru;

**Артём Александрович Дорохов**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: dorokhov-91@yandex.ru;

**Дмитрий Витальевич Поручиков**,  
научный сотрудник,  
e-mail: dv.poruchikov@yandex.ru;

**Елена Валерьевна Павлова**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: elena\_pavlova85@mail.ru;

**Мария Сергеевна Широкова**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: m\_shirokova98@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим, что перевод микрорастений из стерильной среды *in vitro* в нестерильную среду *ex vitro* сопряжен с резким изменением микроклиматических параметров, прежде всего влажности и газообмена. Разработана климатическая камера для адаптации растений, полученных методом микроклонального размножения, к условиям *ex vitro*. (Цель исследования) Экспериментальная верификация камеры, оснащенной программируемыми светодиодными фитосветильниками и системой прецизионного контроля микроклимата. (Материалы и методы) Адаптация проведена на растениях-регенерантах красной смородины (*Ribes rubrum* L.) в кассетах с субстратом. Параметры микроклимата и спектрального состава излучения измеряли по стандартизованным методикам. (Результаты и обсуждение) Камера обеспечивает поддержание температуры от 10 до 35 градусов Цельсия, относительной влажности от 40 до 95 процентов, скорость изменения температуры при нагреве 0,9 градуса Цельсия в минуту, при охлаждении 0,4 градуса Цельсия в минуту, амплитуду колебаний температуры  $\pm 0,6$  градуса Цельсия, влажности  $\pm 3$  процента. Освещение реализовано на базе светодиодных фитосветильников с независимым управлением по четырем спектральным каналам (синий 460 нанометров, красный 660 нанометров, дальний красный 720 нанометров, белый широкополосный 400-700 нанометров, опционально ультрафиолетовый 380-400 нанометров). Плотность фотосинтетического фотонного потока регулируется от 34 до 805,7 микромоля на квадратный метр в секунду. Управление осуществляется через сенсорный интерфейс с ручным и автоматическим режимами, программированием уставок, плавным изменением интенсивности освещения и сохранением шаблонов. Предусмотрена интеграция с системами интернета вещей. (Выводы) Подтвержденные характеристики соответствуют заявленным, что обеспечивает эффективную адаптацию микроклонов растений к условиям *ex vitro*.

**Ключевые слова:** адаптация растений, климатическая камера, светодиодные фитосветильники, замкнутая агроэкосистема, *in vitro*, *ex vitro*.

■ **Для цитирования:** Гришин А.А., Дорохов А.А., Поручиков Д.В., Павлова Е.В., Широкова М.С. Камера с управляемым микроклиматом и освещением для адаптации микроклонов растений к условиям *ex vitro* // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 37-44. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-37-44. EDN: FIGRSQ.

Scientific article

## Climate Chamber with Controlled Microclimate and Lighting for the Adaptation of Plant Microclones to *ex vitro* Conditions

**Andrey A. Grishin**,  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: 5145412@mail.ru;

**Artem A. Dorokhov**,  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: dorokhov-91@yandex.ru;

**Dmitry V. Poruchikov**,  
researcher, e-mail: dv.poruchikov@yandex.ru;

**Elena V. Pavlova**,  
junior researcher,  
e-mail: elena\_pavlova85@mail.ru;

**Maria S. Shirokova**,  
junior research,  
e-mail: m\_shirokova98@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The transition of microplants from sterile *in vitro* conditions to a non-sterile *ex vitro* environment is accompanied by abrupt changes in microclimatic parameters, particularly humidity and gas exchange. This study presents the development of a climate chamber designed to support the adaptation of micropropagated plants to *ex vitro* conditions. (*Research purpose*) The study aimed to experimentally verify the performance of a chamber equipped with programmable LED phytolamps and a precision microclimate control system. (*Materials and methods*) The adaptation experiments were conducted on regenerated redcurrant plants (*Ribes rubrum L.*) grown in substrate-filled trays. Microclimatic parameters and the spectral composition of radiation were measured using standardized methods. (*Results and discussion*) The chamber maintains a temperature range of 10 to 35 degrees Celsius and a relative humidity range of 40 to 95 percent. The temperature change rate is 0.9 degrees Celsius per minute during heating and 0.4 degrees Celsius per minute during cooling, while temperature and relative humidity fluctuations do not exceed  $\pm 0.6$  degrees Celsius and  $\pm 3$  percent, respectively. Lighting is provided by LED phytolamps with independent control of four spectral channels: blue, 460 nanometers; red, 660 nanometers; far-red, 720 nanometers; and broad-spectrum white, 400–700 nanometers, with optional ultraviolet radiation in the 380–400 nanometers range. Photosynthetic photon flux density can be adjusted from 34 to 805.7 micromoles per square meter per second. The chamber is operated through a touch-screen interface that enables manual and automatic control, setpoint programming, smooth light-intensity adjustment, and storage of preset templates. Integration with Internet of Things systems is also supported. (*Conclusions*) The verified characteristics correspond to the declared parameters, confirming the chamber's suitability for the effective adaptation of micropropagated plants to *ex vitro* conditions.

**Keywords:** plant adaptation, climate chamber, LED phytolamps, closed agroecosystem, *in vitro*, *ex vitro*.

■ **For citation:** Grishin A.A., Dorokhov A.A., Poruchikov D.V., Pavlova E.V., Shirokova M.S. Climate chamber with controlled microclimate and lighting for the adaptation of plant microclones to *ex vitro* conditions. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 37-44 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-37-44. EDN: FIGRSQ.

**А**даптация регенерантов к нестерильным условиям выращивания относится к наиболее трудоемким и ответственным этапам клонального микроразмножения, во многом определяющим успешность укоренения растительного материала [1, 2]. Перевод микрорастений из стерильной среды *in vitro* в нестерильную *ex vitro* сопряжен с резким изменением микроклиматических параметров, прежде всего влажности и газообмена. На этой стадии в силу высокой чувствительности растений к смене микроклимата, а именно резкому падению относительной влажности воздуха со 100 до 60% и ниже, наблюдается максимальная гибель регенерантов, от 50 до 90% [2, 3]. Это становится лимитирующим фактором масштабирования технологий промышленного получения регенерантов и выхода качественного посадочного материала.

Оснащение климатических камер современными светодиодными фитосветильниками для адаптации растений, культивируемых *in vitro*, к условиям *ex vitro*, представляет собой перспективное направление агробиотехнологии [4, 5]. Существующие методы и технологические решения для выращивания растений *in vitro* зачастую не позволяют в полной мере создавать и динамически корректировать параметры среды, необходимые для последующей успешной адаптации. Многочисленные исследования показали, что полноценный рост и развитие растений возможны только при строго определенном, узком диапазоне температуры [6, 7]. Более того, интенсивность светового потока и его спектральный состав должны варьироваться не

только в зависимости от видовой принадлежности культуры, но и в соответствии с суточным ритмом освещения [8-10].

**Цель исследования.** Разработка и экспериментальная верификация климатической камеры, оснащенной программируемыми светодиодными фитосветильниками и системой прецизионного контроля микроклимата, для создания управляемых условий адаптации растений при их переводе из режима *in vitro* в *ex vitro*.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** В качестве объектов адаптации на этапе отработки режимов камеры использовались растения-регенеранты красной смородины (*Ribes rubrum L.*), полученные методом клонального микроразмножения. Адаптация проводилась в кассетах 8×8 ячеек, заполненных субстратом «Пельгорское-М», обеспечивающим благоприятные условия для укоренения. Спектральный состав излучения и верификация микроклиматических параметров разработанной камеры оценивали в соответствии с ГОСТ 25051.2-82 «Система государственных испытаний продукции. Камеры тепла и холода испытательные. Методы аттестации».

Температуру и влажность воздуха измеряли с помощью комбинированного прибора ТКА-ПКМ (модель 42), скорость циркуляции воздуха фиксировалась цифровым анемометром *VTMETER VT-100*. Спектральные распределения и интенсивность светового потока регистрировались спектрометром *UPRtek PG200N PAR* (погрешность  $\pm 1$  нм). Измерения выполнены при двух режимах работы осветительной системы: мощности 100% и минимально

возможном уровне интенсивности. Датчик прибора размещался на дне лотка для растений. В каждом режиме проводилось пять замеров (по углам и в центре лотка). Итоговое значение определялось как среднее арифметическое.

Контрольно-измерительная аппаратура при оценке температурно-влажностного режима и параметров воздухообмена размещалась по схеме, регламентированной для испытательных камер кубической конфигурации. Измерения проводились в шести контрольных точках, расположенных перед центрами каждой из шести внутренних поверхностей рабочего объема (рис. 1).

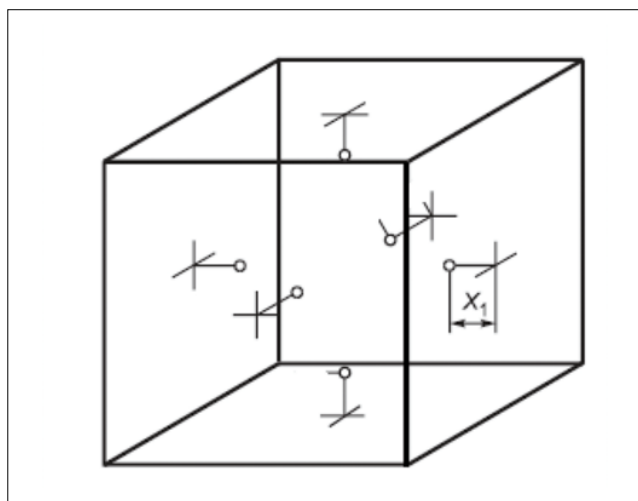


Рис. 1. Размещение точек измерения температуры, относительной влажности и скорости циркуляции воздуха в камере ( $x_1 = H/10$ ,  $H$  – длина камеры)

Fig. 1. Arrangement of measurement points for temperature, relative humidity, and airflow velocity in the chamber ( $x_1 = H/10$ , where  $H$  – is the chamber length)

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Обработку экспериментальных данных и расчет нормируемых характеристик выполняли согласно методикам ГОСТ 25051.2-82 и ГОСТ Р 53618-2009 (МЭК 60068-3-5:2001) «Требования к характеристикам камер для испытаний технических изделий на стойкость к внешним воздействующим факторам. Методы аттестации камер (без загрузки) для испытаний на стойкость к воздействию температуры».

**Конструкция и система управления климатической камеры.** Для управляемого перехода растений к условиям *ex vitro* разработана специализированная климатическая камера (рис. 2). Работа камеры управляется по программе для ЭВМ с сенсорной панели (Гришин А.А., Измайлов А.Ю., Дорохов А.С. и др. Программа управления климатической камерой для адаптации микроклонов культурных растений *in vitro*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618595 Российская Федерация).

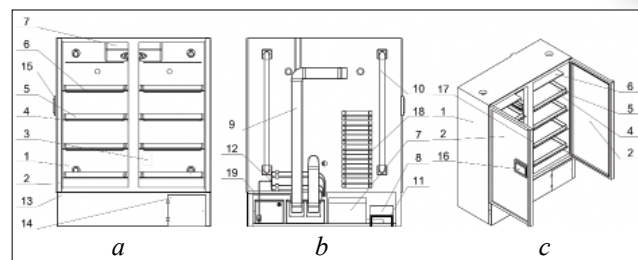


Рис. 2. Схема климатической камеры: а – вид спереди; б – вид сзади; с – изометрическая проекция; 1 – камера; 2 – двери; 3 – датчик температуры и влажности; 4 – полки; 5 – поддон (лоток) для гидропонии; 6 – светодиодный фитосветильник; 7 – холодильный компрессор и испаритель (теплообменник); 8 – блок автоматики; 9 – система увлажнения; 10 – каналы циркуляции воздуха; 11 – кронштейн блока управления; 12 – система полива; 13 – декоративная панель; 14 – дверца декоративной панели; 15 – крепление сенсорной панели; 16 – сенсорный дисплей; 17 – ручка дверцы; 18 – блоки питания светильников; 19 – шланг отвода конденсата

Fig. 2. General view of the climate chamber: a – front view; b – back view; c – isometric view; 1 – chamber; 2 – doors; 3 – temperature and humidity sensor; 4 – shelves; 5 – hydroponic tray; 6 – LED phytolamp; 7 – refrigeration compressor and evaporator/heat exchanger; 8 – automation unit; 9 – humidification system; 10 – airflow channels; 11 – control unit bracket; 12 – irrigation system; 13 – decorative panel; 14 – decorative panel door; 15 – touch-screen display mount; 16 – touch-screen display; 17 – door handle; 18 – lamp power supply units; 19 – condensate drain hose.

Графический интерфейс управления (рис. 3, табл. 1) включает разделы: «Главная», «Режимы», «Параметры», «График», «Журнал событий», «Рецепты», «Корректировка». Функционал системы предусматривает ручной и автоматический режимы. Температура и влажность поддерживаются в автоматическом режиме на основе непрерывного мониторинга показаний датчиков в соответствии с программными уставками дня/ночи. Предусмотрены алгоритмы плавного изменения интенсивности освещения (рассвет/закат).

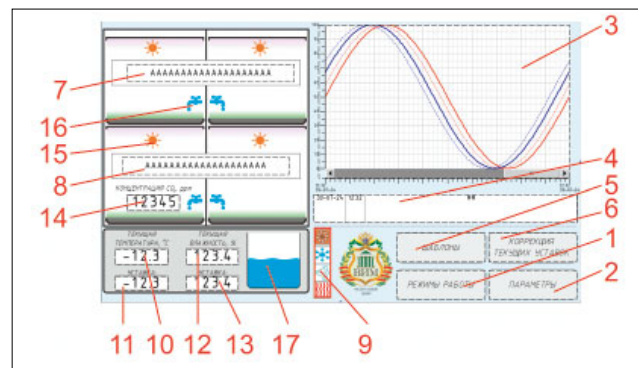


Рис. 3. Интерфейс управления

Fig. 3. User control interface

Таблица 1 / Table 1	
ИНТЕРФЕЙС УПРАВЛЕНИЯ / USER CONTROL INTERFACE	
1	Кнопка перехода на страницу выбора режима работы исполнительных устройств
2	Кнопка перехода на страницу установки параметров работы
3	Малый график температуры и влажности воздуха. Нажать на график для перехода к полноэкранному графику температуры и влажности воздуха, а также графику показания датчика CO <sub>2</sub>
4	Отображение текущих (активных) сообщений журнала событий. Нажать на таблицу для перехода к полноэкранному журналу событий
5	Кнопка перехода на страницу управления и настройки шаблонов параметров
6	Кнопка перехода на страницу корректировки текущих уставок параметров работы
7 и 8	Индикация текущего выбранного шаблона уставок параметров работы для верхнего и для нижнего яруса
9	Индикация работы исполнительных устройств: вытяжка, охлаждение, увлажнение, нагрев
10	Индикация текущей температуры воздуха в камере
11	Индикация текущей уставки температуры воздуха (изменяется в зависимости от режима день/ночь)
12	Индикация текущей влажности воздуха в камере
13	Индикация текущей уставки влажности воздуха (изменяется в зависимости от режима день/ночь)
14	Отображение текущей концентрации CO <sub>2</sub>
15	Индикация работы освещения на соответствующем ярусе
16	Индикация работы полива на соответствующем ярусе
17	Индикация уровня воды в баке полива по сигналам поплавковых датчиков уровня (ДУ), установленных в баке

Анализ динамики параметров реализован путем ретроспективного просмотра данных (при активации соответствующей области на поле графика отображаются численные значения температуры и относительной влажности воздуха, зафиксированные в интересующий момент времени, а также дата и время их регистрации). С целью повышения оперативности и воспроизводимости настроек реализован режим работы по шаблонам, который позволяет сохранять комбинации уставок для различных экспериментальных задач. Сформированная таким образом база данных исключает необходимость повторного ввода значений при многократном использовании отработанных режимов, что существенно упрощает подготовку оборудования к работе и минимизирует вероятность ошибок оператора. Интерфейс также содержит индикацию концентрации CO<sub>2</sub>, реализованную как резервный канал для подключения соответствующих датчиков в будущих модификациях.

При отклонении от заданных уставок контроллер корректирует работу исполнительных устройств, обеспечивая стабильные условия в рабочем объеме камеры. Для компенсации инерционности системы

увлажнения и предотвращения переувлажнения увлажненный воздух подается в импульсном (дозированном) режиме. Параметры дозирования определяются эмпирически и могут варьироваться в зависимости от режима работы и особенностей культуры.

В целях сервисного обслуживания интерфейс предусматривает функцию игнорирования сигналов поплавкового датчика уровня воды в резервуаре системы полива, позволяя осуществлять принудительную промывку. Состав и компоновка элементов системы автоматического управления приведены на рисунке 4.

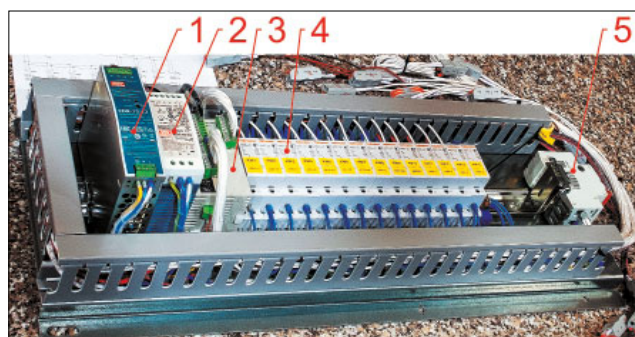


Рис. 4. Система автоматического управления: 1 – блок питания мембранных насосов; 2 – блок питания программируемого контроллера; 3 – программируемый контроллер; 4 – группа контакторов; 5 – вводной автомат  
 Fig. 4. Automatic control system: 1 – power supply unit for the diaphragm pumps; 2 – power supply unit for the programmable controller; 3 – programmable controller; 4 – contactor assembly; 5 – main circuit breaker

**Верификация климатических параметров.** Результаты испытаний подтвердили заявленные технические характеристики климатической камеры адаптации (табл. 2).

**Светотехнические характеристики.** Осветительная система организована по ярусному принципу. Светодиодные фитосветильники каждого яруса обеспечивают независимую плавную регулировку интенсивности по четырем спектральным каналам (белый, синий, красный, дальний красный). Спектральный состав измеряли при 100% и при минимальной мощности (табл. 3, рис. 5). Полученные данные свидетельствуют о возможности избирательного регулирования параметров световой среды для управления морфогенетическими процессами растений, что согласуется с выводами других исследователей [8-11].

Количественные характеристики – температурно-влажностные, спектральные распределения и интенсивность излучения взяты за основу формирования исходных аналитических зависимостей. Указанные зависимости, верифицированные экспериментальными данными (рис. 6), послужили базой

Таблица 2 Table 2

**ПОДТВЕРЖДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ АДАПТАЦИИ**  
**VERIFIED SPECIFICATIONS OF THE CLIMATE CHAMBER FOR PLANT ADAPTATION**

Характеристика	Номинальное значение	Допустимое отклонение
Скорость изменения температуры, °С/мин: при охлаждении при нагреве		0,4 0,9
Предельная температура, °С: отрицательная положительная	10 35	±1 ±1
Промежуточная температура, °С	15; 20; 30	±1
Градиент температуры, °С		1,5
Градиент относительной влажности, %		8
Амплитуда колебания температуры в камере, °С		±0,6
Относительная влажность воздуха, %: повышенная пониженная	95 40	±3 ±3
Амплитуда колебания влажности в камере, %		±3
Средняя скорость циркуляции воздуха, м/с		0,38

Таблица 3 Table 3

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ФИТОСВЕТИЛЬНИКОВ ПО ЯРУСАМ ПРИ 100% И МИНИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ**  
**CHARACTERISTICS OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF LED PHYTOLAMP RADIATION BY TIER AT 100% AND MINIMUM POWER**

Показатель	Ярус			
	1	2	3	4
PFD-B (синий)	От 9,281 до 124,5	От 10,266 до 172,9	От 5,27 до 77,35	От 5,423 до 79,93
PFD-G (зеленый)	От 14,747 до 183,5	От 15,379 до 241,7	От 9,525 до 140,5	От 12,206 до 182,3
PFD-R (красный)	От 31,191 до 497,7	От 11,384 до 174,9	От 19,22 до 288,7	От 16,997 до 258,7
PFD-UV (ультрафиолетовый)	От 0,013 до 0,243	От 0,0122 до 0,103	От 0,006 до 0,04	От 0,0023 до 0,056
PFD-FR (дальний красный)	От 0,5095 до 6,91	От 0,9033 до 13,58	От 4,888 до 74,26	От 1,454 до 21,4
PFD (полный)	От 55,742 до 812,	От 37,945 до 603,2	От 38,91 до 580,8	От 36,087 до 542,4
Плотность фотосинтетического фотонного потока (PPFD), мкмоль/(м <sup>2</sup> ·с)	От 55,22 до 805,7	От 37,029 до 589,5	От 34,016 до 506,5	От 34,63 до 521

для построения основного алгоритма компьютерной программы управления ростом и развитием растений в условиях регулируемой среды, что согласуется с подходами, изложенными в работах [13, 14].

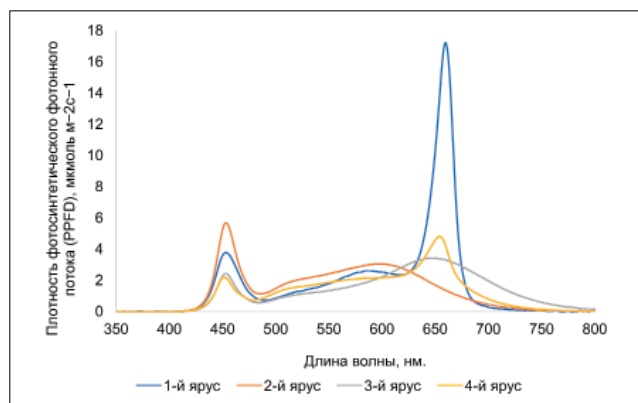


Рис. 5. Диаграммы спектра излучения светодиодных фитосветильников и их плотность фотосинтетического фотонного потока по ярусам при мощности 100%  
Fig. 5. Spectral distribution of LED phytolamp radiation and photosynthetic photon flux density by tier at 100% power

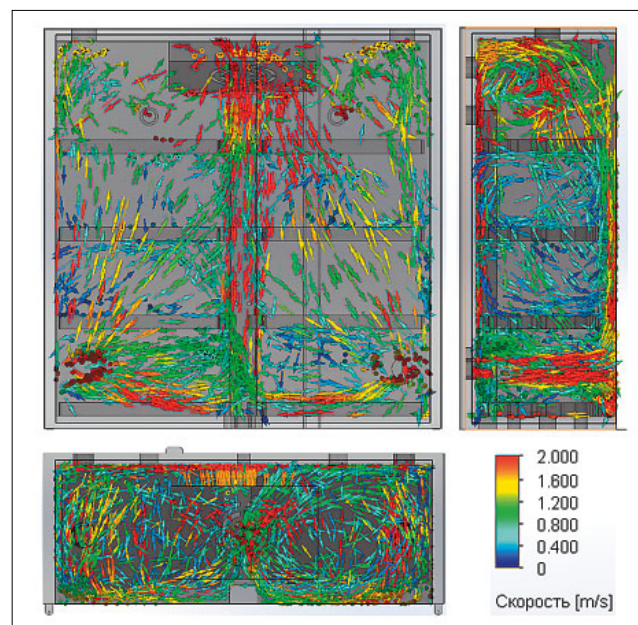


Рис. 6. Распределение воздушных потоков в рабочем объеме камеры  
Fig. 6. Airflow distribution within the working chamber

Таблица 4

Table 4

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КЛИМАТИЧЕСКИХ КАМЕР / COMPARISON OF CLIMATE CHAMBER CHARACTERISTICS

Параметр	Разработанная камера	Камера Binder KBF P	Камера Snijders Micro Clima	Камера CLF PlantClimatics
Диапазон температуры, °C	10-35	0-70	10-60	10-40
Диапазон RH, %	40-95	10-80	40-95	50-95
Стабильность температуры, ±°C	±0,6	±0,1–0,3	±0,2–0,5	±0,5
Тип освещения	Программируемый LED, 4 канала	Люминесцентное/ LED (опция)	Люминесцентное/ LED (фиксированный спектр)	Программируемый LED
Регулировка спектра	Да, независимо по каналам	Нет	Нет/ограниченно	Да

Сравнение с существующими решениями. Сравнительный анализ технических характеристик разработанной камеры и некоторых распространенных моделей климатического оборудования (табл. 4) показывает, что предлагаемое решение соответствует современному уровню техники по основным параметрам (диапазон температуры и влажности, точность поддержания).

Ключевая особенность состоит в наличии программируемых светодиодных фитосветильников с отдельным управлением по четырем спектральным каналам. Это в комплексе с прецизионным контролем микроклимата создает условия, максимально приближенные к потребностям конкретных культур на этапе адаптации. В большинстве стандартных климатических камер (например, серий *Binder*, *Snijders Scientific*) используется либо стандартное люминесцентное освещение, либо его светодиодный аналог без тонкой спектральной настройки. В специализированных фитотронах (например, *CLF PlantClimatics*) спектральная настройка возможна, однако регулировка интенсивности по отдельным спектральным диапазонам не предусмотрена.

Разработанное техническое решение позволяет гибко настраивать параметры освещения и микроклимата, адаптируя их под биологические особенности конкретных культур. Эффективность работы камеры подтверждена в ходе эксперимента по адаптации растений-регенерантов четырех сортов красной смородины (*Red Lake*, *Englische Grosse Weisse*, Мармеладница, Подарок лета). В течение 28 дней в камере поддерживались оптимальные условия: температура  $22 \pm 2$  °C, фотопериод 16 ч, при этом влажность воздуха плавно снижалась с 96 до 45%.

Для оценки влияния световой среды на физиологическое состояние растений использовались три варианта спектра: белый (*W*), красно-белый с ультрафиолетом (*RWUV-A*, 625-740 нм) и красно-белый (*RW*). Полученные результаты подтвердили высокую эффективность разработанной камеры. Наиболее благоприятные условия для адаптации обеспечил спектр *RWUV-A*, который способствовал максимальному накоплению биомассы и хлорофилла у большинства сортов, что было подтверждено

наивысшими значениями вегетационного индекса (*NDVI*), указывающего на улучшенное физиологическое состояние и биомассу. Во всех вариантах эксперимента было зафиксировано сохранение тургора и отсутствие некротических и хлоротичных повреждений листовых пластин в течение адаптационного периода, что в совокупности доказывает способность разработанной климатической камеры эффективно управлять процессом адаптации растений при их переводе из стерильных условий *in vitro* в нестерильные *ex vitro* [14].

**Выводы.** Разработана и экспериментально верифицирована климатическая камера, оснащенная программируемыми светодиодными фитосветильниками и системой прецизионного контроля микроклимата, обеспечивающая создание управляемых условий для адаптации растений к нестерильным условиям *ex vitro*.

Реализованное техническое решение позволяет стабильно поддерживать видоспецифичные режимы температуры (10-35 °C), относительной влажности воздуха (40-95%) и спектрального состава освещения с возможностью независимой регулировки по четырем спектральным каналам.

Подтвержденные характеристики камеры (скорость изменения температуры, амплитуда колебаний, равномерность воздушных потоков) соответствуют требованиям ГОСТ и создают предпосылки для эффективной адаптации растений. Новизна разработанного технического решения подтверждена патентом RU 2832305, 2024 г.

Авторы выражают благодарность кандидату биологических наук Инне Валерьевне Князевой и кандидату технических наук Александру Анатольевичу Смирнову за ценные научные консультации и экспертные рекомендации по совершенствованию конструкции климатической камеры, разработку и изготовление светодиодных фитосветильников, за содействие в оптимизации режимов работы камеры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гушин А.В., Киракосян Р.Н., Калашникова Е.А. и др. Применение aeropонных технологий для адаптации микроклонов *Vitis vinifera* к условиям *ex vitro* // *Проблемы развития АПК региона*. 2025. N2(62). С. 26-35. DOI: 10.52671/20790996\_2025\_2\_26.
2. Grzelak M., Pacholczak A., Nowakowska K. Challenges and insights in the acclimatization step of micropropagated woody plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2024. Vol. 159. 72. DOI: 10.1007/s11240-024-02923-1.
3. Бондарева Л.Л., Минейкина А.И. Ускоренное размножение родительских линий капусты белокочанной с использованием штеклингов и камер искусственного климата // *Овощи России*. 2024. N5. С. 26-30. DOI: 10.18619/2072-9146-2024-5-26-30.
4. Семенова Н.А., Гришин А.А., Дорохов А.А. Аналитический обзор климатических камер для выращивания овощных культур // *Вестник НГИЭИ*. 2020. N1(104). С. 5-15. EDN: DWMJSZ.
5. Стребков Д.С., Юферев Л.Ю., Александров Д.В., Соколов А.В. Повышение эффективности систем освещения и облучения // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2014. N1. С. 13-16. EDN: UXQOER.
6. Jiang Y., Lindsay D.L., Davis A.R. et al. Impact of heat stress on pod-based yield components in field pea (*Pisum sativum L.*). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2020. 206:76-89. DOI: 10.1111/jac.12365.
7. Silva D.A., Pinto-Maglio C.A.F., Oliveira E.C. et al. Influence of high temperature on the reproductive biology of dry edible bean (*Phaseolus vulgaris L.*). *Scientia Agricola*. Vol. 77. Rel. 3. 2020. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0233.
8. Лисина Т.Н., Бурдышева О.В., Шолгин Е.С. Влияние светодиодного освещения различного спектра на растения картофеля (*Solanum tuberosum L.*) при выращивании *in vitro* (обзор) // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023. Т. 24. N6. С. 913-923. DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.6.913-92.
9. Chen Y., Bian Z., Marcelis L.F.M. et al. Green light is similarly effective in promoting plant biomass as red/blue light: a meta-analysis. *Journal of Experimental Botany*. 2024. Vol. 75. N18. 5655-5666. DOI: 10.1093/jxb/erae267.
10. Hitz T., Graeff S., Hartung J., Munz S. Morphological response of soybean (*Glycine max (L.) Merr.*) Cultivars to light intensity and red to far-red ratio. *Agronomy*. 2019. Vol. 9. Rel. 8. N428. DOI: 10.3390/agronomy9080428.
11. Лях П.А., Колошина К.А., Попова К.И., Лях А.А. Влияние спектрального состава светодиодного излучения на рост и развитие растений // *Инновации и продовольственная безопасность*. 2022. N(1). С. 108-120. DOI: 10.31677/2311-0651-2022-35-1-108-120.
12. Moustaka J., Moustakas M. Early-stage detection of biotic and abiotic stress on plants by chlorophyll fluorescence imaging analysis. *Biosensors*. 2023. Vol. 13. N8. 796. DOI: 10.3390/bios13080796.
13. Плотникова Л.Я., Самойлов В.Н. Перспективные направления повышения продуктивности растений в интенсивной светокультуре // *Научный альманах*. 2015. N12-2 (14). С. 428-431. DOI: 10.17117/na.2015.12.02.428.
14. Panfilova O., Ryago N., Ondrasek G. et al. Optimizing microclonal propagation of red currant cultivars: the role of nutrient media, sterilizers, and led lighting in plant adaptation. *Horticulturae*. 2025. Vol. 11. N2. 149. DOI: 10.3390/horticulturae11020149.

## REFERENCES

1. Gushchin A.V., Kirakosyan R.N., Kalashnikova E.A. et al. Application of aeroponic technologies for adaptation of *Vitis vinifera* microclones to *ex vitro* conditions. *Development problems of regional agro-industrial complex*. 2025. N2(62). 26-35 (In Russian). DOI: 10.52671/20790996\_2025\_2\_26.
2. Grzelak M., Pacholczak A., Nowakowska K. Challenges and insights in the acclimatization step of micropropagated woody plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2024. Vol. 159. 72. DOI: 10.1007/s11240-024-02923-1.
3. Bondareva L.L., Mineykina A.I. Accelerated reproduction of the parental lines of white cabbage using rosette plants (steckling) and artificial climate chambers. *Vegetable Crops of Russia*. 2024. N5. 26-30 (In Russian). DOI: 10.18619/2072-9146-2024-5-26-30.
4. Semenova N.A., Grishin A.A., Dorokhov A.A. Analytical review of climatic chambers for vegetable crops growing. *Bulletin NGIEI*. 2020. N1(104). 5-15 (In Russian). EDN: DWMJSZ.
5. Strebkov D.S., Yuferev L.Yu., Aleksandrov D.V., Sokolov A.V. Improving the efficiency of lighting and exposure. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2014. N1. 13-16 (In Russian). EDN: UXQOER.
6. Jiang Y., Lindsay D.L., Davis A.R. et al. Impact of heat stress on pod-based yield components in field pea (*Pisum sativum L.*). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2020. 206:76-89. DOI: 10.1111/jac.12365.
7. Silva D.A., Pinto-Maglio C.A.F., Oliveira E.C. et al. Influence of high temperature on the reproductive biology of dry edible bean (*Phaseolus vulgaris L.*). *Scientia Agricola*. Vol. 77. Rel. 3. 2020. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0233.
8. Lisina T.N., Burdysheva O.V., Sholgin E.S. Effect of different LEDs light spectrum on potato (*Solanum tuberosum L.*) *in vitro* (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023. N24(6). 913-923 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.6.913-923.
9. Chen Y., Bian Z., Marcelis L.F.M. et al. Green light is similarly effective in promoting plant biomass as red/blue light: a meta-analysis. *Journal of Experimental Botany*. 2024. Vol. 75. N18. 5655-5666. DOI: 10.1093/jxb/erae267.
10. Hitz T., Graeff S., Hartung J., Munz S. Morphological response of soybean (*Glycine max (L.) Merr.*) Cultivars to

- light intensity and red to far-red ratio. *Agronomy*. 2019. Vol. 9. 8. N428. DOI: 10.3390/agronomy9080428.
11. Lyakh P.A., Koloshina K.A., Popova K.I., Lyakh A.A. Influence of the spectral composition of led radiation on plant growth and development. *Innovations and Food Safety*. 2022. N(1). 108-120 (In Russian). DOI: 10.31677/2311-0651-2022-35-1-108-120.
  12. Moustaka J., Moustakas M. Early-stage detection of biotic and abiotic stress on plants by chlorophyll fluorescence imaging analysis. *Biosensors*. 2023. Vol. 13. N8. 796. DOI: 10.3390/bios13080796.
  13. Plotnikova L.Ya., Samoylov V.N. Perspective directions of increasing plant productivity in intensive light crop production. *Scientific Almanac*. 2015. N12-2 (14). 428-431 (In Russian). DOI: 10.17117/na.2015.12.02.428.
  14. Panfilova O., Ryago N., Ondrasek G. et al. Optimizing microclonal propagation of red currant cultivars: the role of nutrient media, sterilizers, and led lighting in plant adaptation. *Horticulturae*. 2025. Vol. 11. N2. 149. DOI: 10.3390/horticulturae11020149.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант.*

#### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.  
*The author read and approved the final manuscript.*

#### Заявленный вклад соавторов:

Гришин А.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;  
 Дорохов А.А. – подготовка начального варианта статьи, формулирование цели и задачи исследования, разработка теоретических предпосылок;  
 Поручиков Д.В. – компьютерное моделирование, доработка текста;  
 Павлова Е.В. – формирование общих выводов;  
 Широкова М.С. – графическое сопровождение, литературный анализ.  
*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант*

#### Coauthors' contribution:

Grishin A.A. – scientific supervision and conceptualization of the main research directions;  
 Dorokhov A.A. – preparation of the draft manuscript, formulation of the research aim and objectives, and development of the theoretical framework;  
 Poruchikov D.V. – computer modelling, revision and editing of the manuscript;  
 Pavlova E.V. – formulation of the general conclusions;  
 Shirokova M.S. – preparation of graphical materials and literature review.  
*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
 The paper was accepted for publication on

02.04.2026  
 25.05.2026

EDN: FVHBMG

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-45-51



Научная статья

УДК 631.361



## Обмолачивающее устройство с бильным барабаном для уборки кукурузы на зерно

**Владимир Макичевич Погосян<sup>1</sup>**,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: pogosyan@gmail.com;

**Оксана Николаевна Соколенко<sup>1</sup>**,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: sokolenko.oksana@mail.ru;

**Михаил Евгеньевич Чаплыгин<sup>2</sup>**,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: misha2728@yandex.ru

<sup>1</sup>Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим, что при соприкосновении с рабочими элементами молотильного аппарата физические и механические характеристики обрабатываемого материала изменяются. Проведенный анализ выявил, что не было уделено должного внимания влиянию этих изменений на условия захвата и удержания материала в процессе обмолота. Как показали исследования, для успешной обработки материал должен был захвачен и удержан. При обмолоте кукурузных початков ключевым фактором, определяющим эти условия и обеспечивающим эффективность процесса, является связь основных параметров комбайна с производительностью и требуемой мощностью с учетом физико-механических свойств обмолачиваемого материала. (*Цель исследования*) Выявить зависимость скорости перемещения продуктов обмолота от мощностных характеристик комбайна при уборке кукурузы на зерно. (*Материалы и методы*) На практике при обработке початков кукурузы оптимальный диапазон значений максимального угла захвата определяется опытным путем и зависит от влажности початков, а также от частоты вращения рабочих органов. Изучили факторы, влияющие на эффективность процесса обмолота кукурузы на зерно молотильно-сепарирующим аппаратом комбайна. Использовали статистические методы метаисследования. (*Результаты и обсуждение*) Захватывающая способность молотильного барабана увеличивается с повышением коэффициента трения между початком и поверхностью бича и с уменьшением коэффициента трения между початком и подбарабаньем. Показана зависимость скорости молотильного барабана при обмолоте от влажности материала. Установлена зависимость качества обмолота от параметров молотильных зазоров на входе в подбарабанье и выходе из него. Выявлена потребная мощность с учетом всех процессов при обмолоте. (*Выводы*) Проведенный анализ позволил определить зависимость скорости перемещения продуктов обмолота молотильным бильным барабаном, которым оснащен комбайн для уборки кукурузы, от мощности.

**Ключевые слова:** кукуруза, уборка, самоходный комбайн, производительность, молотильное устройство, бильный барабан.

■ **Для цитирования:** Погосян В.М., Соколенко О.Н., Чаплыгин М.Е. Обмолачивающее устройство с бильным барабаном для уборки кукурузы на зерно // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 45-51. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-45-51. EDN: FVHBMG.

Scientific article

## Threshing Unit with a Rasp-Bar Drum for Maize Grain Harvesting

**Vladimir M. Pogosyan<sup>1</sup>**,  
Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: pogosyan@gmail.com;

**Oksana N. Sokolenko<sup>1</sup>**  
Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: sokolenko.oksana@mail.ru;

**Mikhail E. Chaplygin<sup>2</sup>**,  
Ph.D. (Eng.), leading researcher,  
e-mail: misha2728@yandex.ru

<sup>1</sup>Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar region, Russian Federation;

<sup>2</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper demonstrates that interaction between the threshed material and working elements of a threshing unit leads to changes in its physical and mechanical properties. However, the influence of these changes on the conditions of material

capture and retention has not yet been sufficiently investigated. Effective threshing requires reliable capture and stable retention of the material. In maize ear threshing, the efficiency of this process is largely determined by the relationship between the main parameters of combine harvester, its productivity, and power demand, taking into account the physical and mechanical properties of the material. (*Research purpose*) To establish the relationship between the movement speed of threshing products and the power characteristics of combine harvester during maize grain harvesting. (*Materials and methods*) In practice, the optimal range of the maximum maize capture angle is established experimentally and depends on ear moisture content and the rotational speed of the working elements. The study examines factors influencing the efficiency of maize grain threshing in the threshing-and-separating unit of a grain combine harvester. Statistical meta-analysis methods were applied to quantitatively integrate the results of scientific studies employing similar methodologies, with the aim of establishing the dependence of threshing quality on crop condition and threshing drum settings. (*Results and discussion*) The gripping ability of the threshing drum increases with a higher coefficient of friction between the ear and the rasp bar surface and with a lower coefficient of friction between the ear and the concave. It is also established that the moisture content of the material influences the threshing drum speed during operation. The study establishes the dependence of threshing quality on the parameters of the threshing clearances at the inlet and outlet of the concave. It also determines the required power by taking into account the performance of all processes and operations involved in maize grain threshing. (*Conclusions*) The analysis revealed a dependence between the movement speed of threshing products along the rasp-bar drum of a maize combine harvester and its power characteristics.

**Keywords:** productivity, threshing unit, rasp-bar drum, maize, self-propelled combine harvester.

■ **For citation:** Pogosyan V.M., Sokolenko O.N., Chaplygin M.E. Threshing unit with a rasp-bar drum for maize grain harvesting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 45-51 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-45-51. EDN: FVHBMG.

Совершенствование производственных операций возделывания и уборки кукурузы на зерно осуществляется в разных направлениях: селекции сортов, семеноводстве и разработке технологий. Эти направления отражены в Федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы. Важное значение имеет вариант сбора урожая кукурузы: на зерно, початки или листостебельную массу. Для уборки на зерно оптимальным считается период, когда содержание сухого вещества в зерне достигает 60-70% (фаза восковой спелости). Визуально этот срок можно определить по появлению черного слоя в месте крепления зерен к стержню початка.

Кукурузу на зерно убирают зерноуборочными комбайнами, оборудованными адаптерами с делителями и отрывающими пластинами для аккуратного отделения початков от стеблей, или кормоуборочными комбайнами со специализированными адаптерами. Во втором случае машины выполняют за один проход скашивание, измельчение и загрузку массы в транспортные средства [1].

Процесс обмолота кукурузы, при котором зерна отделяются от початков, исследовали на молотильном устройстве самоходного комбайна типа *Nova S 340* с бильным барабаном. Конструктивные параметры барабана, такие как длина, количество бичей, угол обхвата, являются постоянными [2].

Основываясь на данных эксперимента, рассматривалась взаимосвязь изменяемых факторов, определяющих процесс обмолота. К ним относятся: окружная скорость молотильного барабана, размер зазоров между барабаном и подбарабаньем, сорт и

состояние обрабатываемой культуры (влажность, сопротивление разрыву) и др. [3]. От этих параметров будут зависеть требуемые мощностные характеристики уборочного комбайна [4, 5].

При обмолоте кукурузы различных сортов и влажности окружная скорость барабана, которая обеспечивает минимальные недомолот и дробление зерна, отличается при подаче только одних початков или початков вместе со стеблевой массой. Согласно исследованиям в случае обмолота только початков окружная скорость барабана несколько ниже, чем целого растения и колеблется от 10 до 14 м/с [6, 7].

**Цель исследования:** выявить зависимость скорости перемещения продуктов обмолота от мощностных характеристик комбайна при уборке кукурузы на зерно.

**Материалы и методы.** Исследовали факторы, влияющие на эффективность процесса обмолота кукурузы на зерно молотильно-сепарирующим аппаратом зерноуборочного комбайна [8]. Использовали статистические методы метаанализа, позволяющие количественно объединить результаты научных исследований со схожей методологией, с целью установления зависимости качества обмолота от состояния культур и от настроек молотильного барабана. Учитывая экспериментальные данные, выявлена необходимая мощностная характеристика комбайна, а также определена зависимость качества обмолота от состояния кукурузы и настроек уборочной машины [9].

**Результаты и обсуждение.** При обмолоте всего растения кукурузы оптимальная окружная скорость барабана колеблется от 12 до 16 м/с. На основании исследований В.С. Курасова [2] за среднее значение

можно принять окружную скорость при обмолоте только початков 12-13 м/с (415-450 об/мин), а при обмолоте всего растения – 14-15 м/с (485-520 об/мин).

*Выбор величины зазоров.* Изменение зазоров между барабаном и подбарабаньем служит основным способом регулирования работы молотильного устройства в зависимости от свойств и состояния материала и широко используется на практике. В наших опытах лучшие по качеству показатели работы бильного барабана получены при обмолоте початков при зазоре на выходе 15-17 и 17-19 мм при обмолоте всего растения [10, 11].

Зазор на входе должен быть приблизительно в 2 раза больше, чем на выходе. При таком соотношении давление обмолачиваемого материала на подбарабанье по всему углу обхвата одинаковое [12]. При ином соотношении точка приложения равнодействующей всех давлений на подбарабанье располагается не в середине угла обхвата материала, а ближе к входу (при меньшем отношении) или к выходу (при большем отношении).

В качестве оптимальных могут быть приняты зазоры при обмолоте початков 35/17, а всего растения – 40/19 (в числителе величина зазора на входе, в знаменателе – на выходе, мм).

*Расчет необходимой мощности.* В уравнении молотильного барабана, предложенном В.П. Горячкиным и впоследствии применяемом другими исследователями (Гинько Г.М. К развитию теории барабана академика Горячкина В.П. Доклады ВАСХНИЛ им. В.И. Ленина. 1958. Вып. 6. С. 43-48. Теоретические и экспериментальные исследования молотильного аппарата комбайна «Коммунар»), общее окружное усилие определяется по формуле:

$$P = P' + P'' = m'v + fP, \quad \text{Н}, \quad (1)$$

где  $P'$  – усилие, необходимое на преодоление инерционных сил обмолачиваемой зерносоломистой массы,  $P' = m'v$ , Н;  $P''$  – усилие, направленное на преодоление сопротивления подбарабанья,  $P'' = fP$ , Н.

Сопротивление деки для упрощения считается пропорциональным всему окружному усилию барабана  $P$  с коэффициентом пропорциональности  $f$ , который называется коэффициентом перетирания.

Мощность, требуемая на работу молотильного бильного барабана:

$$75N \frac{mrv^2}{l-f}, \quad \text{кВт}. \quad (2)$$

В трудах М.А. Пустыгина и работе [13] подчеркивается важность более детального анализа процесса обмолота с разделением его на два основных компонента: удар, который передает скорость продуктам обмолота, и сопротивление подбарабанья. Это позволяет лучше понять и изучить каждый компонент отдельно и найти более эффективные методы оптимизации процесса обмолота. Такой подход может способствовать выявлению законо-

мерностей и факторов, влияющих на результат обмолота, а также разработке новых технологий и оборудования с лучшей производительностью.

В нашем случае, т.е. при рассмотрении процесса обмолота бильным барабаном всего растения кукурузы, полную требуемую мощность можно представить как сумму:

$$N = N_{xx} + N_{деф} + N_{отб}, \quad \text{кВт}, \quad (3)$$

где  $N_{xx}$  – мощность неработающего агрегата, кВт;  $N_{деф}$  – мощность на обмолот, на разрушение стеблевой массы и стержней початков и на перемещение продуктов обмолота, кВт;  $N_{отб}$  – мощность на отбрасывание продуктов обмолота, кВт.

Рассмотрим отдельно каждую составляющую.

Мощность неработающего агрегата  $N_{xx}$  постоянная при неизменном числе оборотов.

Мощность на обработку массы и перемещение продуктов обмолота:

$$N_{деф} = N_o + N_{ст} + N_c + N_t, \quad (4)$$

где  $N_o$  – мощность, требуемая на обмолот (отделение зерен от стержней), кВт;  $N_{ст}$  – мощность на разрушение стеблевой массы, кВт;  $N_c$  – мощность на преодоление сил трения при перемещении продуктов обмолота, кВт.

$$N_{деф} = \varphi Q v_m \frac{1}{75}, \quad \text{кВт}, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – коэффициент перетирания, учитывающий общее сопротивление подбарабанья;  $Q$  – общее радиальное усилие, Н;  $v_m$  – средняя скорость перемещения массы продуктов обмолота, м/с.

Мощность на обмолот [14] прямо пропорциональна ударной работе молотильного устройства и количеству зерен, прошедших через молотильное устройство в одну секунду:

$$N_o = \frac{A_o q_3}{75}, \quad \text{кВт}, \quad (6)$$

где  $A_o$  – удельная работа обмолота, Дж/кг;  $q_3$  – подача зерна, кг/с.

Мощность на разрушение стеблей зависит от их прочности и количества разрывов:

$$N_{ст} = \frac{A_{ст}(\mu - 1)n_{ст}}{75}, \quad \text{кВт}, \quad (7)$$

где  $A_{ст}$  – работа одинарного разрыва стеблей, Дж;  $(\mu - 1)$  – число разрывов в среднем на один стебель;  $\mu$  – степень перебивания стеблей;  $n_{ст}$  – количество стеблей, проходящих через молотильное устройство в одну секунду.

Мощность, необходимая для разрушения стержней початков, определяется аналогично случаю разрушения стеблей:

$$N_c = \frac{A_c(\mu_1 - 1)n_c}{75}, \quad \text{кВт}, \quad (8)$$

где  $A_c$  – работа для одинарного разрыва стержня, Дж;  $(\mu_1 - 1)$  – число разрывов в среднем на один стержень.

жень;  $\mu_1$  – степень перебивания стержней;  $n_c$  – количество стержней, проходящих через молотильное устройство в одну секунду.

Мощность на преодоление сил трения [15] при перемещении продуктов обмолота  $N_T$  определяется из уравнения (6):

$$N_T = N_{\text{деф}} - (N_o + N_{\text{ст}} + N_c), \text{ кВт.}$$

С другой стороны,

$$N_T = \frac{f_{\text{тр}} Q v_m}{75}, \text{ кВт,} \quad (9)$$

где  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения массы кукурузы по стали.

Мощность на удар и отбрасывание продуктов обмолота

$$N_{\text{отб}} = \frac{m v_{\text{вых}}^2}{75}, \text{ кВт.} \quad (10)$$

где  $m$  – масса, отбрасываемая барабаном в одну секунду, кг/с;  $v_{\text{вых}}$  – средняя скорость массы на выходе из барабана, м/с.

Полная мощность на работу молотильного барабана:

$$75N = 75N_{\text{хх}} + A_o q_3 + A_{\text{ст}}(\mu - 1)n_{\text{ст}} + A_c(\mu - 1)n_c + f_{\text{тр}} Q v_m + m v_{\text{вых}}^2, \quad (11)$$

**Определение действительного коэффициента перетирания.** Перетирание представляет собой комплекс отдельных самостоятельных процессов, наиболее важные из них:

- крушение початков;
- отделение стеблей и стержней;
- отбрасывание продуктов обмолота.

Рассматривая перетирание как единый процесс и используя экспериментальные данные, можно определить действительный (средний) коэффициент перетирания, учитывая общее сопротивление подбарабана [15, 16].

Согласно закону Кулона сила трения равна произведению нормального давления на коэффициент трения, и если пренебречь влиянием скорости удельного давления, то:

$$T = f_{\text{тр}} Q. \quad (12)$$

Величину общего сопротивления  $T$  и нормального давления  $Q$  определяем по равнодействующей  $R$ . Величину и направление равнодействующей  $R$  определяем по данным осциллографирования как геометрическую сумму сил  $T'$  и  $Q'$  (рисунок).

Общее сопротивление:

$$T = R \cdot \sin(\alpha \pm \beta), \text{ Н.} \quad (13)$$

Нормальное давление:

$$Q = R \cdot \cos(\alpha \pm \beta), \text{ Н.} \quad (14)$$

Коэффициент перетирания:

$$f = T/Q = \text{tg}(\alpha \pm \beta), \quad (15)$$

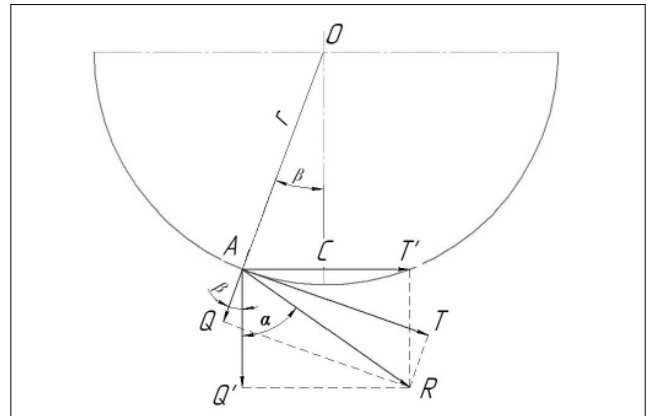


Рис. Действие сил при перетирании  
Fig. Forces acting during grinding

где  $\varphi$  – угол между направлением действия равнодействующей  $R$  и вертикалью.

Угол  $\beta$  определяем из треугольника  $AOC$ :

$$\sin \beta = AC/AO = l/r,$$

где  $l$  – отклонение точки приложения равнодействующей  $R$  от середины подбарабана, мм;  $r$  – радиус барабана, мм.

Величина  $l$  определяется графически с использованием данных осциллографирования и ее предварительного вычисления [10]:

$$L_1 = \frac{P_2 \cdot L}{P_1 + P_2}; \quad (16)$$

$$\text{tg} \alpha = \frac{R_3}{P_1 + P_2}, \quad (17)$$

где  $P_1, P_2, P_3$  – составляющие давления на подбарабанье, замеренные с помощью осциллографа, кПа.

**Определение средней скорости перемещения продуктов обмолота.** Скорость перемещения продуктов обмолота в подбарабанье  $v_m$  представляет собой один из основных параметров, определяющих производительность молотилки. Она оказывает влияние также на качество обмолота и на энергетику.

Вопрос о скорости хлебной массы при обмолоте колосовых впервые поставил академик В.П. Горячкин в предлагаемой «теории барабана» (Гинько Г.М. К развитию теории барабана академика Горячкина В.П. Докл. ВАСХНИЛ, 1958. Вып. 6. С. 43-48. Теоретические и экспериментальные исследования молотильного аппарата комбайна «Коммунар»). Условно принимая эту скорость равной окружной скорости барабана  $v_6$ , получим:

$$v_{\text{хл}} = v_6. \quad (18)$$

Академик И.Ф. Василенко [7] в своей формуле расчета производительности молотильного аппарата предполагает, что скорость зерна и соломы, вылетающих из-под барабана, составляет примерно половину скорости вращения барабана по окружности:

$$v_{\text{хл}} = v_6 / 2. \quad (19)$$

М.А. Пустыгин и другие исследователи [13] утверждают, что скорость движения хлебной массы при входе в подбарабанье стабилизируется за счет соотношения величины зазоров и параметров производительности. Затем по мере продвижения к выходу скорость массы плавно увеличивается. При этом принимается, что скорость массы на выходе из подбарабанья в 4 раза больше, чем на входе:

$$v_{\text{вых}} = 4v_{\text{вх}}. \quad (20)$$

Средняя скорость продвижения хлебной массы [7] в подбарабанье значительно ниже скорости питающего (наклонного) транспортера (2,8-3,0 м/с). Наибольшее влияние на скорость в подбарабанье оказывает величина порции, определяющая степень сжатия стеблей.

Нами по результатам ряда исследований предлагается определять среднюю скорость перемещения продуктов обмолота исходя из уравнения баланса мощности, расходуемой на обмолот кукурузы:

$$N - N_{\text{хх}} = \frac{f_{\text{тр}} Q v_{\text{м}}}{75} + \frac{m v_{\text{вых}}^2}{75}. \quad (21)$$

Тогда, пользуясь методом М.А. Пустыгина [13], соотношение скоростей на входе и на выходе принимаем обратно пропорциональным зазорам в барабане:

$$\frac{v_{\text{вых}}}{v_{\text{вх}}} = \frac{\delta_{\text{вых}}}{\delta_{\text{вх}}} = 2. \quad (22)$$

Средняя скорость перемещения продуктов обмолота

$$v_{\text{м}} = \frac{v_{\text{вх}} + v_{\text{вых}}}{2} = 0,75 v_{\text{вых}}. \quad (23)$$

Заменяя  $v_{\text{вых}}$  в уравнении (23) его значением из уравнения (25), после преобразования получим:

$$N - N_{\text{хх}} = 0,013 f Q v_{\text{м}} + 0,024 m v_{\text{ц}}^2. \quad (24)$$

Величина мощности (левая часть уравнения) определяется по осциллограмме. Решив это квадратное уравнение, находим величину средней скорости перемещения продуктов обмолота:

$$v_{\text{м}} = \frac{-0,013 f_{\text{тр}} Q \pm \sqrt{0,0017 f_{\text{тр}}^2 Q^2 - 0,096 m (N - N_{\text{хх}})}}{0,048 m}. \quad (25)$$

**Выводы.** Процесс обмолота исследован на молотильном устройстве самоходного комбайна типа *Nova S 340* с бильным барабаном. Опытным путем показано, что наиболее высокие качественные показатели работы барабана бильного типа получены при обмолоте только одних початков при зазоре на выходе 15-17 мм, а при обмолоте всего растения зазор на выходе составляет 17-19 мм.

При изучении зависимости скорости перемещения продуктов обмолота от мощностных характеристик комбайна важно разделять процесс обмолота на удар, который передает скорость продуктам обмолота, и на сопротивление подбарабанья.

Полную мощность на работу барабана можно представить как сумму мощностей на обмолот (отделение зерен от стержней), на разрушение стебельной массы и на преодоление сил трения при перемещении продуктов обмолота.

Проведенный анализ позволил выявить зависимость скорости перемещения продуктов обмолота от мощности комбайна для уборки кукурузы на зерно, оснащенного молотильным бильным барабаном.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чаплыгин М.Е., Давыдова С.А. Техничко-технологическое оснащение возделывания сои и кукурузы в двухпольном севообороте // *Техническое обеспечение сельского хозяйства*. 2019. N1(1). С. 209-214. EDN: WWEEZI.
2. Хажметова З.Л., Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Аушев М.Х. Моделирование процесса обмолота початков кукурузы // *Техника и оборудование для села*. 2020. N5(275). С. 23-26. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-5-23-26.
3. Жалнин Э.В., Ценч Ю.С., Пьянов В.С. Методика анализа технического уровня зерноуборочных комбайнов по функциональным и конструктивным параметрам // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N2. С. 4-8. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-2-4-8.
4. Матущенко А.Е., Кантемиров Н.Д. Влияние некоторых параметров механизма стеблеподачи кукурузоуборочного комбайна на потери урожая // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2023. N1(99). С. 115-119. EDN: ZXZZZY.
5. Погосян В.М., Мечкало А.Л., Полуэктов А.А. К вопросу зависимости прочности зерна кукурузы от его влажности // *Тракторы и сельхозмашины*. 2023. Т. 90. N1. С. 59-66. DOI: 10.17816/0321-4443-111809.
6. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н. Молотильно-сепарирующее устройство для первичного семеноводства кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 34-39. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-34-39.
7. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н. Методика инженерного расчета комплекта технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2021. N4(32). С. 61-72. EDN: IQRXXT.
8. Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Шогенов Ю.Х. и др. Конкурентоспособный комплекс техники и технологии для производства зерна и кормов // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019. Т. 20. N3. С. 299-308. DOI:

- 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
9. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Марченко О.С., Ценч Ю.С. Создание инновационной техники и ресурсосберегающих технологий производства кормов – основа развития животноводства // *Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина*. 2017. N6(82). С. 23-28. DOI: 10.26897/1728-7936-2017-6-23-28.
  10. Панфилов А.Э., Шепелев С.Д., Черняев Д.А. Обоснование технической оснащенности уборки кукурузы на силос и корнаж // *АПК России*. 2025. Т. 32. N1. С. 82-87. DOI: 10.55934/2587-8824-2025-32-1-82-87.
  11. Черняев Д.А. Адаптер для уборки кукурузы на корнаж // *Сельский механизатор*. 2025. N3. С. 24-25. DOI: 10.47336/0131-7393-2025-3-24-25.
  12. Шуляков А.Г., Юдина Е.М., Ринас Н.А., Палапин М.А. Анализ процесса работы и конструкций молотилок зерноуборочных комбайнов // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022. N2(94). С. 87-93. DOI: 10.37670/2073-0853-2022-94-2-87-92.
  13. Жалнин Э.В., Чаплыгин М.Е. Динамика фракционного состава зерносоломистой массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32. N2. С. 249-262. DOI: 10.15507/2658-4123.032.202202.249-262.
  14. Алдошин Н.В., Золотов А.А., Цыгуткин А.С. и др. Обоснование технологических параметров комбайнов на уборке белого люпина // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. Т. 29. N1. С. 64-66. EDN: UYLIWJ.
  15. Погосян В.М., Чаплыгин М.Е. Исследование динамических характеристик планетарного початкоотделяющего аппарата // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N3. С. 41-47. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-41-47.
  16. Бойков В.М., Старцев С.В., Павлов А.В. и др. Комплекс машин для механической обработки пожнивных остатков кукурузы // *Аграрный научный журнал*. 2021. N11. С. 84-86. DOI: 10.28983/asj.y2021i11pp84-86.

#### REFERENCES

1. Chaplygin M., Davydova S. Technical and technological equipment of soya and maize cultivation in two fields crop rotation. *Technical Support for Agriculture*. 2019. N1(1). 209-214 (In Russian). EDN: WWEEZI.
2. Khazhmetova Z.L., Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Aushev M.Kh. Modeling a corn ear threshing process. *Machinery and Equipment for Rural Areas*. 2020. N5. 23-26 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2020-5-23-26.
3. Zhalnin E.V., Tsench Yu.S., P'yanov V.S. Analysis method of combine harvesters technical level by functional and structural parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N2. 4-8 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-2-4-8.
4. Matushchenko A.E., Kantemirov N.D. Influence of some parameters of the feeder stalk of a corn harvester on crop losses. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023. N1 (99). 115-119 (In Russian). EDN: ZXZZZY.
5. Poghosyan V.M., Mechkalo A.L., Poluektov A.A. Dependence of corn kernel strength on moisture. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023. Vol. 90. N1. 59-66 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-111809.
6. Pastukhov A.G., Bakharev D.N. Maize threshing and separating device for primary seed production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N1. 34-39 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-34-39.
7. Pastukhov A.G., Baharev D.N. Procedure for engineering calculation of a set of technical tools for step-by-step threshing of cobs seed corn. *Innovations in the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects*. 2021. N4(32). 61-72 (In Russian). EDN: IQRXXT.
8. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Shogenov Yu.Kh. et al. Competitive complex of machinery and technologies for the production of grain and feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019. Vol. 20. N3. 299-308 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
9. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Marchenko O.S., Tsench Yu.S. Development of innovative machinery and resource-saving technologies of feed production as the basis of livestock breeding development. *Vestnik MSAU after V.P. Goryachkin*. 2017. N6(82). 23-28 (In Russian). DOI: 10.26897/1728-7936-2017-6-23-28.
10. Panfilov A.E., Shepelev S.D., Chernyaev D.A. Justification of the technical equipment of corn harvesting for silage and cornage. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2025. Vol. 32. N1. 82-87 (In Russian). DOI: 10.55934/2587-8824-2025-32-1-82-87.
11. Chernyaev D.A. Cornage corn harvesting adapter. *Selskiy Mechanizator*. 2025. N3. 24-25 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2025-3-24-25.
12. Shulyakov A.G., Yudina E.M., Rinas N.A., Palapin M.A. Analysis of the work process and designs of threshers of combine harvesters. *Izvestiya of the Orenburg State Agrarian University*. 2022. N2(94). 87-93 (In Russian). DOI: 10.37670/2073-0853-2022-94-2-87-92.
13. Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Dynamics of fractional composition of grain-and-straw mass being threshed in the threshing mechanism of a combine harvester. *Engineering Technologies and Systems*. 2022. Vol. 32. N2. 249-262 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.032.202202.249-262.
14. Aldoshin N.V., Zolotov A.A., Tsygutkin A.S. et al. Substantiation of technological parameters of harvesters for white lupine. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015. Vol. 29. N1. 64-66 (In Russian). EDN: UYLIWJ.
15. Pogosyan V.M., Chaplygin M.E. Research into the dynamic characteristics of the planetary cobseparating device. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15.

N3. 41-47 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-41-47.  
16. Boykov V.M., Startsev S.V., Pavlov A.V. et al. Complex

of machines for mechanical processing of corn residues. *Agrarian Scientific Journal*. 2021. N11. 84-86 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2021i11pp84-86.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

#### **Заявленный вклад соавторов:**

Погосян В.М. – научное руководство, разработка теоретических предпосылок, вывод формул, доработка текста, формирование общих выводов;  
Соколенко О.Н. – редактирование рукописи статьи и литературный анализ;  
Чаплыгин М.Е. – формулирование целей и задач исследования, корректировка формул, итоговая доработка статьи, формирование выводов, анализ литературных источников.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Coauthors' contribution:**

Pogosyan V.M. – scientific supervision, development of the theoretical framework, derivation of formulas, revision of the manuscript, and formulation of the overall conclusions;  
Sokolenko O.N. – editing of the manuscript and literature review;  
Chaplygin M.E. – formulation of research aims and objectives, correction of formulas, final revision of the manuscript, formulation of conclusions, and analysis of literature sources.  
*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

03.12.2025  
24.02.2026



## Прогнозирование временных рядов технологических параметров оборудования на основе рекуррентных нейронных сетей LSTM

Ильнур Ильдарович Хасанов<sup>1</sup>,

кандидат технических наук, доцент,

e-mail: iikhasanov@fa.ru;

Дмитрий Олегович Хорт<sup>2</sup>,

доктор технических наук, главный научный сотрудник,

e-mail: dmitriyhort@mail.ru;

Никита Васильевич Бережанский<sup>1</sup>,

старший преподаватель,

e-mail: nvberezhanskij@fa.ru

<sup>1</sup>Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** В условиях цифровизации агропромышленного комплекса и роста объемов данных, формируемых при эксплуатации сельскохозяйственных машин и технологического оборудования, возрастает потребность в интеллектуальных методах анализа, способных учитывать нелинейную динамику и адаптироваться к изменяющимся режимам работы оборудования. Особый интерес представляют методы прогнозирования временных рядов технологических параметров, обеспечивающие повышение точности мониторинга и переход к предиктивным стратегиям управления и обслуживания. *(Цель исследования)* Изучение возможностей рекуррентных нейронных сетей типа LSTM для краткосрочного прогнозирования временных рядов технологических параметров сельскохозяйственных машин и оборудования с учетом длительных временных зависимостей и нестационарного характера данных. *(Материалы и методы)* В качестве исходных данных использовались телеметрические временные ряды, полученные в процессе эксплуатации промышленного оборудования. Применен подход к формированию обучающих последовательностей, ориентированный на сохранение временного контекста. Для моделирования использовалась рекуррентная нейронная сеть архитектуры LSTM, обеспечивающая учет долгосрочных зависимостей. Качество прогнозирования оценивалось с использованием показателей MAE, MSE и RMSE. Для сравнения применялись модели ARIMA и полносвязная нейронная сеть. *(Результаты и обсуждение)* Разработанная LSTM-модель продемонстрировала высокую точность прогнозирования, эффективно воспроизводя как стационарные, так и переходные участки временных рядов. В ходе эксперимента получены значения MAE = 0,0094, MSE = 0,00014 и RMSE = 0,0119, превосходящие результаты моделей сравнения. *(Выводы)* Подтверждены эффективность применения LSTM-моделей для анализа и прогнозирования технологических процессов, а также перспективность их использования в системах промышленного мониторинга и предиктивного управления.

**Ключевые слова:** прогнозирование, временные ряды, LSTM, глубокое обучение, промышленная аналитика, интеллектуальные системы, технологические процессы.

**Для цитирования:** Хасанов И.И., Хорт Д.О., Бережанский Н.В. Прогнозирование временных рядов технологических параметров оборудования на основе рекуррентных нейронных сетей LSTM // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 52-58. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-52-58. EDN: YALNVH.

Scientific article

## Forecasting Time Series of Technological Parameters of Equipment Using LSTM Recurrent Neural Networks

Ильнур И. Хасанов<sup>1</sup>,

Ph.D.(Eng.), associate professor,

e-mail: iikhasanov@fa.ru;

Дмитрий О. Хорт<sup>2</sup>,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,

e-mail: dmitriyhort@mail.ru;

Никита В. Бережанский<sup>1</sup>,

senior lecturer,

e-mail: nvberezhanskij@fa.ru

<sup>1</sup>Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The digitalization of the agro-industrial sector and the growing volume of data generated by agricultural machinery and technological equipment create a demand for intelligent analytical methods capable of capturing nonlinear dynamics and adapting to changing operating modes. Time-series forecasting methods for technological parameters are of particular interest, as they can improve monitoring accuracy and enable the transition to predictive control and maintenance strategies. (*Research purpose*) The study aims to assess the potential of Long Short-Term Memory (LSTM) recurrent neural networks for short-term forecasting time series of technological parameters in agricultural machinery and equipment, taking into account long-term temporal dependencies and the non-stationary nature of the data. (*Materials and methods*) The study used telemetric time series obtained during the operation of industrial equipment as the initial data. Training sequences were developed to preserve the temporal context of the observations. Modelling was performed using a recurrent neural network based on the LSTM architecture, which allows long-term dependencies in the data to be captured. Forecasting performance was evaluated using the MAE, MSE, and RMSE metrics. ARIMA models and a fully connected neural network were employed as baseline methods for comparison. (*Results and discussion*) The developed LSTM model demonstrated high forecasting accuracy, effectively reproducing both stationary segments and transition periods of the time series. The experimental results yielded MAE = 0.0094, MSE = 0.00014, and RMSE = 0.0119, indicating that the proposed LSTM model outperformed the benchmark models. (*Conclusions*) The results confirm the effectiveness of LSTM-based models for the analysis and forecasting of technological processes and indicate their strong potential for application in industrial monitoring and predictive control systems.

**Keywords:** forecasting, time series, LSTM, deep learning, industrial analytics, intelligent systems, technological processes.

■ **For citation:** Khasanov I.I., Khort D.O., Berezhansky N.V. Forecasting time series of technological parameters of equipment using LSTM recurrent neural networks. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 52-58 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-52-58. EDN: YALNVH.

Современные предприятия агропромышленного комплекса функционируют в условиях высокой степени автоматизации и цифровизации технологических процессов, в том числе эксплуатации сельскохозяйственных машин, машинно-тракторных агрегатов и технологического оборудования. Огромный массив данных требует качественного и быстрого анализа. Для этих целей существуют технологии, такие как *BigData* и алгоритмы искусственного интеллекта [1]. В результате систематического сбора измерительной информации формируются большие массивы временных рядов, отражающих поведение оборудования и протекание производственных процессов [2]. Анализ таких данных позволяет выявлять закономерности функционирования систем, прогнозировать изменение технологических параметров и обеспечивать переход от реактивных к превентивным стратегиям технического обслуживания [3, 4].

В последние годы значительное развитие получили методы интеллектуального анализа данных, основанные на алгоритмах глубокого обучения. Рекуррентные нейронные сети, в частности архитектуры типа *LSTM* (*Long Short – Term Memory*), продемонстрировали высокую эффективность при прогнозировании сложных, нелинейных и нестационарных временных рядов [5, 6]. Эти модели способны учитывать длительные временные зависимости, что делает их перспективными для решения задач анализа промышленных процессов [7].

Несмотря на достижения в данной области, сохраняется ряд нерешенных вопросов, связанных с выбором оптимальных методов предобработки дан-

ных, определением длины обучающих последовательностей и обеспечением устойчивости моделей к изменениям режимов работы (Воронина В.В., Михеев А.В., Ярушкина Н.Г., Святов К.В. Теория и практика машинного обучения. Ульяновск: УлГТУ. 2017. 290 с.).

**Цель исследования** – разработка и экспериментальная проверка алгоритма прогнозирования временных рядов технологических параметров на основе архитектуры *LSTM*, включающего этапы подготовки данных, обучения модели и анализа ее прогностических свойств на примере реальных производственных данных.

**Материалы и методы.** Интеллектуальные методы анализа данных позволяют решать задачи прогнозирования технологических процессов на основе больших объемов телеметрических данных. В условиях цифровизации производства особое значение приобретает использование моделей глубокого обучения, способных учитывать временные зависимости и нелинейные связи между параметрами. Одним из наиболее результативных подходов является применение рекуррентных нейронных сетей типа *LSTM*, которые сохраняют контекст последовательности и обеспечивают устойчивое обучение даже при больших временных интервалах [8, 9].

В рамках данного исследования сформирована модульная архитектура решения, предназначенная для прогнозирования временных рядов технологических параметров на основе *LSTM*-модели (представлено исследованиями по архитектурам рекуррентных моделей [8], *рис. 1*).

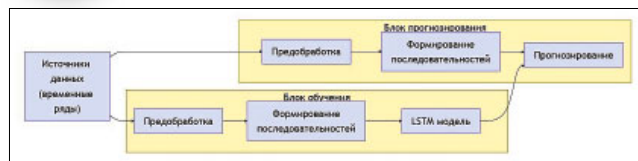


Рис. 1. Архитектура модуля прогнозирования технологических параметров

Fig. 1. Architecture of the technological-parameter forecasting module

Архитектура включает подсистемы импорта и преобработки данных, формирования обучающих последовательностей, обучения и прогнозирования, а также модули визуализации и аналитической оценки качества. Такая организация обеспечивает гибкость и возможность интеграции в промышленные аналитические платформы.

Архитектура модуля прогнозирования технологических параметров построена в виде двух функциональных контуров: контура обучения и контура прогнозирования. Контур обучения включает входной блок подготовки данных, в котором выполняются импорт, контроль качества и предварительная обработка временных рядов, а также блок формирования временных последовательностей и признаков, предназначенных для обучения модели. Центральным компонентом контура обучения является нейросетевая модель на основе архитектуры *LSTM*, обеспечивающая выявление и моделирование временных зависимостей в технологических данных. Результаты обучения и параметры модели сохраняются для последующего использования.

Контур прогнозирования включает входной блок обработки текущих измерений, в котором реализуются те же процедуры предварительной обработки и формирования временных последовательностей, что и в контуре обучения. Сформированные данные поступают в сервис прогнозирования, использующий обученную модель для вычисления прогнозных значений. Выходной блок выполняет последующую обработку результатов и формирование итоговых прогнозов, обеспечивая их передачу и интеграцию в аналитическую среду (Brownlee J. Deep learning for time series forecasting: predict the future with MLPs, CNNs and LSTMs in Python. Machine Learning Mastery. 2018. 42-52).

Математическая постановка задачи основана на анализе последовательности измерений технологического параметра ( $X$ ):

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_T\}, x_T \in R, \quad (1)$$

где  $x_1, \dots, x_T$  – значение параметра в момент времени  $t$ ;  $T$  – общая длина имеющейся последовательности наблюдений;  $R$  – множество действительных чисел.

Для формирования обучающей выборки исходный ряд разбивается на перекрывающиеся подпоследовательности фиксированной длины ( $L$ ). Каждая обучающая последовательность ( $S_i$ ) имеет вид:

$$S_i = \{x_1, x_{i+1}, \dots, x_{i+L-1}\}, y_i = x_{i+L}, \quad (2)$$

где  $y_i$  – целевое значение (выход переменной), соответствующее обучающей последовательности.

Обучающая выборка представляется множеством пар ( $D$ ):

$$D = \{(S_i, y_i)\}_{i=1}^{T-L}.$$

Для моделирования временной структуры данных используется рекуррентная нейронная сеть типа *LSTM*. Каждая *LSTM*-ячейка принимает на вход текущее значение временного ряда  $x_t$ , скрытое состояние предыдущего шага  $h_{t-1}$  и внутреннее состояние памяти  $c_{t-1}$ . Работа *LSTM*-ячейки описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_{if}x_t + b_{if} + W_{hf}h_{(t-1)} + b_{hf}); \\ i_t &= \sigma(W_{ii}x_t + b_{ii} + W_{hi}h_{(t-1)} + b_{hi}); \\ g_t &= \tan h(W_{ig}x_t + b_{ig} + W_{hg}h_{(t-1)} + b_{hg}); \\ c_t &= f_t c_{(t-1)} + i_t g_t; \\ o_t &= \sigma(W_{io} \cdot x_t + b_{io} + W_{ho} \cdot h_{(t-1)} + b_{ho}); \\ h_t &= o_t \cdot \tan h(c_t), \end{aligned}$$

где  $\sigma$  – сигмоидальная функция активации;  $W, U, b$  – параметры модели;  $x_t$  – входное значение в момент времени  $t$  (элемент временного ряда);  $h_{t-1}$  – скрытое состояние *LSTM*-ячейки на предыдущем шаге;  $c_{t-1}$  – состояние ячейки на предыдущем шаге;  $h_t$  – новое скрытое состояние;  $c_t$  – обновленное состояние памяти;  $f_t, i_t, o_t$  – соответственно забывающий, входной и выходной элементы (*gate*);  $g_t$  – вектор обновления состояния ячейки, вычисляемый на основе текущего входа и предыдущего скрытого состояния с применением функции активации.

Для обучения модели используется функция потерь – среднеквадратичная ошибка:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (3)$$

где  $L$  – итоговое значение функции потерь, характеризующее средний уровень ошибки модели;  $N$  – общее количество наблюдений в выборке;  $y_i$  – фактическое (истинное) значение параметра для  $i$ ;  $\hat{y}_i$  – предсказанное (оцененное) значение выходной переменной, полученное моделью для  $i$ -го наблюдения.

Основные параметры используемой *LSTM*-модели приведены в *таблице 1*.

В исследовании использовались данные промышленного программируемого логического контроллера, применяемого для мониторинга вибрационных характеристик узлов сельскохозяйственной машины в режиме реальной эксплуатации (*рис. 2*).

Параметр	Значение	Описание
Длина входной последовательности	50	Количество временных шагов во входе
Размер скрытого слоя	64	Число нейронов в LSTM-ячейке
Функция потерь	MSE	Среднеквадратичная ошибка
Оптимизатор	Adam	Метод адаптивной оптимизации
Количество эпох	30	Циклы обучения
Размер батча	64	Количество примеров за итерацию



Рис. 2. Объект мониторинга вибрационных характеристик узлов системы ирригации агропромышленного предприятия

Fig. 2. Monitored object for assessing the vibration characteristics of irrigation system components at an agro-industrial enterprise

Датасет представляет собой последовательность временных меток, измеренных значений и статусов достоверности записей; фрагмент исходных данных приведен в таблице 2. Учитывая нерегулярную дискретизацию и наличие дублирующихся измерений, данные были предварительно приведены к стандартизированному виду и использованы для формирования обучающих последовательностей, применяемых на этапе обучения модели LSTM [10, 11].

Завершая анализ структуры исходных данных, необходимо отметить, что их формат и динамические особенности определяют необходимость тщательной предобработки, направленной на обеспечение однородности временной шкалы и стабильности входных последовательностей [11]. После выполнения всех процедур подготовки данные становятся пригодными для корректного обучения LSTM-модели и объективной оценки ее прогностических характеристик.

**Результаты и обсуждение.** Результаты вычислительных экспериментов показали, что разработанная модель эффективно воспроизводит динамику технологического параметра и корректно отража-

Дата	Метка времени	Значение	Статус
2025.02.18	00:00:02	0,34	Достоверно
2025.02.18	00:00:02	0,33	Достоверно
2025.02.18	00:00:03	0,35	Достоверно
2025.02.18	00:00:03	0,33	Достоверно
2025.02.18	00:00:05	0,32	Достоверно

ет как стационарные участки временного ряда, так и переходные режимы [12]. На рисунке 3 представлено сравнение обучающих данных, прогнозных значений и фактической траектории параметра.

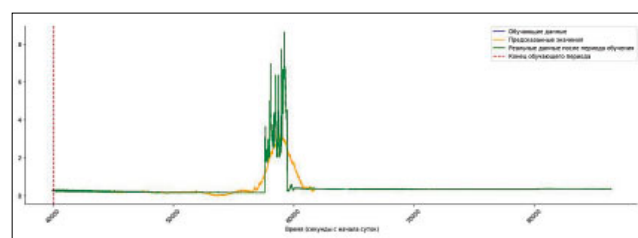


Рис. 3. Сравнение обучающих, прогнозных и фактических значений временного ряда: 1 – обучающие данные; 2 – конец обучающего периода; 3 – предсказанные значения; 4 – реальные данные после периода обучения

Fig. 3. Comparison of the training, predicted, and actual time-series values: 1 – training data; 2 – end of the training period; 3 – predicted values; 4 – actual values after the training period

Количественный анализ демонстрирует высокую точность полученных прогнозов. Для оценки качества прогнозирования использовались следующие метрики (табл. 3):

- MAE (Mean Absolute Error) – метрика, характеризующая среднее абсолютное отклонение прогнозируемых значений от фактических;
- MSE (Mean Squared Error) – метрика, определяющая среднее значение квадратов отклонений прогнозов от истинных значений;
- RMSE (Root Mean Squared Error) – квадратный корень из среднеквадратичной ошибки, отражающий среднюю величину ошибки в исходных единицах измерения.

Для сопоставления были реализованы классическая модель ARIMA и полносвязная нейронная сеть (Dense NN). Таким образом, использование рекуррентной архитектуры LSTM позволило снизить среднеквадратичную ошибку прогноза в среднем на 34-40%, обеспечив устойчивость модели к шумовым компонентам и изменениям режимов работы системы [13].

Анализ результатов прогнозирования показывает, что модель демонстрирует особенно высокую

СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ COMPARATIVE ACCURACY OF THE FORECASTING MODELS			
Модель	MAE	MSE	RMSE
LSTM	0,0094	0,00014	0,0119
ARIMA	–	–	0,0270
Полносвязная нейронная сеть	–	–	0,0180

точность на участках устойчивой работы технологического процесса [14]. Здесь наблюдения имеют слабую вариативность, что обеспечивает полную согласованность прогнозных значений с фактическими. LSTM-архитектура эффективно запоминает продолжительные временные зависимости, что особенно заметно в фазах медленного изменения параметра.

На переходных участках, характеризующихся быстрыми изменениями амплитуды, качество прогноза несколько снижается. Это связано с тем, что резкие пики редко представлены в обучающих данных и имеют высокую локальную динамику. Тем не менее, модель удовлетворительно воспроизводит общую форму переходных процессов. В частности, она корректно определяет моменты начала роста параметра, относительную высоту пиков и моменты возвращения к стабильному режиму, что подтверждает способность модели захватывать нелинейные структуры временного ряда.

Как видно из *рисунка 3*, в области резкого роста значений временного ряда прогноз модели демонстрирует сглаживание пиковых значений, что проявляется в занижении амплитуды локальных экстремумов по сравнению с фактическими данными. Данное поведение является типичным для LSTM и обусловлено внутренними механизмами рекуррентной фильтрации, уменьшающими чувствительность к шумовым колебаниям.

Несмотря на высокое качество прогнозов, предложенный подход имеет ряд ограничений. Во-первых, модель учитывает только одномерный временной ряд, тогда как реальный технологический процесс может быть многопараметрическим и зависеть от ряда факторов. Во-вторых, прогноз выполняется в условиях фиксированной длины обучающего окна, что потенциально ограничивает способность модели адаптироваться к редким или долгосрочным режимам работы. В-третьих, модель обучена в стационарных условиях и не учитывает возможных структурных сдвигов или деградации оборудования.

С учетом указанных ограничений при разработке программной реализации особое внимание уделено удобству эксплуатации модуля и наглядному представлению результатов прогнозирования (*рис. 4*). Разработанный модуль прогнозирования интегри-

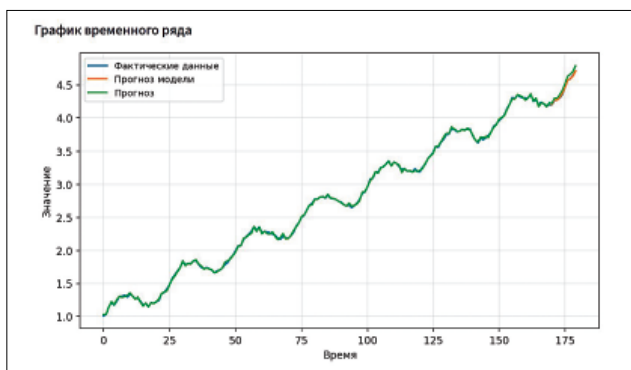


Рис. 4. Интерфейс модуля прогнозирования временных рядов на основе LSTM с окном загрузки данных: 1 – фактические данные; 2 – прогноз; 3 – прогноз модели

Fig. 4. Interface of the LSTM-based time-series forecasting module with the data upload window: 1 – actual data; 2 – forecast values; 3 – model-generated forecast

рован с простым пользовательским интерфейсом, ориентированным на эксплуатационный персонал. Интерфейс включает панели загрузки данных, настройки параметров модели (длина входной последовательности, количество эпох обучения, размер батча) и отображения результатов. Визуальный модуль позволяет сравнивать фактические и прогнозные значения временного ряда, а также выводить значения основных метрик качества (MAE, RMSE). Такая организация обеспечивает возможность использования предложенного решения в составе промышленных аналитических панелей без участия специалистов по машинному обучению.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение модели до многомерных входных данных, применение архитектур с механизмом внимания (Attention) для повышения чувствительности к локальным изменениям, а также использование гибридных моделей, объединяющих LSTM с методами спектрального или вероятностного анализа [13, 15]. Дополнительно представляется перспективным внедрение механизмов онлайн-обучения для адаптации модели к изменяющимся режимам работы и интеграция прогностического модуля в состав интеллектуальных и роботизированных агротехнологических комплексов, выполняющих сбор и обработку данных в режиме реального времени, как показано в работе [16]. Также перспективным направлением является интеграция прогностического модуля в системы цифровых двойников технологических процессов.

**Выводы.** Разработан и экспериментально обоснован метод прогнозирования временных рядов технологических параметров на основе рекуррентных нейронных сетей LSTM. Предложенная архитектура обеспечивает существенно более высокую точность по сравнению с классическими методами, включая ARIMA и полносвязные нейронные се-

ти: снижение значения *RMSE* в среднем на 34-40 подтверждает ее эффективность для моделирования нелинейной и нестационарной динамики технологических процессов.

*LSTM*-модель корректно воспроизводит как стационарные режимы, так и переходные участки, демонстрируя устойчивость к шумовым искажениям данных. Несмотря на тенденцию к сглаживанию локальных экстремумов, модель успешно выявляет ключевые структурные особенности временно-го ряда, что делает ее применимой для задач прогнозирования технического состояния сельскохо-

зяйственной техники в условиях реальной эксплуатации.

Возможность использования разработанного модуля в системах мониторинга и предиктивного обслуживания способствует повышению надежности сельскохозяйственных машин, снижению простоев и реализации энерго- и ресурсосберегающих технологий. Полученные результаты создают основу для дальнейшего развития подхода, включая расширение модели на многомерные данные, применение механизмов внимания и разработку адаптивных схем онлайн-обучения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костомахин М.Н., Пестряков Е.В. Программный комплекс для дистанционного контроля узлов и агрегатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 19-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-19-25.
2. Pashshoev B., Petrusovich D.A. Neural network analysis in time series forecasting. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):106–116. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-4-106-116.
3. Qin S.J. Process data analytics in the era of big data. *AICChE Journal*. 2020. Vol. 66. Iss. 4. e16865. DOI:10.1002/aic.14523.
4. Napoleone A., Macchi M., Pozzetti A. A review on the characteristics of cyber-physical systems for the future smart factories. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. 54. 305-335. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.01.007.
5. Gao Y., Wang R., Zhou E. Stock prediction based on optimized LSTM and GRU models. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2021. 4055281. DOI: 10.1155/2021/4055281.
6. Mathonsi T., van Zyl T. L. A statistics and deep learning hybrid method for multivariate time series forecasting and mortality modeling. *Forecasting*. 2022. Vol. 4. N1. 1-25. DOI: 10.48550/arXiv.2112.08618.
7. Zhang C., Sjarif N.N.A., Ibrahim R. Deep learning models for price forecasting of financial time series: *A review of recent advancements: 2020-2022*. 2023. DOI: 10.1002/widm.1519.
8. Smyl S., Dudek G., Pelka P. ES-dRNN: a hybrid exponential smoothing and dilated recurrent neural network model for short-term load forecasting. *2112.02663 [cs.LG]*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2112.02663.
9. Саввин Н.В. Прогнозирование временных рядов: улучшение LSTM-моделей с помощью векторно-временного кодирования // *Инженерные системы и сооружения*. 2025. N2 (60). С. 148-154. DOI: 10.36622/2074-188X.2025.54.65.015.
10. Zhang G., Ren T., Yang Y. A new unified deep learning approach with decomposition-reconstruction-ensemble framework for time series forecasting. *2002.09695 [stat.ML]*. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2002.09695.
11. Erichson N.B., Lim S.H., Mahoney M.W. Gated recurrent neural networks with weighted time-delay feedback. *2212.00228 [cs.LG]*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.00228.
12. Пашшоев Б.А., Петрусевич Д.А. Анализ нейросетевых моделей для прогнозирования временных рядов. *Russian Technological Journal*. 2024. Т. 12. N4. С. 106-116. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-4-106-116.
13. Nurhaida I., Noprisson H., Ayumi V. et al. Implementation of deep learning predictor (LSTM) algorithm for human mobility prediction. 2020. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. 2020. Vol. 14. N18. 132-144. DOI: 10.3991/ijim.v14i18.16867.
14. Рапаков Г.Г., Горбунов В.А., Дианов С.В., Елизарова Л.В. Исследование LSTM-нейросетевого подхода при моделировании временных рядов // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2023. N3 (114). С. 47-54. DOI: 10.23859/1994-0637-2023-3-114-4.
15. Wang Q., Chen L., Zhao J., Wang W. A deep granular network with adaptive unequal-length granulation strategy for long-term time series forecasting and its industrial applications. *Artificial Intelligence Review*. 2020. Vol. 53. N7. 5353-5381. DOI: 10.1007/s10462-020-09822-9.
16. Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Кутырев А.И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 35-41. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41.

### REFERENCES

1. Kostomakhin M.N., Pestryakov E.V. Software package for remote diagnostics of agricultural machinery condition. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 19-25 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-19-25.
2. Pashshoev B., Petrusovich D.A. Neural network analysis in time series forecasting. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):106–116. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-4-106-116.
3. Qin S.J. Process data analytics in the era of big data. *AICChE Journal*. 2020. Vol. 66. Iss. 4. e16865. DOI:10.1002/aic.14523.

4. Napoleone A., Macchi M., Pozzetti A. A review on the characteristics of cyber-physical systems for future smart factories. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 54. 305-335. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.01.007.
5. Gao Y., Wang R., Zhou E. Stock prediction based on optimized LSTM and GRU models. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2021. 4055281. DOI: 10.1155/2021/4055281.
6. Mathonsi T., van Zyl T.L. A statistics and deep learning hybrid method for multivariate time series forecasting and mortality modeling. *Forecasting*. 2022. Vol. 4. N1. 1-25. DOI: 10.48550/arXiv.2112.08618.
7. Zhang C., Sjarif N.N.A., Ibrahim R. Deep learning models for price forecasting of financial time series: *A review of recent advancements: 2020-2022*. 2023. DOI: 10.1002/widm.1519.
8. Smyl S., Dudek G., Pelka P. ES-dRNN: a hybrid exponential smoothing and dilated recurrent neural network model for short-term load forecasting. *2112.02663 [cs.LG]*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2112.02663.
9. Savvin N.V. Time series forecasting: improving LSTM models using vector-time encoding. *Engineering Systems and Structures*. 2025. N2 (60). 148-154 (In Russian). DOI: 10.36622/2074-188X.2025.54.65.015.
10. Zhang G., Ren T., Yang Y. A new unified deep learning approach with decomposition-reconstruction-ensemble framework for time series forecasting. *2002.09695 [stat.ML]*. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2002.09695.
11. Erichson N.B., Lim S.H., Mahoney M. W. Gated recurrent neural networks with weighted time-delay feedback. *2212.00228 [cs.LG]*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.00228.
12. Pashshoev B.A., Petrushevich D.A. Analysis of neural network models for time series forecasting. *Russian Technological Journal*. 2024. Vol. 12. N4. 106-116. (In Russian). DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-4-106-116.
13. Nurhaida I., Noprisson H., Ayumi V. et al. Implementation of deep learning predictor (LSTM) algorithm for human mobility prediction. 2020. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. 2020. Vol. 14. N18. 132-144. DOI: 10.3991/ijim.v14i18.16867.
14. Rapakov G.G., Gorbunov V.A., Dianov S.V., Elizarova L.V. Study of LSTM neural network approach in time series modeling. *Bulletin of Cherepovets State University*. 2023. N3 (114). 47-54 (In Russian). DOI: 10.23859/1994-0637-2023-3-114-4.
15. Wang Q., Chen L., Zhao J., Wang W. A deep granular network with adaptive unequal-length granulation strategy for long-term time series forecasting and its industrial applications. *Artificial Intelligence Review*. 2020. Vol. 53. N7. 5353-5381. DOI: 10.1007/s10462-020-09822-9.
16. Smirnov I.G., Khort D.O., Kutyrev A.I. Intelligent technologies and robotic machines for garden crops cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 35-41 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

- Хасанов И.И. – разработка математической постановки задачи и алгоритма прогнозирования временных рядов, выбор и обоснование параметров нейросетевой модели, сравнение с классическими методами прогнозирования, формирование выводов;
- Хорт Д.О. – формулирование цели и задач исследования, разработка архитектуры модели прогнозирования на основе LSTM, подготовка и предобработка экспериментальных данных, проведение вычислительных экспериментов, анализ и интерпретация результатов;
- Бережанский Н.В. – научное руководство исследованием, обоснование актуальности и практической значимости работы, постановка проблемы и утверждение текста статьи.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

- Khasanov I.I. – mathematical formulation of the problem, development of the time-series forecasting algorithm, selection and justification of neural network model parameters, comparison with classical forecasting methods; formulation of the conclusions;
- Khort D.O. – formulation of the research purpose and objectives, development of the LSTM-based forecasting model architecture, preparation and preprocessing of experimental data, computational experiments, analysis and interpretation of the results;
- Berezhansky N.V. – scientific supervision, justification of the relevance and practical significance of the study, problem statement, approval of the manuscript.

*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

03.04.2026  
05.05.2026

EDN: QPQSOK

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-59-66



Научная статья

УДК 631.343



## Автоматизированный секционный рабочий орган для борьбы с сорной растительностью в рядах картофеля

**Антон Михайлович Захаров**,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: zamsznii@yandex.ru;

**Алексей Дмитриевич Комоедов**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: komoedov.alexej@yandex.ru

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Реферат.** Характерными для органического производства технологическими процессами и операциями наряду с обработкой посадок биологическими защитными препаратами и локальным внесением органических удобрений следует считать борьбу с сорняками. Доступные на рынке механизированные технические средства для возделывания пропашных культур удаляют сорную растительность в междурядье, при этом в рядах между культурными растениями остается до 15-20% сорняков. (*Цель исследования*) Разработать конструктивно-технологическую схему и алгоритм действия автоматизированного секционного рабочего органа для удаления сорной растительности в рядах картофеля с применением цифровых решений в виде машинного обучения и компьютерного зрения. (*Материалы и методы*) Особенность борьбы с сорняками заключается в необходимости постоянного захода прополочного ножа в гребень и выхода из него. Соответственно прополочный нож должен иметь определенную конструкцию, геометрические параметры и привод. Также необходима система контроля глубины хода ножа, обеспечивающую стабильную работу при переменном контакте с почвой. (*Результаты и обсуждение*) Предложена информационная модель процесса удаления сорной растительности, которая показывает влияние конструктивных, технологических, технических параметров, а также параметров среды на эффективность удаления сорняков, повреждаемость культур и энергоёмкость операций. Сформирована конструктивно-технологическая схема, составлен алгоритм действия автоматизированного секционного рабочего органа. (*Выводы*) Выявлена зависимость усилия, возникающего на боковых кромках прополочного ножа при изменении угла наклона боковых лезвий и глубины хода при заходе в гребень и выхода из него. При оптимальных параметрах прополочного ножа это усилие не должно превышать 38,2 Н. Данная модель процесса позволит правильно оценивать нагрузки на привод прополочного ножа и рационально выбирать параметры его работы.

**Ключевые слова:** органическое сельское хозяйство, борьба с сорной растительностью, рабочий орган, алгоритм работы, картофель.

■ **Для цитирования:** Захаров А.М., Комоедов А.Д. Автоматизированный секционный рабочий орган для борьбы с сорной растительностью в рядах картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 59-66. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-59-66. EDN: .QPQSOK

Scientific article

### Automated Sectional Working Unit for Weed Control in Potato Rows

**Anton M. Zakharov**,  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: zamsznii@yandex.ru;

**Alexey D. Komoedov**,  
junior researcher,  
e-mail: komoedov.alexej@yandex.ru

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Weed control should be regarded as one of the key technological operations in organic crop production, along with the application of biological plant protection agents and the localized placement of organic fertilizers. Mechanized equipment currently available for row-crop cultivation is primarily designed to remove weeds from the inter-row space. However, 15–20 percent of weeds may remain within the crop rows, in the spaces between cultivated plants. (*Research purpose*) The study aimed to develop a structural and technological diagram and an operating algorithm for an automated sectional working unit for in-row weed removal in potato crops, using digital solutions based on machine learning and computer vision. (*Materials and methods*)

A distinctive feature of in-row weed control in potato crops is that the weeding blade must periodically move into and out of the ridge during operation. This imposes specific requirements on the blade design, its geometric parameters, and the drive system. A system for controlling the blade working depth is also required to maintain stable operation under variable soil-contact conditions. (*Results and discussion*) An information model of the weed removal process was proposed. The model describes how design, technological, technical, and environmental parameters affect weed removal efficiency, crop damage, and energy consumption during the operation. A structural and technological diagram was developed, and an operating algorithm for the automated sectional working unit was compiled. (*Conclusions*) The study determined how the force acting on the side cutting edges of the weeding blade depends on the inclination angle of these edges and the working depth during blade entry into and exit from the ridge. Under the optimal blade parameters, this force should not exceed 38.2 newtons. The proposed process model enables accurate estimation of the loads acting on the weeding blade drive and supports the rational selection of its operating parameters.

**Keywords:** organic farming, weed control, working unit, operating algorithm, potato crops

■ **For citation:** Zakharov A.M., Komoedov A.D. Automated sectional working unit for weed control in potato rows. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 59-66 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-59-66. EDN: QPQSOK.

Современное сельское хозяйство требует внедрения автоматизированных, роботизированных и цифровых технологий, которые позволяют повысить основные показатели производства продукции АПК [1, 2]. Использование таких систем должно создать оптимальные и эффективные природоподобные условия для максимальной реализации генетического потенциала растений и обеспечить экологическую безопасность окружающей среды [2, 3]. Производство органической продукции включает применение способов, методов, средств и технологий, обеспечивающих благоприятное состояние окружающей среды, здоровья человека, сохранение и восстановление плодородия почв. В России наблюдается активный рост площадей, занятых под органическое сельское хозяйство, и около 99% российского экспорта органической продукции составляет сырьевая продукция растениеводства [4, 5].

В Институте агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства разработаны методы и обоснованы критерии проектирования технологий органического производства картофеля для условий Северо-Западного региона РФ [6]. Сравнительный анализ интенсивной и органической технологий производства картофеля показал, что характерными именно для органического производства технологическими процессами и операциями, которые невозможно перенести из интенсивного производства по ряду технико-технологических, агрономических и законодательных ограничений, следует считать обработку посадок биологическими защитными препаратами, локальное внесение органических удобрений и борьбу с сорной растительностью [7-9].

На наш взгляд наиболее актуальным является удаление сорняков, в том числе в рядах посадок культурных растений, так как согласно законодательным ограничениям на применения пестицидов

этот процесс должен выполняться механизировано или автоматизировано с применением современных цифровых решений в виде машинного обучения и компьютерного зрения [10, 11].

Доступные на рынке механизированные технические средства для возделывания пропашных культур удаляют сорную растительность в междурядье, но в рядах остается до 15-20% сорняков [12, 13]. Расход влаги и элементов питания, которые теряет культурное растение, приводит к потерям урожая и повышению засоренности почв [14, 15]. Рассмотренные машины и технические средства зарубежного производства предназначены для гладкой поверхности. Кроме этого для посадки, ухода и уборки урожая требуется закупать дорогостоящие машины, которые спроектированы как единая технологическая линия. Представленная на рынке техника разработана под зарубежные стандарты и почвенно-климатические зоны, с учетом характерных видов и корневых систем сорных растений. В совокупности эти обстоятельства затрудняют эффективную эксплуатацию зарубежных машин на территории Российской Федерации [16, 17].

**Цель исследования:** разработать конструктивно-технологическую схему и алгоритм работы автоматизированного секционного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью в рядах картофеля с применением цифровых решений в виде машинного обучения и компьютерного зрения.

Задачи исследований:

- обоснование и разработка конструктивно-технологической схему автоматизированного секционного рабочего органа;
- разработка алгоритма его действия.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Теоретические исследования базировались на применении основных положений законов механики, численных методов решения дифференциальных уравнений и методов математического моделирования. Прикладные за-



дачи решались в среде *Excel* и *Kompas-3D*. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и полевых условиях с использованием современных измерительных средств на основе теории планирования эксперимента.

При удалении сорняков в рядах картофеля прополочный нож должен постоянно заходить в гребень и выходить из него. Исходя из этого, прополочный нож должен иметь соответствующие конструкцию, геометрические параметры и привод. Также для обеспечения стабильной работы при переменном контакте с почвой необходима система контроля глубины хода ножа (Дорохов А.С., Загоруйко М.Г., Давыдова С.А. и др. Робототехнические средства в сельском хозяйстве; в кн. Новые механизмы робототехнических и измерительных систем. М.: Техносфера. 2022. С. 9-48), [18]. Для проведения исследований разработана лабораторная установка, которая позволила установить зависимость усилия на прополочном ноже от угла наклона боковых лезвий и глубины хода рабочего органа.

**Результаты и обсуждение.** Предложена информационная модель технологического процесса удаления сорной растительности в рядах картофеля (рис. 1). В информационную модель входят:

- конструктивные параметры – угол наклона боковых лезвий ( $X1$ ), угол атаки прополочного ножа ( $X2$ );
- технологические параметры – глубина хода прополочного ножа ( $A1$ ), скорость движения ( $A2$ ), размер необработанной площади ( $A3$ );
- параметры среды – физико-механические свойства почвы ( $B1$ ), фаза развития сорной растительности ( $B2$ ), стадия вегетации картофеля ( $B3$ );
- параметры эффективности удаления сорной растительности ( $Y1$ ), энергоёмкость процесса ( $Y2$ ), повреждаемость культуры ( $Y3$ ).

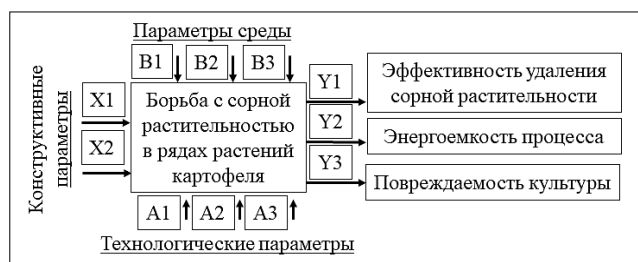


Рис. 1. Информационная модель удаления сорной растительности в рядах картофеля

Fig. 1. Information model for weed removal in potato rows

Анализ факторов, влияющих на процесс удаления сорняков в рядах пропашных культур при органическом производстве, позволил обосновать агротехнические требования к использованию автоматизированного секционного рабочего органа. Его нужно применять в период от появления пол-

ных всходов, что соответствует 12-16 дням вегетации в зависимости от сорта картофеля и погодноклиматических условий, до стадии смыкания ботвы на 45-50 день. Глубина хода прополочного ножа должна быть от 2 до 6 см, так как наиболее эффективно механически удалить сорные растения можно до появления 3-го листа, когда корневая система сорняка слабая и после механического воздействия снижается риск повторного прорастания [19]. Конструктивно-технологическая схема автоматизированного секционного рабочего органа показана на рисунке 2.

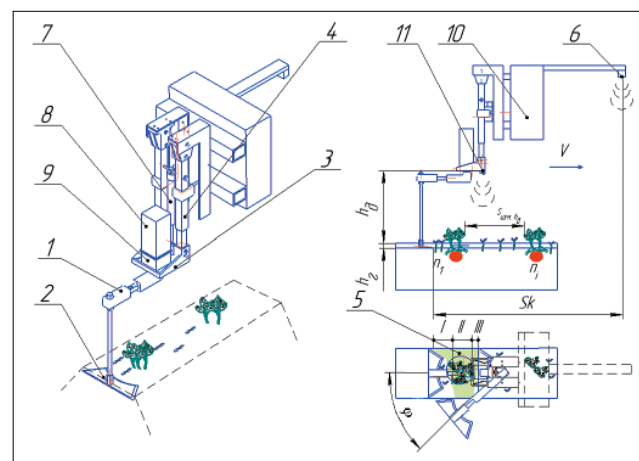


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема автоматизированного секционного рабочего органа

Fig. 2. Structural and technological diagram of the automated sectional working unit

Прополочный нож 2, закрепленный на Г-образной вертикальной поворотной стойке 1, заглублен в почву на глубину  $h_2$ , контролируемую относительно расстояния  $h_1$ , определяемого ультразвуковым датчиком расстояния 11. Зона измерения глубины хода прополочного ножа определяется на основе обработки с использованием нейросети видеоизображения, полученного с камеры машинного зрения 6 при определении кустов растений картофеля для управления прополочным ножом и обхода защитной зоны 5 [20].

Траектория обхода картофеля состоит из трех основных частей:

- I – выход из ряда при приближении к защитной зоне картофеля;
- II – движение вдоль ряда картофеля;
- III – возвращение в ряд.

Расстояние от камеры до прополочного ножа  $Sk$  определяется исходя из инертности системы из-за задержек обработки информации и срабатывания привода ножа [21]. Глубина хода ножа регулируется с помощью линейного актуатора 7, шток которого по направляющим 4 перемещает основание 3 с шаговым двигателем 8, закрепленным через редуктор 9.

В монтажном блоке 10 расположен микрокомпьютер. В программу вводятся требуемые параметры работы устройства: скорость движения трактора, схема посадки обрабатываемых пропашных культур, расстояния между растениями, глубина хода пропашного ножа, исходное положение выходного вала редуктора.

Перед началом работы нож заглубляют на требуемую глубину. Сигнал с блока управления поступает на управление линейным актуатором 7. В процессе работы актуатор поднимает или опускает основание 3 на необходимую величину в зависимости от показаний датчика расстояния 11.

При работе определяют реальную скорость и направление движения трактора. Сигнал с датчика скорости поступает на блок управления и сравнивается с требуемыми параметрами, если их значения выходят за допустимые пределы, подается сигнал водителю. По сигналу с блока управления двигатель 8 через редуктор 9 выводит пропашный нож из рядка, затем отключается. Водитель останавливает трактор и после устранения сбоя в работе продолжает операции удаления сорняков.

При несоблюдении заданного заглубления пропашного ножа датчик расстояния до верхней полки гребня 11 подает сигнал на блок управления, расположенный в монтажном блоке 10. Линейный актуатор срабатывает на изменение величины выдвигания штока, поднимая или опуская нож.

С установленной впереди разрабатываемого устройства камеры машинного зрения изображение передается на блок управления, который определяет расположение растений и формирует сигнал на двигатель 9 для обработки почвы вокруг культурного растения [22].

Составлен алгоритм работы автоматизированного секционного рабочего органа (рис. 3), который включает в себя математическую модель обхода кустов картофеля, работу системы контроля глубины хода пропашного ножа и использование нейронной сети YOLOv5 для обнаружения кустов картофеля (целей) [21].

Начало 1 – старт алгоритма рабочего органа при запуске системы.

Инициализация 2 – проверка систем, соединение с сервером.

Ввод параметров обработки 3 – задание через удаленный интерфейс технологических параметров: глубины обработки, скорости движения.

Решающий блок 4 – проверка соответствия положения вала шагового двигателя начальной позиции. При отклонении от заданного положения через счетчик циклов 5 начинается расчет необходимого количества шагов и направления поворота двигателя. Отправляется команда на драйвер 7 и поворот двигателя на заданный угол 8.

Решающий блок 4 – проверка положения двигателя, если отклонений нет, устройство переходит на начало движения 10.

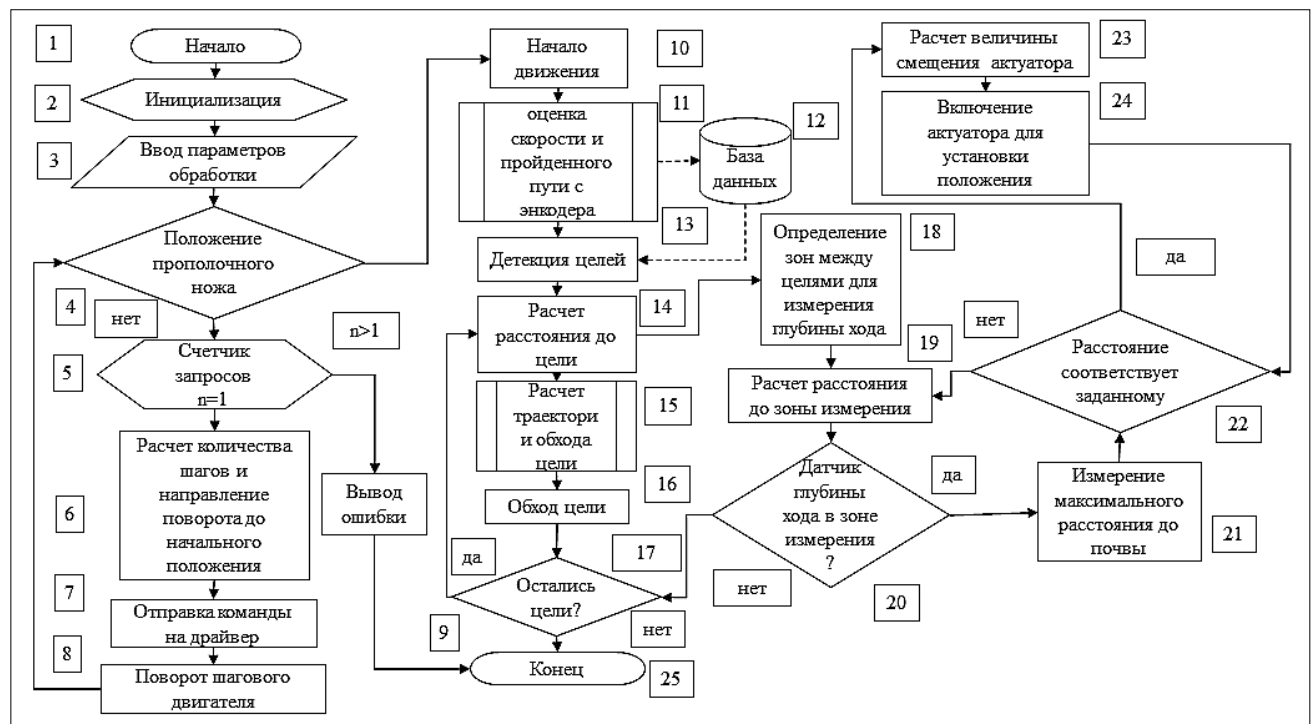


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы автоматизированного секционного рабочего органа  
 Fig. 3. Flowchart of the operating algorithm for the automated sectional working unit

Процесс 11 – измерение количества импульсов с энкодера для записи данных о скорости движения и пройденном пути.

Блок 12 – занесение детекции целей и координат расположения в базу данных 13 с синхронизацией информации от блока 11. Передача с блока 13 данных о скорости движения и пройденном пути на блок 14 для расчета расстояния до цели (кусты картофеля) с учетом размера защитной зоны растений.

Процесс 15 – расчет траектории обхода цели и передача данных в блок 16.

Решающий блок 17 – определение оставшихся целей, расчет через блок 14 расстояния до следующей цели. Если целей больше нет, прополочный нож завершает обработку.

Блок 18 – определение по данным детекции цели зоны для измерения глубины хода параллельно с расчетом обхода растений.

Блок 19 – расчет расстояния до зоны измерения глубины хода.

Решающий блок 20 – определение положения ультразвукового датчика относительно зоны измерения. Если датчик достиг заданного положения, то блок 21 выполняет измерение.

Решающий блок 22 – определение соответствия расстояния до почвы заданному значению. Если отклонений нет, прополочный нож остается в том же положении. При необходимости корректировки выполняется расчет изменения расстояния в блоке 23.

Блок 24 – регулировка положения и переход к блоку 22 для проверки корректности выставленного положения.

Для целей исследования разработана лабораторная установка (рис. 4), которая позволяет определить зависимости эффективности удаления сорной растительности в рядах картофеля от конструктивно-технологических параметров и режимов работы автоматизированного секционного рабочего органа.

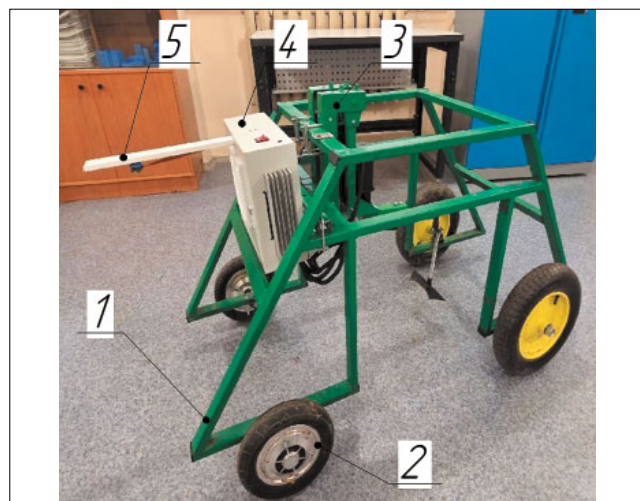


Рис. 4. Лабораторная установка  
Fig. 4. Laboratory setup

Лабораторная установка представляет собой раму 1 с приводными мотор-колесами 2. Управление осуществляется от драйвера в зависимости от установленной скорости. На раме установлен автоматизированный секционный рабочий орган 3. Он состоит из шагового двигателя, который приводит в действие прополочный нож, и актуатора, который регулирует глубину хода ножа при поступлении сигнала от микрокомпьютера, расположенного в монтажном блоке 4. Расстояние определяется с помощью камеры машинного зрения 5.

Во время работы микрокомпьютер фиксирует данные о скорости движения, которые поступают с оптического датчика скорости на заднем колесе установки и тензозвена, установленного на поворотной стойке рабочего органа. Данные о скорости движения и нагрузках, возникающих в точке измерения, синхронизируются с временем работы и записываются.

Использовали двухфакторный трехуровневый центральный композиционный план опыта в трехкратной повторности (таблица).

Таблица		Table		
ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА / EXPERIMENTAL DESIGN				
Фактор	Уровень			Интервал
	-1	0	+1	
Глубина хода лезвия ножа $h$ (X1), см	2	4	6	2
Угол наклона боковых лезвий ножа $\alpha$ (X2), град	45	60	75	15

Экспериментальные исследования автоматизированного секционного рабочего органа позволили определить оптимальные параметры работы про-

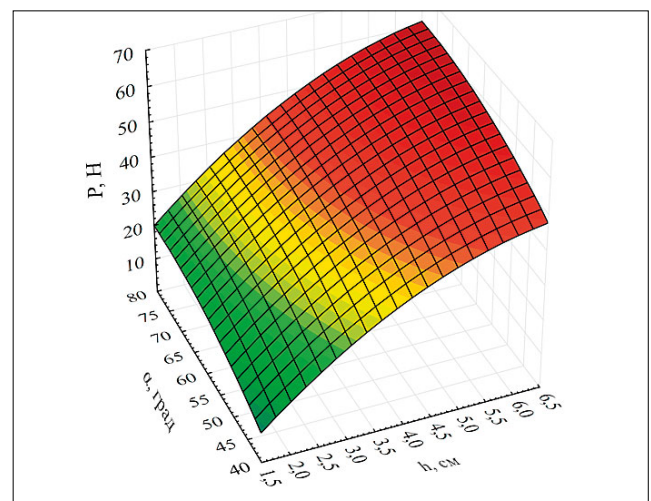


Рис. 5. Зависимость поверхности отклика усилия на прополочном ноже от угла наклона его боковых лезвий и глубины хода

Fig. 5. Response surface of the force acting on the weeding blade as a function of the inclination angle of its side cutting edges and working depth

полочного ножа: глубина хода 3,3 см и угол наклона боковых лезвий 60,3 град, при этом максимальное удаление сорной растительности составил 92,2% [19].

Анализ полученных данных о возникающей нагрузке при изменении факторов позволил установить зависимость усилия, возникающего на боковых кромках прополочного ножа, от угла наклона боковых лезвий ( $\alpha$ ) и глубины хода ( $h$ ).

$$P = -52,3156 + 16,3617h + 1,305\alpha - 1,1342h^2 + 0,0123h\alpha - 0,0087\alpha^2, \text{ Н.}$$

На рисунке 5 показана поверхность отклика усилия на прополочном ноже при изменении угла наклона боковых лезвий и глубины хода.

Статистический анализ данных исследования при глубине хода 4 см и угле наклона 60 градусов показал, что средняя арифметическая и ошибка средней составила  $47,48 \pm 0,58$  Н; стандартное отклонение 3,04 Н; коэффициент вариации 6,41%; относительная ошибка средней 1,23%.

Полученная математическая модель позволила определить, что при оптимальных параметрах прополочного ножа усилие на боковых лезвиях составит 38,2 Н. Данная модель позволяет правильно оце-

нить нагрузки, действующие на привод ножа, и рационально выбрать параметры его работы.

**Выводы.** Разработана информационная модель, которая показывает влияние конструктивных, технологических параметров и параметров среды на эффективность удаления сорняков, повреждаемость культур и энергоёмкость процесса.

Предложена конструктивно-технологическая схема автоматизированного секционного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью в рядах картофеля, обоснован набор датчиков и оборудования, необходимого для изготовления технического средства.

Разработан алгоритм действия рабочего органа с использованием обученной нейросети на собранных в полевых условиях снимках для детекции растений картофеля. Уровень достоверности модели до 93%.

При оптимальных параметрах прополочного ножа усилие на его боковых лезвиях не должно превышать 38,2 Н. Предлагаемая модель позволит правильно оценивать нагрузки, действующие на привод прополочного ножа и рационально выбрать параметры процесса удаления сорняков.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. N15(4). С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
- Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N1(30). С. 191-197. EDN: ZAWQJF.
- Федоренко В.Ф. О трансформации и интеграции в природный ресурсооборот технологических процессов и технических систем обработки почвы при производстве органической продукции // *АгроЭкоИнженерия*. 2024. N3(120). С. 4-19. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-3120-4-19.
- Войтюк В.А., Кондратьева О.В., Слинко О.В. Органическое сельское хозяйство в России: вызовы и возможности // *АгроЭкоИнженерия*. 2024. N3 (120). С. 19-32. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-3120-19-32.
- Слинко О.В., Кондратьева О.В., Войтюк В.А., Полухин А.А. Роль информационного обеспечения в развитии органического сельского хозяйства // *АгроЭкоИнженерия*. 2025. N2 (123). С. 16-27. DOI: 10.24412/2713-2641-2025-2123-16-27.
- Захаров А.М., Устроенов А.А., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д. Методы проектирования технологий органического производства продукции растениеводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. N19(1). С.13-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-13-21.
- Maksimov D.A., Minin V.B., Ustroev A.A. et al. The effect of biologized methods of potato cultivation in organic farming on its yield. IOP Series. 2019. 012088. DOI: 10.1088/1755-1315/341/1/012088.
- Захаров А.М., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д. Обоснование элементов конструкции машины для борьбы с сорной растительностью на основе морфологического анализа // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. N1(114). С. 42-53. DOI: 10.24412/2713-2641-2023-1114-42-53.
- Ахалая Б.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С. и др. Комбинированный агрегат с универсальным рабочим органом для поверхностной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2020. N8(278). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
- Захаров А.М., Перекопский А.Н., Комоедов А.Д. Обоснование роботизированных средств для органического производства картофеля // *Техника и оборудование для села*. 2025. N9 (339). С. 21-26. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-9-21-26.
- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственно-мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
- Quan L., Jiang W., Li H. et al. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a target-ed weeding mode. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 216. 13-31. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.01.019.
- Thakur A., Kumar A., Mishra S.K. Control techniques for

- vision-based autonomous vehicles for agricultural applications: A meta-analytic review. *Artificial Intelligence: Theory and Applications*. 2023. Vol. 843. 1-14. DOI: 10.1007/978-981-99-8476-3\_1.
14. Li Y., Guo Zh., Shuang F. et al. Key technologies of machine vision for weeding robots: A review and benchmark. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 196. 106880. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106880.
  15. Угловский А.С., Семеренко Н.Ю. Автоматизированная система уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного разряда и механизма обратной связи // *АгроЭкоИнженерия*. 2025. N1(122). С. 104-120. DOI: 10.24412/2713-2641-2025-1122-104-119.
  16. Zawada M., Legutko S., Gościańska-Łowińska J. et al. Mechanical weed control systems: methods and effectiveness. *Sustainability*. 2023. 15(21). 15206. DOI: 10.3390/su152115206.
  17. Puneet Saini, D.S Nagesh. Robotic weed removal using deep learning for precision farming. *Advancements and Key Challenges in Green Energy and Computing*. 2024. DOI: 10.1109/AKGEC62572.2024.10869035.
  18. Казакиевич П.П., Комлач Д.И., Юрин А.Н., Воробей А.С. К разработке машин на основе искусственного интеллекта и систем технического зрения // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. N1(114). С. 14-31. DOI: 10.24412/2713-2641-2023-1114-14-31.
  19. Комоедов А.Д. Исследование автоматизированного рабочего органа для борьбы с сорной растительностью // *АгроЭкоИнженерия*. 2025. N3 (124). С. 18-33. DOI: 10.24412/2713-2641-2025-3124-18-32.
  20. Сафонов Д.И., Смирнов И.Г., Кутырёв А.И., Мирзаев М.А. Анализ применения лазерного излучения для контроля сорной растительности // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N2 (55). С. 20-28. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-2-20-28.
  21. Кутырёв А.И., Дышеков А.И. Разработка системы управления движением роботизированной платформы на основе методов лазерной дальнометрии (LiDAR) // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N2. С. 19-27. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-19-27.
  22. Мирзаев М.А., Смирнов И.Г. Система позиционирования рабочих органов при дифференцированном опрыскивании растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N1. С. 96-100. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-96-100.

## REFERENCES

1. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. N15(4). 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
2. Lobachevsky Ya.P., Starovoitov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Digital technologies in cultivation. *Innovations in Agriculture*. 2019. N1(30). 191-197 (In Russian). EDN: ZAWQJF.
3. Fedorenko V.F. On transformation and integration of technological processes and technical systems of soil cultivation into the natural resource cycle in organic production. *AgroEcoEngineering*. 2024. N3 (120). 4-19 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2024-3120-4-19.
4. Voytyuk V.A., Kondratieva O.V., Slinko O.V. Organic agriculture in Russia: challenges and opportunities. *AgroEcoEngineering*. 2024. N3(120). 19-32 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2024-3120-19-32.
5. Slinko O.V., Kondratieva O.V., Voityuk V.A., Polukhin A.A. The role of information support in the development of organic agriculture. *AgroEcoEngineering*. 2025. N2(123). 16-27 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2025-2123-16-27.
6. Zakharov A.M., Zastrav A.A., Murzaev E.A., Komoyedov A.D. Methods for designing technologies of organic crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. N19(1). 13-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-13-21.
7. Maksimov D.A., Minin V.B., Ustrov A.A. et al. The effect of biologized methods of potato cultivation in organic farming on its yield. *IOP Series*. 2019. 012088. DOI: 10.1088/1755-1315/341/1/012088.
8. Zakharov A.M., Murzaev E.A., Komoyedov A.D. Morphological analysis-based justification of structural elements of a weed control machine. *AgroEcoEngineering*. 2023. N1(114). 42-53 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2023-1114-42-53.
9. Akhalaya B.Kh., Starovoitov S.I., Tsench Yu.S. et al. A combined unit fitted with a versatile working body for surface tillage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020. N8(278). 8-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
10. Zakharov A.M., Perekopskiy A.N., Komoyedov A.D. Justification of robotic tools for organic potato production. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025. N9(339). 21-26 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2025-9-21-26.
11. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
12. Quan L., Jiang W., Li H. et al. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode. *Biosystems Engineering*. Vol. 216. 2022. 13-31. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.01.019.
13. Thakur A., Kumar A., Mishra S.K. Control techniques for vision-based autonomous vehicles for agricultural applications: A meta-analytic review. *Artificial Intelligence: Theory and Applications*. 2023. Vol. 843. 1-14. DOI: 10.1007/978-981-99-8476-3\_1.
14. Li Y., Guo Zh., Shuang F. et al. Key technologies of machine vision for weeding robots: A review and benchmark. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 196. 106880. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106880.

15. Uglovskii A.S., Semerenko N.Yu. An automated weed killing system using high voltage discharge and feedback mechanism. *AgroEcoEngineering*. 2025. 1(122). 104-120 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2025-1122-104-119.
16. Zawada M., Legutko S., Gościańska-Łowińska J. et al. Mechanical weed control systems: methods and effectiveness. *Sustainability*. 2023. 15(21). 15206. DOI: 10.3390/su152115206.
17. Puneet Saini, D.S Nagesh. Robotic weed removal using deep learning for precision farming. *Advancements and Key Challenges in Green Energy and Computing*. 2024. DOI: 10.1109/AKGEC62572.2024.10869035.
18. Kazakievich P.P., Komlach D.I., Yuryn A.N., Vorobey A.S. To the development of machines based on artificial intelligence and vision systems. *AgroEcoEngineering*. 2023. N1(114). 14-31 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2023-1114-14-31.
19. Komoyedov A.D. Investigation of an automated working tool for weed control. *AgroEcoEngineering*. 2025. N3(124). 18-33 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2025-3124-18-32.
20. Safonov D.I., Smirnov I.G., Kutyrev A.I., Mirzaev M.A. Analysis of laser radiation application for weed control. *Electrical Technology and Equipment in the Agroindustrial Complex*. 2024. Vol. 71. N2(55). 20-28 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-2-20-28.
21. Kutyrev A.I., Dyshekov A.I. Developing a motion control system for a robotic platform based on laser ranging methods (LiDAR). *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. N2. 19-27 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-19-27.
22. Mirzaev M.A., Smirnov I.G. Positioning system of working bodies in differential spraying of plants. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 96-100 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-96-100.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Заявленный вклад соавторов:

Захаров А.М. – методическое руководство процессом научных исследований, формирование информационной модели и конструктивно-технологической схемы;  
 Комоедов А.Д. – анализ литературных источников, проведение исследований, разработка алгоритма, подготовка текста.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Coauthors' contribution:

Zakharov A.M. — methodological supervision of the research process; development of the information model and the structural and technological diagram;  
 Komoyedov A.D. — literature review; experimental research; development of the operating algorithm; preparation of the manuscript.

*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
 The paper was accepted for publication on

03.04.2026  
 18.05.2026

EDN: YMDREZ

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-67-75



Научная статья

УДК 631.3



## Система управления беспилотных воздушных судов и средства аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий

**Яков Петрович Лобачевский,**  
доктор технических наук, профессор,  
академик Российской академии наук,  
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

**Юлия Сергеевна Ценч,**  
доктор технических наук, главный научный сотрудник,  
член-корреспондент Российской академии наук,  
e-mail: vimas@mail.ru;

**Рашид Курбанович Курбанов,**  
доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: smedia@vim.ru;

**Наталья Ивановна Захарова,**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
e-mail: smedia@vim.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Беспилотные авиационные системы становятся одной из ключевых технологий в реализации цифровой трансформации агропромышленного комплекса, позволяя оперативно получать актуальную информацию о состоянии сельскохозяйственных угодий. *(Цель исследования)* Выполнить ретроспективный анализ для выявления основных тенденций в развитии системы управления полетом беспилотных воздушных судов и средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий. *(Материалы и методы)* Проведен ретроспективный анализ на основе систематического обзора литературы, изучены оригинальные труды отечественных и зарубежных авторов, а также монографии, материалы конференций, музейные экспозиции, фотодокументы и открытый исходный код программного обеспечения. *(Результаты и обсуждение)* Выделено шесть этапов в развитии систем управления полетом беспилотных воздушных судов и средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий. Периодизация основана на изменении типа собираемых фотоматериалов, камер и летательных аппаратов, на которые они устанавливались. Определены основные тенденции развития систем управления полетом беспилотных воздушных судов и средств аэрофотосъемки на каждом этапе, включая тип беспилотных летательных аппаратов, дальность и продолжительность полета, систему управления полетом, средства аэрофотосъемки, тип и количество получаемых изображений, летательный аппарат для их сбора. На основе проведенного анализа определены дальнейшие направления развития беспилотных авиационных систем. *(Выводы)* Процессы разработки систем управления полетом беспилотных воздушных судов и средств аэрофотосъемки происходили параллельно до интеграции камер на борт. Установлено, что ключевую роль в развитии сыграли миниатюризация камер и совершенствование полетных контроллеров, что обеспечило высокую точность данных аэрофотосъемки и оперативность мониторинга сельскохозяйственных угодий. Предположили, что дальнейшее развитие бортовых интеллектуальных систем и средств аэрофотосъемки приведет к полной автоматизации сбора и обработки информации, что позволит осуществлять мониторинг с высокой точностью в реальном времени.

**Ключевые слова:** сельское хозяйство, аэрофотосъемка, аэрофотография, аэрофотоаппарат, дистанционное зондирование, история развития, точное земледелие, беспилотная аэрофотосъемка.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Система управления беспилотных воздушных судов и средства аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 67-75. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-67-75. EDN: YMDREZ.

Scientific article

## Control System and Aerial Imaging Equipment for Unmanned Aircraft Used in Agricultural Land Monitoring

**Yakov P. Lobachevsky,**  
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy  
of Sciences, e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

**Yuliya S. Tsench,**  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, corresponding member  
of the Russian Academy of Sciences,  
e-mail: vimas@mail.ru;

**Rashid K. Kurbanov,**  
Dr.Sc.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: smedia@vim.ru;

**Natalia I. Zakharova,**  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: smedia@vim.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Unmanned aircraft systems are becoming one of the key technologies in the digital transformation of the agro-industrial sector, enabling timely monitoring of agricultural land and the acquisition of up-to-date information on its condition. (*Research purpose*) The study aimed to conduct a retrospective analysis to identify the main trends in the development of UAV flight control systems and aerial imaging equipment for agricultural land monitoring. (*Materials and methods*) A retrospective analysis was carried out based on a systematic literature review. Original works by Russian and foreign authors were examined, along with monographs, conference proceedings, museum exhibits, photographic documents, and open-source software code. (*Results and discussion*) Six stages were identified in the development of UAV flight control systems and aerial imaging equipment used for agricultural land monitoring. The proposed periodization is based on changes in the types of image data collected, the cameras employed, and the aircraft on which they were installed. For each stage, the main trends in the development of UAV flight control systems and aerial imaging equipment were determined, including UAV type, flight range and endurance, flight control system, imaging equipment, type and number of images obtained, and the aircraft used for data collection. Based on the analysis, further directions for the development of unmanned aircraft systems were identified. (*Conclusions*) The development of UAV flight control systems and aerial imaging equipment proceeded in parallel until cameras were integrated directly on board aircraft. The study showed that camera miniaturization and the improvement of flight controllers have played a key role in this development, ensuring high-accuracy aerial imaging data and enabling timely monitoring of agricultural land. Further development of onboard intelligent systems and aerial imaging equipment is expected to lead to the full automation of data collection and processing, thereby enabling high-precision real-time monitoring.

**Keywords:** agriculture, aerial photography, aerial imaging, aerial photograph, aerial camera, remote sensing, history of development, precision agriculture, unmanned aerial photography, unmanned aerial imaging.

■ **For citation:** Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Control system and aerial imaging equipment for unmanned aircraft used in agricultural land monitoring. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 67-75 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-67-75. EDN: YMDREZ.

**В** процессе эволюции сельского хозяйства в течение длительного времени использовались экстенсивные технологии [1, 2]. Им на смену пришли интенсивные, ресурсо- и энергосберегающие, а также сквозные технологии. Качественный скачок в интенсификации агротехнологий произошел в 1970–1980-х годах в результате так называемой «Зеленой революции», ключевыми факторами которой стали новые интенсивные сорта растений, удобрения, химические и биологические средства защиты растений, а также новое поколение сельскохозяйственной техники [3]. Четвертая промышленная революция привела к становлению концепции точного земледелия и цифрового сельского хозяйства, основой которых является масштабный сбор и анализ данных [4, 5].

В настоящее время сельское хозяйство становится высокотехнологичным сектором экономики, требующим применения точных технологий [6, 7]. Достижение стратегических планов и целей развития сельского хозяйства Российской Федерации требует апробации и внедрения новых технологий, техники и оборудования для точного земледелия, к которым относят беспилотные авиационные системы (БАС) [8, 9]. История развития аэрофотосъемки наглядно демонстрирует логику технологического прогресса, показывая, что инновации и открытия прошлого закономерно привели к появлению современных решений на базе беспилотных воздушных судов (БВС) и средств аэрофотосъемки. Анализ этого пути позволяет спрогнозировать, как имен-

но БВС будут развиваться и встраиваться в сельскохозяйственные процессы в будущем.

**Цель исследования:** выполнить ретроспективный анализ для выявления основных тенденций в развитии системы управления полетом БВС и средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Выполнен комплексный обзор литературы с использованием историко-аналитического метода для описания развития системы управления полетом БВС и средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий. Рассмотрены оригинальные труды отечественных и зарубежных исследователей, включая монографии, статьи в научных журналах, материалы конференций, а также экспонаты музейных выставок и материалы, находящиеся в открытом доступе.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** По результатам ретроспективного анализа развития системы управления полетом БВС и средств аэрофотосъемки в сельском хозяйстве, было определено шесть основных периодов развития.

На первом этапе – первых экспериментальных разработок аэрофотоаппаратуры (1858-1908 гг.) аэрофотосъемка была экспериментальной и неэффективной до появления более устойчивых воздушных средств. В это время начинаются разработки портативных камер и их креплений к различным носителям, создаются первые аэрофотоснимки [10, 11]. На этом этапе технологические возможности аэрофотосъемки не позволяли их применять в сельском хозяйстве в связи с непостоянством получаемых данных.

В результате исследования отмечено, что на второй стадии развития – аэрофотосъемке с летательных аппаратов (1909-1945 гг.) произошел стремительный и значительный прогресс, обусловленный сменой военного и мирного времени. Второй этап характеризуется появлением первых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в 1917 г. (рис. 1), система управления полетом которых представляла собой сложный часовой механизм с минимальными возможностями автопилотирования [12].



Рис. 1. «Жук» Кеттеринга, 1917 г. «От научной фантастики к заоблачным высотам: эволюция беспилотных летательных аппаратов» FromSci-FitoSkyHigh: The Evolution of Drones. <https://dacaviation.net/from-sci-fi-to-sky-high-the-evolution-of-drones/>  
Fig. 1. Kettering Bug, 1917. "From Sci-Fi to Sky High: The Evolution of Drones." Available at: <https://dacaviation.net/from-sci-fi-to-sky-high-the-evolution-of-drones/>

Активно развивались системы управления полетом: от управления в пределах прямой видимости до полета с заданными параметрами курса, высоты и значительным увеличением дальности полета до 300 км [12]. Развитие аэрофотоаппаратуры носило скачкообразный характер. Были созданы высокоскоростные пленочные фотоаппараты (рис. 2) и жесткие крепления для их установки на борт самолета. Количество кадров не превышало 200 шт. [10]. На данном этапе аэрофотосъемку в сельском хозяйстве стали применять для картирования сельскохозяйственных полей с помощью самолетов гражданской авиации [13].

Третий этап – становление дистанционного зондирования Земли (1946-1979 гг.) сопровождался изменением конструкции летательных аппаратов, появлением беспилотных вертолетов и началом эры спутникового мониторинга. Система управления полетом позволяла совершать взлет и посадку с го-

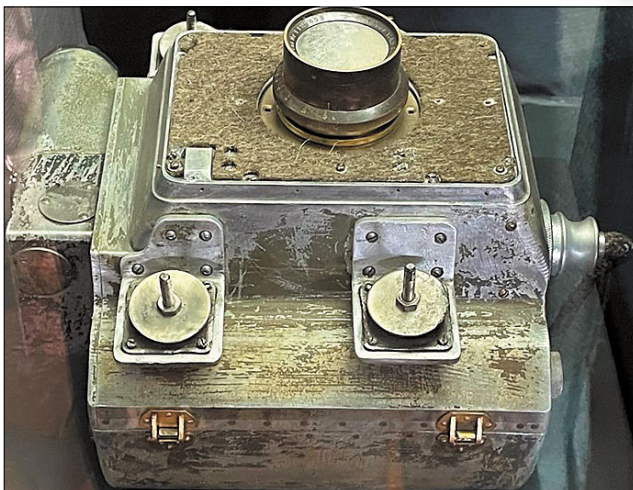


Рис. 2. Авиационная камера АФА-3С. Фото из архива авторов. Экспозиция Музея техники Вадима Задорожного  
Fig. 2. AFA-3S aerial camera. Photograph from the authors' archive. On display at the Technical Museum of Vadim Zadorozhny

ризонтальной поверхности и контролировать полет по радиолокационным приборам с дальностью до 150 км [12]. Отмечена тенденция по увеличению количества кадров на пленке. До середины 1960-х годов их число достигало 630, однако с 1970-х оно стало снижаться из-за уменьшения размеров и массы камер, а также замены механических компонентов на электронные [10].

При дешифрировании крупномасштабных аэроснимков, полученных в результате аэрофотосъемки с самолетов, использовались стереоскопы (рис. 3). Эти приборы позволяли изучать рельеф местности в деталях благодаря необходимому оптическому увеличению [14]. Стереоскопы нашли применение в картографии, геодезии и сельском хозяйстве [15].

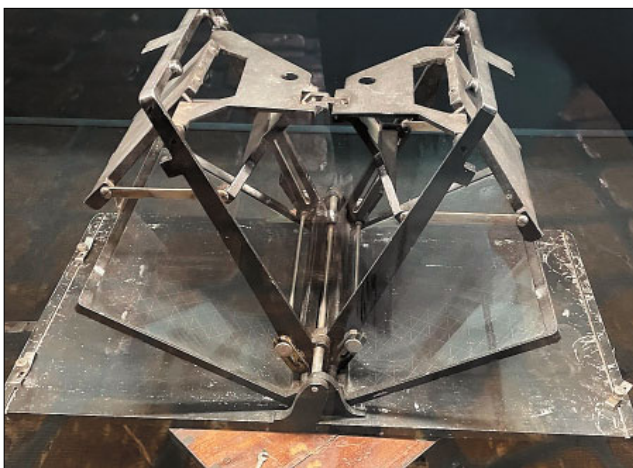


Рис. 3. Стереоскоп. Фото из архива авторов. Экспозиция Музея техники Вадима Задорожного  
Fig. 3. Stereoscope. Photograph from the authors' archive. On display at the Technical Museum of Vadim Zadorozhny

В этот период спектральные данные (рис. 4) начали применяться в аграрном секторе для создания вегетационных карт [16]. Одновременно были разработаны первые вегетационные индексы, позволяющие анализировать состояние посевов [17]. Важно отметить, что аэрофотосъемка с БПЛА в сельском хозяйстве тогда еще не применялась.



Рис. 4. Инфракрасное изображение сельскохозяйственных полей, штат Нью-Джерси 1980–1987 гг. U.S. Department of Agriculture. <https://newjersey.maps.arcgis.com/apps/mapviewer/>

Fig. 4. Infrared image of agricultural fields, New Jersey, 1980–1987. U.S. Department of Agriculture. Available at: <https://newjersey.maps.arcgis.com/apps/mapviewer/>

На рубеже XX и XXI веков, во время четвертого этапа – зарождения БПЛА мультироторного типа и развития цифрового аэрофотоаппарата (1980–2012 гг.) миниатюризация систем управления полетом позволила создать полетные контроллеры для малых БПЛА, обеспечивающие стабильность и дальность полета до 1 км. История развития полетных контроллеров для БПЛА берет начало в 2009 г. [12]. В этот период энтузиасты начали использовать гироскопы и акселерометры, извлеченные из контроллеров *Wii MotionPlus* и *Wii Nunchuk* игровой консоли *Nintendo*, в связке с платформой *Arduino*. Это позволило создать первую доступную систему стабилизации для мультироторных летательных аппаратов. Данный эксперимент положил начало проекту с открытым исходным кодом *MultiWii*, в рамках которого была разработана специализированная плата полетного контроллера (рис. 5) на базе 8-битного микропроцессора *Atmel*.

В этот же период появились цифровые камеры с матрицей нового поколения, которые записывали изображения по стандарту сжатия *JPEG* на *sd*-карту, увеличив емкость хранилищ до 2000 снимков [10]. Отмечена тенденция к установлению стандартов создания БПЛА и программного обеспечения для них, а также активного развития технологий хранения данных. БПЛА не использовались для задач сельского хозяйства в связи с компромиссом между безопасным полетом и аэрофотосъемкой.

Пятый этап – становление готовых решений БПЛА (январь–октябрь 2013 г.) завершился появлением пер-

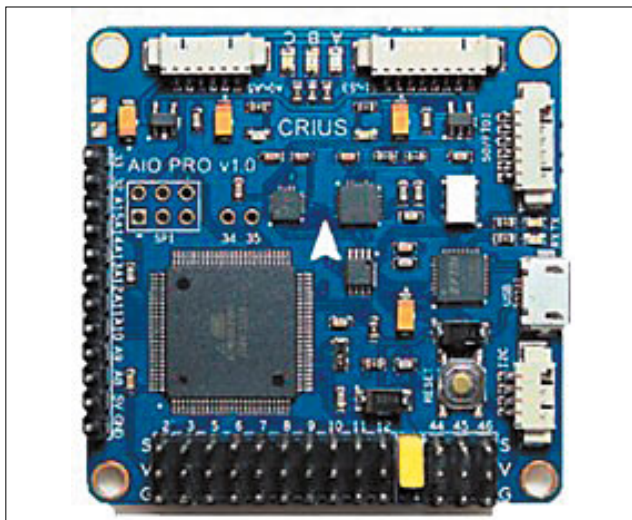


Рис. 5. Полетный контроллер *MultiWii* [12]

Fig. 5. *MultiWii* flight controller [12]

вого серийного коммерческого БПЛА с камерой, максимальной взлетной массой до 30 кг. Активное развитие цифровизации, научных исследований в области оптики, фотоники, нанотехнологий и создание подвесных систем стабилизации способствовали интеграции камеры с разрешением 12 Мп на борт БПЛА. Система управления полетом обеспечивала базовые функции автопилотирования, но управление камерой отсутствовало. БПЛА использовались в основном для художественной съемки, но находили применение и в сельском хозяйстве [12].

Шестой этап – интеграция камеры и интеллектуальных функций автопилота в систему управления полетом (октябрь 2013 г. – н.в.) характеризуется интеграцией интеллектуальных функций в полетный контроллер, что позволило выполнять полет и управлять камерой со смартфона. В 2016 г. были утверждены термины БВС вместо БПЛА и БАС. Отмечена тенденция по увеличению разрешения цифровых камер и количества изображений. Современные камеры снимают с разрешением 61 Мп и способны записывать до 14000 изображений [10].

Центр ВИМ стал развивать направление по использованию БАС с 2016 г., а первые полевые исследования были проведены уже в 2017 г. Совершенствование системы управления полетом и камер повысило безопасность полета и способствовало более активному использованию БАС в сельском хозяйстве (рис. 6). Применение технологий искусственного интеллекта при анализе результатов аэрофотосъемки (изображения, ортофотопланы, цифровые модели местности, вегетационные карты) открыло новые возможности для оценки сельскохозяйственных угодий: состояние растений [18], распознавание заболеваний [19], обнаружение полегания [20], прогнозирование урожая и фенотипирование сортов [21].



Рис. 6. Мониторинг посевов озимой пшеницы с помощью БВС: 1 – DJI Inspire 1, 28.04.2018, Рязанская область; 2 – DJI Matrice 200v2, 23.06.2025, Владимирская область  
 Fig. 6. Monitoring winter wheat crops using UAVs: 1 – DJI Inspire 1, 28 April 2018, Ryazan Region; 2 – DJI Matrice 200 v2, 23 June 2025, Vladimir Region

На основе проведенного ретроспективного анализа выявлены тенденции изменения дальности и продолжительности полета. Технические возможности БПЛА претерпели значительную эволюцию. В XX в. двигатели внутреннего сгорания обеспечивали большую дальность (рис. 7.1), чему способствовало отсутствие сложного дистанционного контроля и одноразовость выполняемых задач. С переходом в XXI в. на электродвигатели и аккумуляторные батареи время полета значительно сократилось, а внедрение строгих протоколов связи дополнительно ограничило дальность. Однако современный прогресс в области аккумуляторов и энергоэффективности позволяет постепенно преодолевать эти ограничения, увеличивая продолжительность полета современных БВС.

Продолжительность полета БПЛА зависела от типа используемого двигателя (рис. 7.2). Двигатели внутреннего сгорания и реактивные двигатели обеспечивали длительное время полета. Переход на электродвигатели и аккумуляторные батареи сократил время полета. Однако, благодаря развитию аккумуляторных батарей и повышению энергоэффективности, наблюдается постепенное увеличение времени полета современных БВС.

Первые системы управления для беспилотных летательных аппаратов появились еще в 1917 г., но основной скачок в их развитии произошел в последние десять лет. Эволюция функциональных возможностей, представленная на графике (рис. 8), выглядит следующим образом. До 1942 г. реализовывались лишь базовые функции управления; в 1942-1944 гг. повысилась точность по курсу; с 1950 г. стал возможен контролируемый полет по приборам радиолокационным способом. Переломным моментом стало появление в 2009 г. полетного контроллера, который обеспечил стабильность, автономность и интеллектуальное управление, открыв новые перспективы для аэрофотосъемки в аграрном секторе.

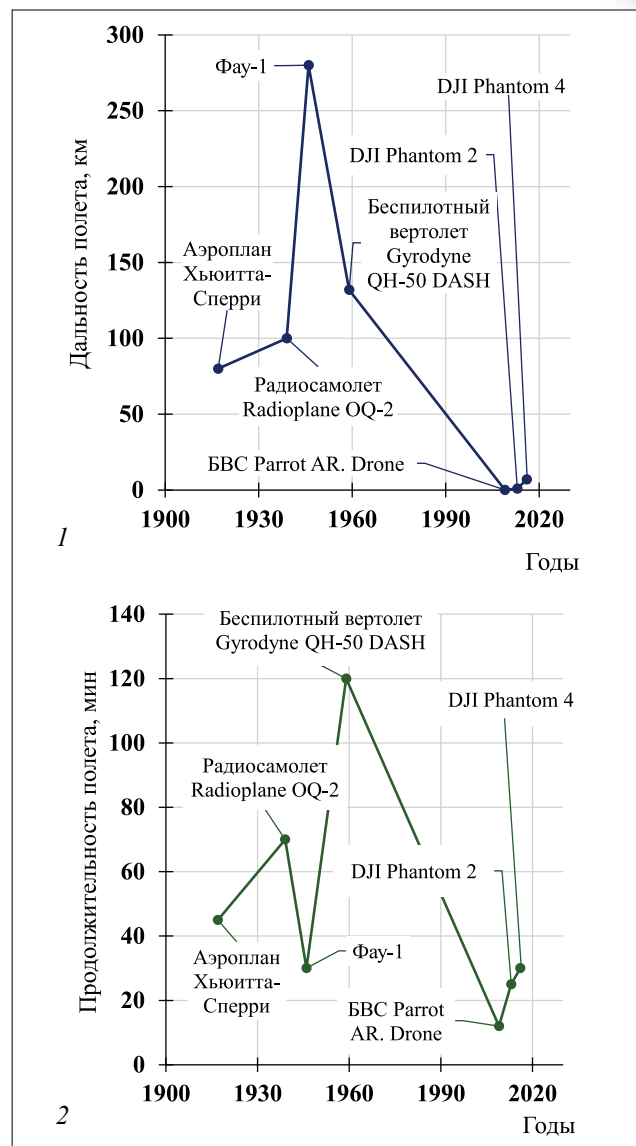


Рис. 7. Тенденции изменения дальности и продолжительности полета БПЛА: 1 – дальность полета; 2 – продолжительность полета

Fig. 7. Trends in UAV flight range and endurance: 1 – flight range; 2 – flight endurance

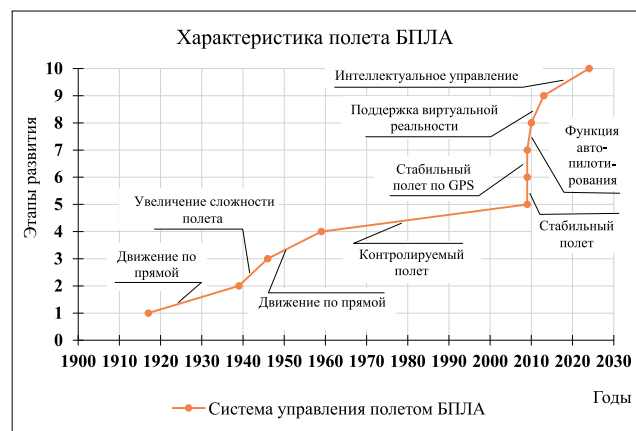


Рис. 8. Эволюция функций системы управления полетом БВС  
 Fig. 8. Evolution of UAV flight control system functions

Таблица ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОТОМ БВС И СРЕДСТВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF FLIGHT CONTROL SYSTEM AND AERIAL IMAGING EQUIPMENT FOR UAV						
Этап развития	Первые экспериментальные разработки аэрофотоаппаратуры	Аэрофотосъемка с летательных аппаратов	Становление дистанционного зондирования Земли	Зарождение БПЛА мультитроторного типа и развитие цифрового аэрофотоаппарата	Становление готовых решений БПЛА	Интеграция камеры и интеллектуальных функций автопилота в систему управления полетом
Годы	1858-1908	1909-1945	1946-1979	1980-2012	Январь-октябрь 2013	Октябрь 2013 – н.в.
Тип БПЛА	–	БПЛА самолетного типа	Беспилотные вертолеты	Заложены стандарты для создания серийных БПЛА	Первые серийные БПЛА мультитроторного типа, массой до 30 кг	Серийные БВС мультитроторного типа, массой до 30 кг
Дальность полета БПЛА, км	–	До 300	До 150	До 1	До 0,05	До 7
Продолжительность полета БПЛА, мин	–	До 70	До 120	До 12	До 25	До 30
Система управления полетом	–	Управление в пределах прямой видимости/полет по заданным курсу и высоте	Взлет/посадка с горизонтальной поверхности, дистанционное управление, контроль по радиолокации	Полетные контроллеры – основа стабильного полета	Полетный контроллер <i>Naza-M Lite</i> , автопилот (базовые функции), управление камерой отсутствует	Полетные контроллеры с интеллектуальными функциями, система обнаружения препятствий, управление со смартфона, управление камерой
Средства аэрофотосъемки	Первые портативные камеры и механические крепления	Высокоскоростные пленочные аппараты, жесткие крепления камер	Высокоскоростные пленочные аппараты, системы креплений и стабилизации камер	Цифровые CMOS-камеры, стабилизация камер	Миниатюрные цифровые CMOS-камеры, стабилизация камер	Интегрированные миниатюрные цифровые спектральные камеры, трехосевые подвесы стабилизации камер
Количество кадров	1	До 200	До 630	До 50	До 2000	До 14 000
Тип получаемых изображений	Сепия	Черно-белое, цветное	Цветное, спектральное	Цветное, спектральное	Цветное, спектральное	Цветное, спектральное
Летательный аппарат для сбора изображений	Воздушные шары и змеи, птицы	Самолеты гражданской авиации	Самолеты гражданской авиации, спутники	Самолеты гражданской авиации, спутники	Самолеты гражданской авиации, спутники	БВС, спутники

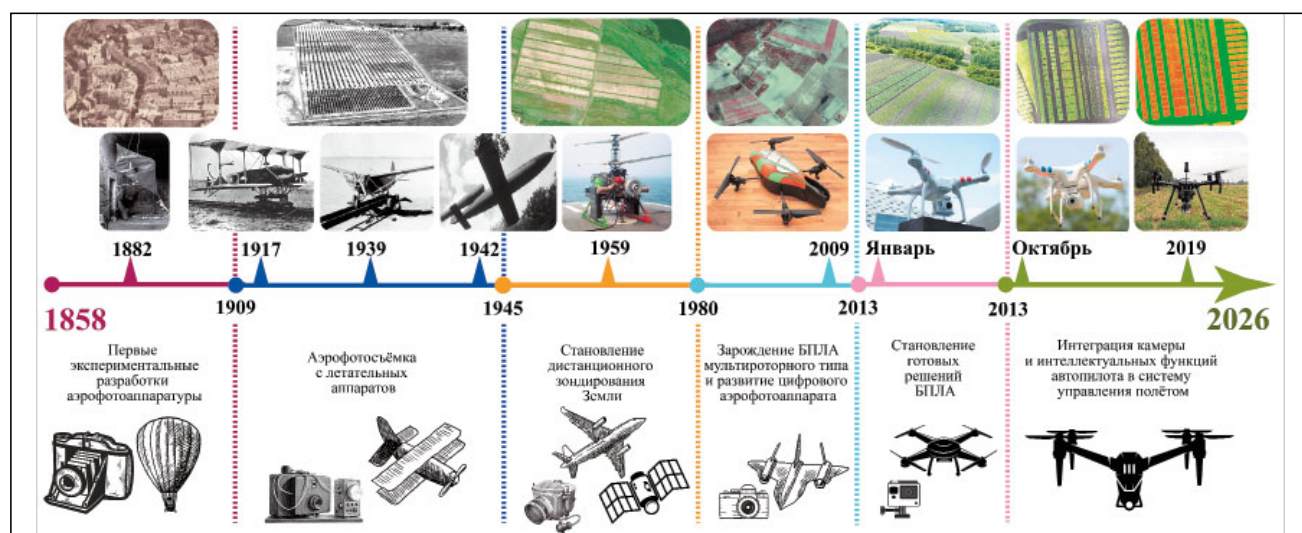


Рис. 9. Основные этапы развития системы управления полетом и средств аэрофотосъемки

Fig. 9. Main stages in the development of flight control systems and aerial imaging equipment

Таким образом, в результате проведенного анализа за исследуемый период выявлены основные тенденции развития системы управления полетом и средств аэрофотосъемки (*таблица*):

- изменились типы БПЛА, камер и получаемых изображений;
- улучшился тип управления полетом;
- увеличилась дальность и продолжительность полета;
- увеличилось число датчиков для стабилизации полета;
- появилась система обнаружения препятствий;
- уменьшился размер системы управления полетом и камер;
- улучшились режимы полета;
- усовершенствовался метод взлета/посадки;
- появились интерфейсы для использования подвижного оборудования;
- повысилось разрешение камер и объем носителей;
- появились специальные стабилизированные подвесы для крепления камер.

На *рисунке 9* показаны основные этапы развития системы управления полетом и средств аэрофотосъемки, связанные с изменением типа собираемых данных, типа камер и летательных аппаратов, на которые они устанавливались. Проведенный ретроспективный анализ показывает, что развитие происходило скачкообразно и было связано с политической, социальной, экономической ситуацией в мире и уровнем развития технологий в смежных областях. С конца 2013 г. интеграция камеры в систему управления полетом позволила акцентировать внимание внешнего пилота на съемке и не отвлекаться на управление, что способствовало их применению в сельском хозяйстве.

Развитие на ближайшее десятилетие будет заключаться во внедрении искусственного интеллекта в бортовые системы БВС. Это объясняется растущим спросом на точность и эффективность сбора данных в сельском хозяйстве, а также значительными достижениями в технологиях искусственного интеллекта, которые повышают автономность БАС и качество принимаемых решений.

Приоритетными направлениями развития на ближайшее время, 2030-е годы, будут:

- объединение датчиков, интерпретация окружающей среды;

- компьютерное зрение и обнаружение объектов;
- автономная навигация и планирование маршрута;
- принятие решений и контроль;
- роевой интеллект;
- машинное обучение и обучение моделей;
- периферийные вычисления и обработка в реальном времени.

Искусственный интеллект, внедренный в БАС, открывает новые возможности для прогнозирования урожая, автоматизации процессов мониторинга, внесения веществ, обработки данных и принятия управленческих решений.

**Выводы.** В результате ретроспективного анализа выявлено шесть этапов развития систем управления полетом и средств аэрофотосъемки, обусловленных влиянием политических, социальных и экономических факторов. Развитие прошло путь от экспериментальных съемок с воздушных шаров до современных интеллектуальных беспилотных авиационных систем. Установлено, что прогресс в области миниатюризации камер и систем управления обеспечил значительный рост возможностей БВС взлетной массой менее до 30 кг. За последнее десятилетие развитие цифровых камер способствовало увеличению их спектрального и пространственного разрешения, что позволило создавать карты с точностью менее 1 см/пикс. Современные полетные контроллеры, оснащенные интеллектуальными функциями, не только стабилизируют полет, но и координируют работу всех бортовых систем и управляют камерой в реальном времени.

Сегодня аэрофотосъемка с БАС является высокоточным инструментом для решения задач сельского хозяйства: от оценки состояния посевов по цифровым картам до создания детализированных вегетационных карт селекционных и семеноводческих участков. Интеграция цифровых камер, интеллектуальных систем управления и применение технологий искусственного интеллекта на борту БВС способствуют формированию нового подхода к мониторингу сельскохозяйственных угодий, обеспечивая не только высокую точность данных, но и оперативность принятия управленческих решений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гайсин Р.С. Предел технологической эволюции сельского хозяйства и возможность его преодоления // *Проблемы современной экономики*. 2014. № 4(52). С. 41-45. EDN: TJHWFH.
2. Гусев Е.М. Эволюция технологий в земледелии: от «серых» до «зеленых» // *Аридные экосистемы*. 2020. Т. 26, №1(82). С. 3-12. EDN: CZCANB.
3. Коротченя В.М. История технологического развития сельского хозяйства (растениеводства) // *Экономика сельского хозяйства России*. 2019. №7. С. 28-33. DOI: 10.32651/197-28.
4. Еремин С.Г. Цифровая трансформация сельского хозяйства: возможности и вызовы внедрения технологий больших данных // *Аграрная наука*. 2025. №2. С. 36-38. EDN: NILBNC.
5. Винничек Л.Б., Омаров М.М., Омарова Н.Ю. Проблемы

- мы и перспективные направления развития сельского хозяйства России до 2030 года // *Экономика сельского хозяйства России*. 2025. №6. С. 2-12. DOI: 10.32651/256-2.
6. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерной науки в условиях цифровизации сельского хозяйства // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2025. №3. С. 45-53. DOI: 10.31857/S2500262725030081.
  7. Гостев А.В. Развитие цифровизации земледелия на примере разработки современных агротехнологий с использованием цифровых систем // *Достижения науки и техники АПК*. 2025. Т. 39. №1. С. 4-9. DOI: 10.53859/02352451\_2025\_39\_1\_4.
  8. Альт В.В., Ценч Ю.С., Савченко О.Ф., Солошенко А.А. Методологические основы интеграции беспилотных летательных аппаратов в систему сельскохозяйственных машин // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2025. №4. С. 59-67. DOI: 10.7868/S3034582025040114.
  9. Лачуга Ю.Ф., Лобачевский Я.П., Алферов А.А. Сельскохозяйственная наука в развитии агропромышленного комплекса Российской Федерации // *Вестник Российской академии наук*. 2025. №6. С. 3-8. DOI: 10.7868/S3034520025060019.
  10. Курбанов Р.К., Ценч Ю.С., Захарова Н.И. Основные тенденции в развитии технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №1. С. 86-95. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95.
  11. Краснопевцев Б.В. Основные события истории фотограмметрии и воздушной съемки до 1918 года // *Геодезия и картография*. 1998. №8. С. 55-59.
  12. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
  13. Monmonier M. Aerial photography at the Agricultural Adjustment Administration: acreage controls, conservation benefits, and overhead surveillance in the 1930s. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2002. N68(12). 1257-1261.
  14. Антипов И.Т. Развитие фотограмметрии в России // *Гео-Сибирь*. 2010. NS. С. 97-132. EDN: PFOGOP.
  15. Комиссаров А.В., Головина Л.А. История развития кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования // *Вестник СГУГиТ*. 2023. Т. 28. №6. С. 173-179. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-6-173-179.
  16. Гольдман Л.М. Применение цветной аэросъемки для изучения местности (дешифрирование цветных аэроснимков) // *Труды Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии*. 1960. N137. С. 57-63.
  17. Mulla D.J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*. 2013. N114(4). 358-371.
  18. Reyes-Rosas A., Lara-Viveros F.M., Chávez-Cerón L., Khamkure S. Estimation of water potential in corn plants using machine learning techniques with UAV imagery and evaluating the effect of flying height. *Engineering Proceedings*. 2023. N56(1). 157. DOI: 10.3390/ASEC2023-15882.
  19. Nesar S.B., Nugent P.W., Zidack N.K., Whitaker B.M. Unmanned aerial vehicle-based hyperspectral imaging for potato virus Y detection: machine learning insights. *Remote Sensing*. 2025. N17(10). 1735. DOI: 10.3390/rs17101735.
  20. Sarkar S., Zhou J., Scaboo A. et al. Assessment of soybean lodging using UAV imagery and machine learning. *Plants*. 2023. N12(16). 2893. DOI: 10.3390/plants12162893.
  21. Tueros M., Galindo M., Alvarez J. et al. Varietal identification and yield estimation in potatoes using UAV RGB imagery in the southern highlands of Peru. *AgriEngineering*. 2026. N8(2). 65. DOI: 10.3390/agriengineering8020065.

## REFERENCES

1. Gaysin R.S. The limit of technological evolution in agriculture and the possibility of overcoming it. *Problems of Modern Economics*. 2014. N4(52). 41-45 (In Russian). EDN: TJHWFH.
2. Gusev E.M. Evolution of agricultural technologies: from «gray» to «green». *Arid Ecosystems*. 2020. Vol. 26. N1(82). 3-12 (In Russian). EDN: CZCAHB.
3. Korotchenya V.M. History of technological development of agriculture (crop production). *Economics of Agriculture of Russia*. 2019. N7. 28-33 (In Russian). DOI: 10.32651/197-28.
4. Eremin S.G. Digital transformation of agriculture: opportunities and challenges of implementing big data technologies. *Agrarian Science*. 2025. N2. 36-38 (In Russian). EDN: NILBNC.
5. Vinnichuk L.B., Omarov M.M., Omarova N.Yu. Problems and promising areas of development of agriculture in Russia until 2030. *Economics of Agriculture of Russia*. 2025. N6. 2-12 (In Russian). DOI: 10.32651/256-2.
6. Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogonov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agro-engineering science in the conditions of digitalization of agriculture. *Russian Agricultural Sciences*. 2025. N3. 45-53 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262725030081.
7. Gostev A.V. Development of agriculture digitalization on the example development of modern agricultural technologies using digital systems. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2025. Vol. 39. N1. 4-9 (In Russian). DOI: 10.53859/02352451\_2025\_39\_1\_4.
8. Alt V.V., Tsench Yu.S., Savchenko O.F., Soloshenko A.A. Methodological foundations for the integration of unmanned aerial vehicles into agricultural machinery systems. *Russian Agricultural Sciences*. 2025. N4. 59-67 (In Russian). DOI: 10.7868/S3034582025040114.

9. Lachuga Yu.F., Lobachevsky Ya.P., Alferov A.A. Agricultural science in the development of the agro-industrial complex of the Russian Federation. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2025. N6. 3-8 (In Russian). DOI: 10.7868/S3034520025060019.
10. Kurbanov R.K., Tsench Yu.S., Zakharova N.I. Major trends in the development of aerial photography technology for agricultural lands. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 86-95 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95.
11. Krasnopevtsev B.V. Main events in the history of photogrammetry and aerial surveying before 1918. *Geodesy and Cartography*. 1998. N8. 55-59 (In Russian).
12. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned aircraft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. 17(3). 4-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
13. Monmonier M. Aerial photography at the Agricultural Adjustment Administration: acreage controls, conservation benefits, and overhead surveillance in the 1930s. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2002. N68(12). 1257-1261.
14. Antipov I.T. Development of photogrammetry in Russia. *Geo-Siberia*. 2010. NS. 97-132 (In Russian). EDN: PFOGOP.
15. Komissarov A.V., Golovina L.A. History of the development of the Department of Photogrammetry and Remote Sensing. *Vestnik Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2023. Vol. 28. N6. 173-179 (In Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-6-173-179.
16. Goldman L.M. Application of color aerial photography for terrain studies (interpretation of color aerial photographs). *Proceedings of the Central Research Institute of Geodesy, Aerial Survey and Cartography*. 1960. 137. 57-63 (In Russian).
17. Mulla D.J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*. 2013. N114(4). 358-371.
18. Reyes-Rosas A., Lara-Viveros F.M., Chávez-Cerón L. et al. Estimation of water potential in corn plants using machine learning techniques with UAV imagery and evaluating the effect of flying height. *Engineering Proceedings*. 2023. 56(1). 157. DOI: 10.3390/ASEC2023-15882.
19. Nesar S.B., Nugent P.W., Zidack N.K. et al. Unmanned aerial vehicle-based hyperspectral imaging for potato virus Y detection: machine learning insights. *Remote Sensing*. 2025. 17(10). 1735. DOI: 10.3390/rs17101735.
20. Sarkar S., Zhou J., Scaboo A. et al. Assessment of soybean lodging using UAV imagery and machine learning. *Plants*. 2023. 12(16). 2893. DOI: 10.3390/plants12162893.
21. Tueros M., Galindo M., Alvarez J. et al. Varietal Identification and yield estimation in potatoes using UAV RGB imagery in the southern highlands of Peru. *AgriEngineering*. 2026. 8(2). 65. DOI: 10.3390/agriengineering820065.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Лобачевский Я.П. – научное руководство, формирование основных направлений исследования;

Ценч Ю.С. – научное руководство, формирование задач исследования;

Курбанов Р.К. – обработка данных;

Захарова Н.И. – сбор и анализ материалов по теме исследования, подготовка статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Lobachevsky Ya.P. – scientific supervision, defining the main research perspectives;

Tsench Yu.S. – scientific guidance, formulation of the research objectives;

Kurbanov R.K. – data processing;

Zakharova N.I. – collection and analysis of materials on the research topic; manuscript preparation.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2026

04.05.2026



## Научно–технологические этапы создания первого серийного отечественного ягодоуборочного комбайна

**Ростислав Александрович Филиппов,**  
 кандидат сельскохозяйственных наук,  
 ведущий научный сотрудник,  
 e-mail: rostislav-filippov@yandex.ru;

**Игорь Геннадьевич Смирнов,**  
 доктор технических наук, член-корреспондент  
 Российской академии наук,  
 главный научный сотрудник,  
 e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим, что расширение производства черной смородины ограничивалось отсутствием технических средств возделывания этой культуры. В статье представлена информация о развитии механизации уборки ягод черной смородины в России с 1960-х годов. (*Цель исследования*) Проанализировать основные исторические этапы создания отечественных ягодоуборочных машин позиционного и непрерывного действия и обобщить результаты их испытаний для определения параметров комбайна МПЯ-1. (*Материалы и методы*) Работа выполнена на основе анализа научно-технической литературы и отчетной документации по механизации уборки ягодных культур в СССР во второй половине XX века с использованием историко-аналитического и сравнительно-сопоставительного методов. (*Результаты и обсуждение*) Описаны технические особенности рабочих органов лабораторных установок для выявления оптимальных режимов съема ягод черной смородины, что позволило научно обосновать параметры будущих машин. Проанализированы конструкции опытных моделей МЯГ-000, ПЯМ-000, ПЯМ-71–73 и первого серийного комбайна МПЯ-1. Представлены результаты государственных и сравнительных испытаний. Проведен сравнительный анализ показателей комбайна МПЯ-1 с аналогами КК-1 (Болгария) и *Pattenden* (Великобритания) на сортах черной смородины Голубка, Богатырь, Победа. Установлено, что ягодоуборочный комбайн МПЯ-1 обеспечивает полноту съема 95,8-97,9 процента и улавливания ягод до 88,4 процента. Содержание примесей (0,68-2,1 процента) значительно ниже показателей британского аналога (9,2 процента), что свидетельствует о более совершенной системе сепарации. Производительность труда возрастает в 73 раза по сравнению с ручным сбором. Определены оптимальные параметры вибрации частотой 15-17 герц и амплитудой 20-25 миллиметров, при которых достигается щадящий режим отделения плодов. (*Выводы*) Результаты испытаний подтверждают высокую эффективность ягодоуборочного комбайна МПЯ-1 и целесообразность его серийного производства для плантаций с междурядьями 2,5-3 метра, демонстрируя успешность системного подхода к решению проблемы механизации в отрасли садоводства.

**Ключевые слова:** черная смородина, сбор урожая, механизация, ягодоуборочный комбайн, МПЯ-1, вибрационный съем, агротехнические показатели.

■ **Для цитирования:** Филиппов Р.А., Смирнов И.Г. Научно-технологические этапы создания первого серийного отечественного ягодоуборочного комбайна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 76-84. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-76-84. EDN: ZRYYRW.

Scientific article

## Scientific and Technological Development of the First Domestically Produced Serial Berry Harvester

**Rostislav A. Filippov,**  
 Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
 e-mail: rostislav-filippov@yandex.ru;

**Igor G. Smirnov,**  
 Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian  
 Academy of Sciences, chief researcher,  
 e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The expansion of blackcurrant production was limited by the lack of machinery for cultivating and harvesting this crop. The paper presents information on the development of mechanized blackcurrant harvesting in Russia since the 1960s. (*Research purpose*) The study aimed to analyze the main historical stages in the development of domestic berry harvesters

designed for intermittent and continuous operation and to summarize the results of their trials in order to determine the parameters of the MPYa-1 harvester. (*Materials and methods*) The study was based on an analysis of scientific and technical literature and reports on the mechanization of berry harvesting in the USSR in the second half of the 20th century, using historical-analytical and comparative methods. (*Results and discussion*) The study describes the technical features of the working components of laboratory units used to identify optimal operating modes for detaching blackcurrant berries. This made it possible to scientifically substantiate the parameters of future machines. The designs of the experimental models MYaG-000, PYaM-000, PYaM-71–73, and the first production combine harvester, MPYa-1, are analysed. The paper presents the results of state and comparative trials. It compares the performance indicators of the MPYa-1 harvester and its counterparts: the KK-1 (Bulgaria) and the Pattenden (United Kingdom), tested on the blackcurrant varieties Golubka, Bogatyr, and Pobeda. It was found that the MPYa-1 berry harvester ensured berry detachment completeness of 95.8-97.9 percent and a berry collection rate of up to 88.4 percent. The impurity content, 0.68-2.1 percent, was significantly lower than that of the British counterpart, 9.2 percent, indicating a more advanced separation system. Labour productivity increased 73-fold compared with manual harvesting. The optimal vibration parameters were determined as a frequency of 15-17 hertz and an amplitude of 20-25 millimeters, at which a gentle fruit-detachment mode was achieved. (*Conclusions*) The trial results confirm the high efficiency of the MPYa-1 berry harvester and the feasibility of its serial production for plantations with row spacings of 2.5-3 meters, the findings also demonstrate the effectiveness of a systematic approach to solving the problem of mechanization in horticulture.

**Keywords:** blackcurrant, harvesting, mechanization, berry harvester, MPYa-1, vibrational detachment, agrotechnical performance indicators.

■ **For citation:** Filippov R.A., Smirnov I.G. Scientific and technological development of the first domestically produced serial berry harvester. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 76-84 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-76-84. EDN: ZRYRWW.

**Ч**ерная смородина благодаря высокой рентабельности и стабильному потребительскому спросу относится к ценным и распространенным ягодным культурам [1]. Однако расширение ее производства в свое время столкнулось с проблемой отсутствия средств механизации. В технологическом цикле возделывания черной смородины самой трудоемкой операций является уборка урожая, на нее приходится около 50-70% всех трудовых затрат [2, 3].

В 1956 г. в Постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Об увеличении производства и заготовок плодов, ягод и винограда» был определен курс на интенсификацию садоводства, в частности на развитие механизации как приоритетного направления [4, 5]. Задача расширения масштабов потребовала принципиально нового подхода к уборке урожая плодов и ягод (Утков Ю.А. Исторические достижения инженерных исследований ФГБНУ ФНЦ Садоводства. М.: ФГБНУ ФНЦ Садоводства, 2023. 142 с.). С начала 1960-х годов в СССР, как и за рубежом, активизировались исследования в области механизации уборочных процессов в садоводстве [6].

Первыми в России теоретическими исследованиями по обоснованию уборочных процессов в садоводстве занимались профессор Г.П. Варламов (Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения, ВИСХОМ) и кандидат технических наук В.А. Чарушников (Саратовский институт механизации сельского хозяйства, СИМЭСХ). В начале 1960-х годов они предложили пути и методы

теоретических исследований плодовых и ягодных культур, а также использование эффекта вибрации для механизированной уборки черной смородины [7], (Кривоносова А.Д. Разработка и исследование ручных вибраторов ягодоуборочных машин: дисс. канд. техн. наук. М., 1969. 141 с.).

Разрабатывались технические средства малой механизации в виде различных приспособлений и механизмов, облегчающие условия труда сборщиков, но это не обеспечивало кратного увеличения производительности [8, 9]. К середине 1960-х годов была четко обозначена приоритетная задача по созданию комбайна для поточной уборки черной смородины.

**Цель исследования** – провести анализ исторических этапов создания и совершенствования отечественных ягодоуборочных машин, а также обобщить результаты их лабораторных, государственных и сравнительных испытаний для определения технически и агротехнически обоснованных параметров рабочих органов первого серийного отечественного ягодоуборочного комбайна.

**Материалы и методы.** Работа выполнена на основе анализа и обобщения научно-технической литературы, архивных материалов и отчетной документации по проблеме механизации уборки ягодных культур в СССР во второй половине XX в. с использованием историко-аналитического и сравнительно-сопоставительного методов. Объектом исследования послужили экспериментальные и серийные образцы ягодоуборочной техники, разработанные с 1965 по 1975 г. в Научно-исследователь-

ском зональном институте садоводства Нечернозёмной полосы (НИЗИСНП), ВНИИ садоводства им. И.В. Мичурина, ВИСХОМ и в Головном специализированном конструкторском бюро (ГСКБ, г. Кишинёв, Молдавская ССР).

**Результаты и обсуждение.** В 1965 г. в лаборатории отдела механизации НИЗИСНП проводились первые в СССР исследования возможности механизированного съема ягод черной смородины сорта Лия плодородная посадки 1955 г. с помощью вибрирующих пальцев на специальном стенде СТЕ-2.8. Вибрационная установка состояла из электродвигателя с реостатом для регулировки частоты колебаний, цепного привода и вибратора, преобразующего вращательное движение эксцентрика в возвратно-поступательное движение втулок, к которым жестко крепились деревянные пальцы. При расстоянии между пальцами 25 мм, частоте 17 Гц и времени воздействия 5 с отделялось наибольшее количество ягод (96-98%) [7].

В 1965-1966 гг. в ГСКБ при участии сотрудников НИЗИСНП была разработана экспериментальная мобильная ягодоборочная установка МЯГ-000 позиционного действия. Ее рабочий орган воздействовал на все плодоносящие ветви смородины одновременно без зажима их в основании (рис. 1). Было установлено, что для повышения качества съема ягод увеличение частоты колебаний более предпочтительно, так как увеличение амплитуды колебаний приводит к повреждениям растений [2].

Система привода активатора включала два гидромотора ГМ-36 (насос НШ-46) и регулятор, при этом вентилятор приводился в движение от ВОМ трактора через карданную передачу. После выравнивания рамы активатор опускался, пронизывая куст гребенками, и при вращении вала с эксцентриками (500-1800 об/мин) создавал вибрацию частотой 8-30 Гц. В результате зрелые ягоды отделялись, а воздушный поток со скоростью до 25 м/с направлял их в улавливатель. Расстояние между секциями гребенок регулировалось в пределах 200-470 мм, зазор между пальцами находился в диапазоне 15-40 мм, время ввода в куст составляло 1-15 с.

Эксперименты показали, что для сортов Память Мичурина и Сентябрьская Даниэля оптимальные параметры съема ягод достигаются при частоте вибрации 22-24 Гц, времени воздействия 3-5 с и расстоянии между гребенками 25 мм.

С 1968 г. исследования рабочих органов с целью создания ягодоборочных машин проводились параллельно в НИЗИСНП, ВНИИС им. И.В. Мичурина и ВИСХОМ, а также конструкторами ГСКБ (в последующем – ГСКБ ПО «Плодсельхозмаш», г. Кишинёв). Проводились исследования по колебанию неуплотненной кроны куста и колебанию предварительно разделенного куста.

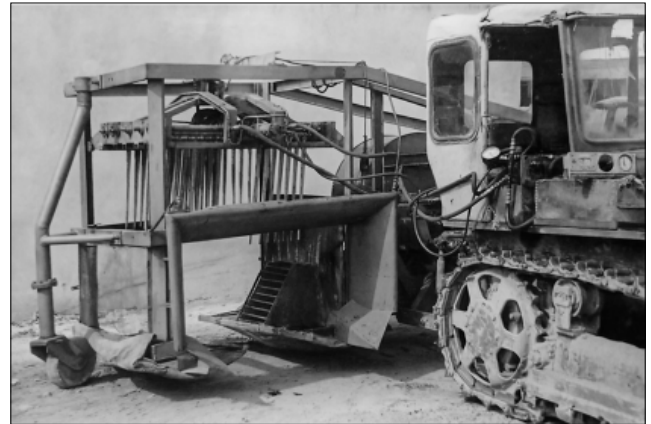


Рис. 1. Общий вид установки МЯГ-000

Fig. 1. General view of the MYAG-000 berry-harvesting unit

В 1968 г. разработана экспериментальная мобильная машина непрерывного действия ПЯМ-000 для уборки черной смородины с пальчатым активатором в качестве рабочего органа, обеспечивающего непрерывный съем ягод с кустов одного ряда в процессе поступательного движения агрегата. Установка состояла из сварной рамы с опорным колесом, системы навески на трактор, пальчатого активатора с инерционным вибратором (привод от двух гидромоторов), формирователя кроны, делителя и боковых улавливателей с резиновыми лотками. Активатор включал шток с набором свободно вращающихся дисков (до 16 шт.), на которых крепились гибкие пальцы двутаврового сечения длиной 590 мм.

Принцип действия ПЯМ-000 заключался в том, что при поступательном движении агрегата вибрирующие пальцы пронизывали крону, передавая колебания ветвям, что обеспечивало отделение ягод без повреждения растений. Предусматривалась регулировка частоты вибрации в диапазоне 5-25 Гц при амплитуде колебаний до 25 мм, расстоянии между пальцами 35 мм и внедрения в крону до 300 мм. Испытания показали, что оптимальное качество съема ягод (98-99%) достигается при вибрации 15-17 Гц, амплитуде 20-25 мм и времени воздействия 3-5 с. Поломка однолетних приростов не превышала 2%, рабочая скорость движения составляла 0,45-0,7 км/ч.

В 1969 г. в НИЗИСНП и ГСКБ была изготовлена модернизированная версия машины ПЯМ-000 (ПЯМ-69). Главным изменением стала установка двух регулируемых опорных колес справа (рис. 2). Для улучшения работы улавливателя и выравнивания почвы под веткоподъемниками установили направляющие скобы, а между дисками активатора добавили защитные шайбы для сохранения целостности веток [6, 7].

Привод центрального приемника стал механическим (от подпружиненных катков через гибкие валы), а зазор между направляющими регулиро-



Рис. 2. Ягодуборочная установка ПЯМ-69 в работе  
Fig. 2. Berry-harvesting unit PУaM-69 in operation

вался. Цепи приемника для снижения поврежденный защитили резиновыми чехлами. В центре активатора появился съемный стальной диск-отражатель с резиновой окантовкой. Также был предусмотрен второй вариант приемника с заменой резиновых лотков на армированные щетки тех же габаритов.

В 1969 г. были проведены сравнительные испытания трех вариантов конструкций ягодуборочных установок: НИЗИСНП и ГСКБ, ВИСХОМ и ВНИИС им. И.В. Мичурина. Исследования экспериментальных машин для сбора ягод проходили на плантациях Научно-исследовательского зонального института садоводства.

Лабораторно-полевые установки конструкций ВИСХОМ (ЯУ-69) и ВНИИС им. И.В. Мичурина воздействовали активаторами на предварительно разделенный куст с уплотненными ветвями с каждой стороны междурядий только двумя последовательно установленными пальцевыми дисками при определенной частоте и амплитуде. Поэтому съем ягод был в основном с небольшого участка уплотненных ветвей, а улавливание отделенных ягод было неудовлетворительным (рис. 3).

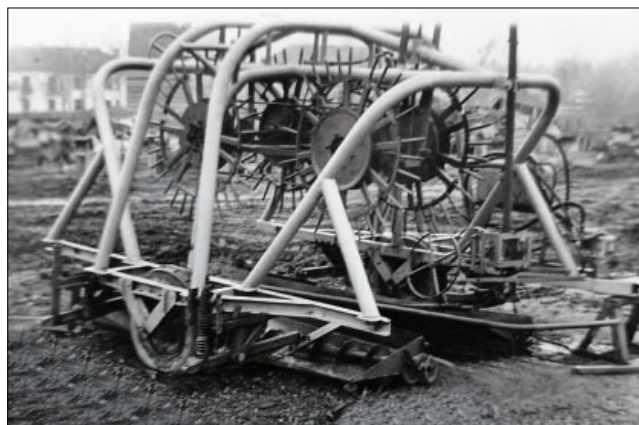


Рис. 3. Машина ЯУ-69 с вертикальными пальчатыми дисками (ВИСХОМ)  
Fig. 3. YaU-69 machine with vertical finger-type discs (VISHOM)



Рис. 4. Лабораторная установка ВНИИС садоводства им. И.В. Мичурина на испытаниях, 1969 год  
Fig. 4. Laboratory setup of VNIIS named after I.V. Michurin during trials, 1969

Модель ВНИИС им. И.В. Мичурина (рис. 4) отличалась тем, что кусты обкатывались рабочими колесами без привода, т.е. самопроизвольно. Рабочие колеса попарно соединялись клиновым ремнем. Вибрировали только пальцы за счет вращающегося эксцентрика и возвратных пружин.

В полевых исследованиях лабораторных установок в первую очередь определяли оптимальные параметры работы активаторов машин для качественного съема, изучали наиболее рациональные формы вибрирующих пальцев, оценивали надежность основных узлов. Результаты сравнительных испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 Качественные показатели работы машин QUALITY INDICATORS OF MACHINE OPERATION			
Показатель	Конструкция ВНИИС	ЯУ-69 (ВИСХОМ)	ПЯМ-69 (ГСКБ, НИЗИСНП)
Режим:			
ход, м	40	42	46
частота, мин <sup>-1</sup>	1100	850	900
Полнота съема, %	48,8	35,5	81,4
Повреждение растений (обдиранье ветвей), %	46	22	33

По итогам совместных испытаний наиболее удачной была признана конструкция машины ПЯМ-69, модернизированная специалистами ВИСХОМ как ПЯМ-70 (рис. 5). Технологический процесс аналогичен работе установки ПЯМ-69. С целью уменьшения разброса ягод на активаторе в центре устанавливался специальный отражательный диск. Система улавливания была снабжена цепным контуром с литыми резиновыми лотками П-образного профиля и почти полностью смыкала куст, обеспечивая хорошее улавливание ягод. Качественный съем черной смородины машиной ПЯМ-70 обеспечивался при амплитуде колебаний активатора 20-25 мм, частоте 15-17 Гц и скорости агрегата 0,5-0,7 км/ч.



Рис. 5. Установка ПЯМ-70 и ее рабочие органы (активатор, центральный приемник и выносные транспортеры)

Fig. 5. PYaM-70 unit and its working components (activator, central receiver, and external conveyors)

Полнота съема достигла 99% при степени улавливания 88%, поломки однолетних приростов и многолетних соответственно не превышали 2 и 5%.

Ягодоборочный комбайн ПЯМ-71 был разработан в ГСКБ при участии НИЗИСНП согласно плану ОКР на базе самоходного высококлиренсного шасси табачной модификации Т-16МВТ (клиренс 1500 мм) с увеличением базы (длины рамы) на 700 мм. Активатор выполнен на шарнирных подвесках и состоит из двух симметричных частей, движущихся синхронно в противофазе для достижения динамического уравнивания и исключения передачи вибраций на раму шасси (рис. 6).



Рис. 6. Опытный образец машины ПЯМ-71 (ГСКБ)

Fig. 6. Experimental prototype of the PYaM-71 machine (GSKB)

Вибрация пальцев активатора осуществлялась посредством двух качающихся на общей оси рычагов типа «ножницы», установленных в центральной части активатора. Верхняя часть рычагов шарнирно соединена с двумя эксцентриками, располо-

женными на общем валу, приводимом во вращение от центрального вала отбора мощности (ВОМ) шасси. При такой конструкции в центре активатора оставалась зона шириной до 250 мм без колеблющихся пальцев. Для частичного перекрытия этой зоны в кроне кустов все пальцы с дисками установлены на обоих штоках наклонно. Улавливатель гусеничного типа с резиновыми лотками выполнен аналогично модели ПЯМ-70 с центральным приемником. Отличие заключается в использовании цепи с увеличенным шагом.

Формирователь крепится на промежуточной раме в ее передней части, аналогично активатору и улавливателю. Он имеет наклоненные к низу две боковые поверхности с опорными лыжами, а также верхний щит с небольшим делителем. Система транспортировки и очистки вороха включает два горизонтальных и два наклонных транспортера, симметрично расположенных относительно продольной оси шасси на промежуточной раме.

Очистка ягод осуществляется вентилятором с системой воздухопроводов. Система накопления урожая состоит из двух бункеров и подставок для тары, симметрично расположенных относительно продольной оси машины. Активатор, транспортеры, улавливатель и формирователь размещены на промежуточной раме, которая шарнирно соединена с рамой шасси двумя кронштейнами. Подъем и опускание промежуточной рамы со всеми навешенными узлами осуществляются четырьмя гидроцилиндрами. Боковые стороны машины закрыты сетчатыми рамками, шарнирно закрепленными в верхней части. Таким образом, конструкция ПЯМ-71 обеспечивает эффективное динамическое уравнивание рабочих органов, минимизацию вибрационных нагрузок на шасси и симметричную организацию технологических потоков уборки, транспортирования и первичной очистки ягод.

Ягодоборочный комбайн ПЯМ-71 был изготовлен в мастерских НИЗИСНП на базе высококлиренсного самоходного шасси чайной модификации Т-16МЧ с клиренсом 1250 мм с использованием активатора, центрального приемника, улавливателя и частей формирователя кустов от модели ПЯМ-69 (рис. 7).

Комбайн, пропуская ряд под собой, наклонял кусты формирователем. Ягоды отделялись под действием вибрации активатора и обкатывания ветвей пальчатыми дисками, после чего направлялись в приемник или емкости.

Поскольку секции центрального приемника приводились во вращение за счет реакции ветвей, часть ягод иногда просыпалась между лотками, отгибаемыми ветвями. Однако основная масса вороха с центрального приемника поступала в емкости-накопители и воздушным потоком засасывалась в



Рис. 7. Опытный образец комбайна ПЯМ-71 (НИЗИСНП)  
Fig. 7. Experimental prototype of the PYAM-71 berry harvester developed by NIZISNP

бункер, где с помощью вентилятора листья и другие легкие примеси отделялись от ягод.

Конструкция машины предусматривала регулировку частоты колебаний активатора, а амплитуда стабилизировалась за счет установки дополнительных грузов на промежуточной раме. Экспериментальный ягодоборочный комбайн ПЯМ-71 отличался от ПЯМ-69 наличием в системе улавливания двух поперечных транспортеров со специальными подставками для тары, а центральный приемник оснащался шарнирными пластинами.

Главное отличие машин образца 1971 г. заключалось в исполнении активаторов. Если на машине ПЯМ-71 (ГСКБ) пальчатые диски на штоке располагались наклонно и были набраны в две симметричные секции, то на машине ПЯМ-71 (НИЗИСНП) диски перпендикулярны оси штока и образуют сплошной барабан.

Гусеничный улавливатель на машине ГСКБ был значительно длиннее и с большим углом установки лотков относительно уровня почвы. Обе машины имели оригинальную конструкцию рамы. На машине ПЯМ-71 (НИЗИСНП) рама состояла из шарнирно соединенных между собой двух частей, что позволило резко снизить вибрацию, передаваемую на раму шасси (рис. 8).

Конструкция уборочной машины ПЯМ-72 претерпела изменения по сравнению с предшественником ПЯМ-71 (ГСКБ). Основным отличием стала перпендикулярная установка пальцев активатора относительно оси штока, что позволило исключить из конструкции делитель и потребовало модернизации привода.

Ягодоборочная машина ПЯМ-72 имела две разновидности с механическим транспортированием вороха и с пневматическим. В систему пневмотранспортировки вороха входили вентилятор, трубопроводы, бункеры со смотровыми окнами и всасывающие патрубки с насадками. Для удобства работы на бункерах предусматривались площадки под та-



Рис. 8. Опытный образец машины ПЯМ-72  
Fig. 8. Experimental prototype of the PYAM-72 unit

ру, а в кормовой части машины устанавливалась шарнирная лестница.

Лабораторные и полевые исследования поточной ягодоборочной машины ПЯМ-72 показали, что полнота съема была 82%, а полнота улавливания составляла 80% в варианте с механическим транспортированием и 63% с пневматическим транспортированием.

Итоги трехлетнего цикла совместных изысканий были подведены в 1973 г. на профильном заседании в ВИСХОМ с участием всех организаций-соисполнителей. Экспертная комиссия констатировала, что только опытный образец комбайна ПЯМ-72 (и его модернизированная версия ПЯМ-73), созданный силами НИЗИСНП и ГСКБ, показал полную работоспособность технологии уборки черной смородины в условиях промышленных плантаций.

На основании полученных данных комплект конструкторской документации был официально направлен в ГСКБ по садовым машинам для подготовки к серийному производству.

В 1974 г. в Ленинградской области на Северо-Западной МИС с 9 по 21 августа в совхозе «Тайцы» состоялись государственные испытания первой модели комбайна МПЯ-1.

Ягодоборочный комбайн МПЯ-1 представляет собой агрегат (рис. 9), состоящий из шасси, несущей рамы с подъемным механизмом, формователя кустов, рабочего органа (активатора), системы улавливания и транспортировки урожая (поперечные и продольные транспортеры), пневматической системы очистки и устройства затаривания (Смирнов И.Г. Уборочный модуль для смородиноборочного комбайна: дис. ... канд. с.-х. наук. М.: 2001. 133 с.).

За один час машина способна обработать до 0,53 га площади с полнотой съема ягод до 94-97%,

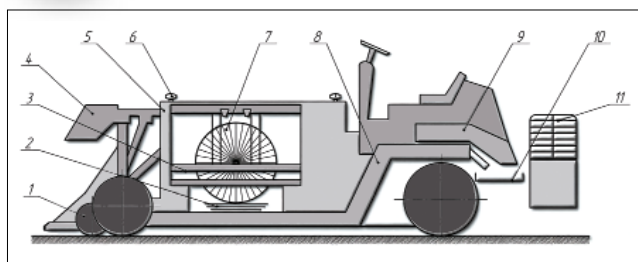


Рис. 9. Схема устройства комбайна МПЯ: 1 – формователь; 2 – поперечный транспортер; 3 – вибратор; 4 – шасси; 5 – рама; 6 – подъемное устройство; 7 – активатор; 8 – продольный транспортер; 9 – система очистки; 10 – разгрузочная площадка; 11 – кассета с ящиками

Fig. 9. Schematic layout of the MPYa combine harvester: 1 – former; 2 – transverse conveyor; 3 – vibrator; 4 – chassis; 5 – frame; 6 – lifting device; 7 – activator; 8 – longitudinal conveyor; 9 – cleaning system; 10 – unloading platform; 11 – box cassette

при скорости комбайна в рабочем режиме 0,6-1,5 км/ч. Частота колебаний пальцев составляет 960-1080 циклов в минуту при амплитуде 22 мм, что позволяет бережно и качественно отделять ягоды от плодоножек.

Кинематическая схема машины предусматривает передачу крутящего момента от вала отбора мощности шасси через центральный привод к исполнительным механизмам – активатору и транспортерам. Управление агрегатом осуществляется из рабочего места оператора посредством системы рычагов, функционально связанных с механизмом сцепления, трансмиссией, тормозной системой, гидросистемой и двигателем. Подъемное устройство обеспечивает перевод рабочей рамы из транспортного положения в рабочее и обратно, а также служит несущей основой для навесных узлов [10, 11].

Процесс сбора ягод начинается с подготовки плантации. Формирователь в виде двух секций (правой и левой) с почвокопирующими колесами придает кустам конфигурацию, оптимальную для взаимодействия с рабочим органом. Активатор для отделения ягод от плодоножек оснащен эксцентриковым вибратором. Вращение передается на шарнирно подвешенные валы активатора, оснащенные ступицами с гибкими пальцами. Свободная посадка ступиц на осях позволяет им автономно ориентироваться под воздействием реакции ветвей куста. Это обеспечивает перемещение точки приложения вибрации вдоль ветви и интенсифицирует процесс осыпания ягод.

Отделившийся ворох поступает на лотки улавливателей и далее на поперечные транспортеры, которые перегружают ягоду на продольные транспортеры. Для стабилизации положения ветвей в зоне действия пневматической системы очистки над транспортерами установлены поддерживающие

ремни. Сепарация примесей осуществляется методом аспирации на скатном лотке в месте перегрузки вороха с продольных транспортеров.

Система затаривания размещена на разгрузочной платформе, предназначенной для работы операторов и размещения тары. Операторы устанавливают ящики под загрузку, по мере заполнения тара перемещается в кассеты. Заполненные кассеты агрегат следует на поворотную полосу для замены на свободную. Машина адаптирована для эксплуатации на плантациях с шириной междурядий 2,5-3,0 м [11].

Повторные государственные испытания МПЯ-1 на Пушкинской МИС в июле-августе 1975 г. проводились на производственных плантациях подсобного хозяйства «Непецино», Коломенского района, Московской области (рис. 10).



Рис. 10. Машина МПЯ-1 во время испытаний на Пушкинской МИС, 1975 год

Fig. 10. MPYa-1 berry harvester during trials at the Pushkin Machine Testing Station, 1975

За время испытаний машиной МПЯ-1 было собрано 7000 кг ягод, полнота отделения ягод в диапазоне 94,8-98,3%, полнота улавливания 84,1-89,1%, среднее повреждение ягод 4,6%.

По результатам государственных испытаний было рекомендовано произвести опытную партию, а дальнейшее совершенствование следовало направить на повышение надежности узлов и механизмов. При использовании комбайна МПЯ-1 производительность труда по сравнению с ручным способом уборки урожая повысилась в 73 раза.

В 1975 г. были проведены сравнительные испытания (табл. 2) ягодоуборочных комбайнов МПЯ-1, КК-1 (Болгария) и Pattenden (Великобритания).

Экспериментально обоснованный режим работы активатора с частотой вибрации 15-17 Гц (960-1080 циклов/мин) и амплитудой 20-25 мм позволил достичь резонансного эффекта отделения ягод, минимизируя механические повреждения растений. Именно данная конфигурация рабочего органа обеспечила баланс между высокой полнотой съема (до

Таблица 2

Table 2

**АГРОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ МАШИН МПЯ-1, КК-1, PATTENDEN, ИСПЫТАНИЯ 1975 ГОДА**  
**AGROTECHNICAL PERFORMANCE INDICATORS OF THE МРУА-1, КК-1, AND PATTENDEN HARVESTERS IN THE 1975 FIELD TRIALS**

Показатель	МПЯ-1	КК-1	МПЯ-1	КК-1	МПЯ-1	Pattenden
	Сорт Голубка		Сорт Богатырь		Сорт Победа	
Продолжительность сбора, с	4,0	4,0	4,0	4,0	3,3	9
Полнота съема, %	95,8	73,7	97,9	95,7	95,9	97,7
Полнота улавливания, %	88,4	81,0	83,5	78,4	87,1	83,6
Потери ягод, %: на кусте упавшие на землю	4,2	12,3	2,1	4,3	4,1	2,3
	11,6	15,5	16,5	21,6	12,9	16,4
Содержание примесей, %	0,68	0,4	1,2	0,4	2,1	9,2
Повреждение растений, %: обдиры коры поломка годовалых побегов поломка плодоносящих ветвей поломка скелетных ветвей поломка плодовых почек	Нет	9,4	4,73	9,4	2,22	8,8
	7,4	26,8	1,18	8,5	2,2	8,8
	4,7	9,5	4,73	7,65	0,85	14,2
	—	—	1,59	9,74	—	5,8
	7,1	12,6	4,61	12,6	1,28	2,26

97,9%) и щадящим режимом эксплуатации насаждений, что подтвердило целесообразность массового производства установки и долгосрочной эксплуатации в промышленных плантациях.

**Выводы.** Многолетние поисковые исследования и испытания рабочих органов показали, что наиболее эффективным и перспективным техническим решением стал горизонтально расположенный активатор непрерывного действия с вертикальным расположением пальцев. В отличие от схем с предварительным разделением куста горизонтальная компоновка активатора обеспечила оптимальное проникновение пальцев в крону и равномерную передачу колебаний на все плодоносящие зоны скелетных ветвей.

По результатам сравнительных испытаний в 1975 г. ягодоборочный комбайн МПЯ-1 продемонстрировал высокие агротехнические показатели работы в условиях промышленных насаждений смородины. По полноте съема ягод 95,8-97,9% МПЯ-1

существенно превосходит болгарский комбайн КК-1 (73,7-95,7%) и сопоставим с британской моделью *Pattenden* (97,7%).

Полнота улавливания ягод МПЯ-1 в пределах 83,5-88,4% также выше конкурентов. Содержание примесей в собранной массе 0,68-2,1% значительно ниже, чем у *Pattenden* (9,2%). Повреждение растений при сборе урожая с помощью МПЯ-1 наименьшие: поломки плодоносящих ветвей и плодовых почек соответственно 0,85-4,73 и 1,28-7,1% наименьшие из сравниваемых машин. Комбайн МПЯ-1 позволил повысить производительность труда по сравнению с ручным сбором в 73 раза.

В целом МПЯ-1 по комплексу агротехнических показателей не уступал, а по ряду параметров превосходил зарубежные аналоги. С 1980 по 1984 г. было произведено 143 комбайна МПЯ-1, а в период 1988-1991 гг. выпущено 225 его дальнейших модификаций МПЯ-1А и МПЯ-1Б.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перекопский А.Н., Зыков А.В., Егорова К.И. Оценка сортов смородины чёрной на пригодность к комбайновой уборке // *Аграрный научный журнал*. 2021. N7. С. 35-39. DOI: 10.28983/asj.y2021i7pp35-39.
2. Утков Ю.А., Сорокопудов В.Н., Медведев С.М. Механизированный сбор ягод смородины черной в России и новые подходы к оценке пригодности сортов к машинному воздействию // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. N7. С. 139-144. EDN: VMCIUG.
3. Utkov Yu.A. An effective assistant in manual harvesting of currant berries: history and prospects. *Journal of Agriculture and Environment*. 2019. Vol. 2. N10. DOI: 10.23649/jae.2019.2.10.5.
4. Ценч Ю.С., Курбанова Е.С. Приоритеты развития сельскохозяйственной техники СССР в период с 1950 по 1970 год // *Технический сервис машин*. 2022. N4(149). С. 158-170. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-158-170.
5. Ценч Ю.С., Маслов Г.Г., Трубилин Е.Г. К истории развития сельскохозяйственной техники // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2018. N3(47). С. 117-123. DOI: 10.31563/1684-7628-2018-47-3-117-123.
6. Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Утков Ю.А. и др. Этапы создания смородиноборочных машин в России // *История науки и техники*. 2020. N1. С. 3-17. DOI: 10.25791/intstg.01.2020.1124.
7. Мордасова М.С. Развитие средств механизации ручного сбора ягод в России и за рубежом // *Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2026. N215. С. 229-240. DOI: 10.21515/1990-4665-215-030.

8. Бычков В.В., Довгенко Л.Д., Мирочник М.Б. Особенности эксплуатации комбайна МПЯ-1 // *Садоводство*. 1985. N2. С.22-23.
9. Бычков В.В., Кадыкало Г.И., Утков Ю.А., Шевкун В.А. Отечественные ягодоуборочные комбайны // *Плодоводство и ягодоводство России*. 2014. Т. 38. N1. С. 57-66. EDN: RQRCLV.
10. Бычков В.В., Кадыкало Г.И., Успенский И.А., Четвертаков А.В. Механизованная уборка ягод и уход за плантациями смородины // *Тракторы и сельхозмашины*. 2010. N1. С. 18-21.
11. Бычков В.В., Кадыкало Г.И. Современные тенденции механизированной уборки ягод // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2008. N2. С. 23-25.

#### REFERENCES

1. Perekopskiy A.N., Zykov A.V., Egorova K.I. Evaluation of black currant varieties suitability for combine harvesting. *Scientific Agricultural Journal*. 2021. N7. 35-39 (In Russian). DOI: 10.28983/asjy2021i7pp35-39.
2. Utkov Yu.A., Sorokopudov V.N., Medvedev S.M. Mechanized picking of berries of black currant in Russia and new approaches to the assessment of the suitability of varieties to mechanical impact. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2018. N7. 139-144 (In Russian). EDN: VMCIUG.
3. Utkov Yu.A. An effective assistant in manual harvesting of currant berries: history and prospects. *Journal of Agriculture and Environment*. 2019. Vol. 2. N10 (In English). DOI: 10.23649/jae.2019.2.10.5.
4. Tsench Yu.S., Kurbanova E.S. Priorities for the development of agricultural machinery of the USSR in the period from 1950 to 1970. *Machinery Technical Service*. 2022. N4(149). 158-170 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-158-170.
5. Tsench Yu.S., Maslov G.G., Trubilin E.G. To the history of agricultural machinery development. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2018. N3(47). 117-123 (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2018-47-3-117-123.
6. Smirnov I.G., Khort D.O., Utkov Yu.A. et al. Stages of creation of currant harvesting machines in Russia. *History of Science and Technology*. 2020. N1. 3-17 (In Russian). DOI: 10.25791/intstg.01.2020.1124.
7. Mordasova M.S. Development of mechanization tools for manual berry harvesting in Russia and abroad. *Scientific Journal of KubSAU*. 2026. N215. 229-240 (In Russian). DOI: 10.21515/1990-4665-215-030.
8. Bychkov V.V., Dovgenko L.D., Mirochnik M.B. Features of MPYa-1 combine operation. *Sadovodstvo*. 1985. N2. 22-23 (In Russian).
9. Bychkov V.V., Kadykalo G.I., Utkov Yu.A., Shevkun V.A. Domestic berry harvesting combines. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2014. Vol. 38. N1.57-66 (In Russian). EDN: RQRCLV.
10. Bychkov V.V., Kadykalo G.I., Uspenskii I.A., Chetvertakov A.V. New mechanization means for berries harvesting and maintenance of plantations. *Tractors and Agricultural Machines*. 2010.N1. 18-21 (In Russian).
11. Bychkov V.V., Kadykalo G.I. Trends mechanized harvesting berries. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2008. Vol. 2. 23-25 (In Russian).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Заявленный вклад соавторов:

Филиппов Р.А. – сбор и анализ литературных данных, подготовка текста;

Смирнов И.Г. – общее научное руководство, разработка теоретических предпосылок.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Coauthors' contribution:

Filippov R.A. – collection and analysis of literature data, manuscript preparation;

Smirnov I.G. – overall scientific supervision, development of theoretical framework.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2026

15.05.2026

EDN: BBCDCV

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-85-92

Научная статья  
УДК 631.4: 94(47).084.8

## Годы Великой Отечественной войны в становлении современной агрофизики

**Александра Федоровна Смык,**  
доктор физико-математических наук, доцент,  
e-mail: afsmyk@mail.ru;

**Елена Анатольевна Гусева,**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
e-mail: forsh@list.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** В статье рассмотрена деятельность Агрофизического научно-исследовательского института в первое десятилетия с момента его создания. (*Цель исследования*) Впервые изучены и обобщены архивные материалы о работе Агрофизического института в период блокады Ленинграда с осени 1941 года по 1944 год. (*Материалы и методы*). Историко-научное исследование основано на отчетах о работе Агрофизического института, которые хранятся в Центральном государственном архиве научно-технической документации (ЦГАНТД СПб), а также на опубликованных монографиях и статьях, связанных с работой отечественных ученых в условиях блокады Ленинграда. (*Результаты и обсуждения*) Систематизированы сведения о ключевых ученых института и их вкладе в развитие агрофизической науки, указаны научные группы по тематике задач, ведущие ученые. Сотрудники института вели самоотверженную работу по решению практических задач сельского хозяйства и обороны города. (*Выводы*) Институт не только продолжал разработки по гидрофобной земле и теории водно-тепловых процессов в почве, но и в условиях Предуралья успешно проводил производственные испытания ранее созданных агротехнических решений. Существенным показателем нормализации научной жизни стало завершение подготовки кандидатских и докторских диссертаций, а также издание обобщающих монографий, в которых были подведены итоги довоенных исследований.

**Ключевые слова:** Агро-Физический институт, А.Ф. Иоффе, Н.И. Вавилов, Великая Отечественная война, блокада Ленинграда.

■ **Для цитирования:** Смык А.Ф., Гусева Е.А. Годы Великой Отечественной войны в становлении современной агрофизики // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 85-92. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-85-92. EDN: BBCDCV.

Scientific article

## The Years of the Great Patriotic War in the Development of Modern Agrophysics

**Alexandra F. Smyk,**  
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,  
e-mail: afsmyk@mail.ru;

**Elena A. Guseva,**  
Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: forsh@list.ru

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The article examines the activities of the Agrophysical Research Institute during the first decade following its establishment. (*Research purpose*) The study aims to examine and summarize, for the first time, archival materials on the activities of the Agrophysical Institute during the Siege of Leningrad, from autumn 1941 to 1944. (*Materials and methods*) The historical and scientific study is based on reports documenting the activities of the Agrophysical Institute stored in the Central State Archive of Scientific and Technical Documentation of St. Petersburg, as well as on published monographs and articles concerning the work of Russian scientists during the Siege of Leningrad. (*Results and discussion*) The study systematizes information on the institute's key scientists and their contributions to the development of agrophysical science. It identifies research groups according to their subject areas and leading researchers. The institute's staff carried out dedicated work aimed at solving practical problems in agriculture and the city's defense. (*Conclusions*) The institute not only continued its research on hydrophobic soils and the theory of water and heat transfer processes in soils, but also successfully carried out production trials of previously developed agrotechnical solutions in the Cis-Ural region. The completion of Candidate and Doctoral dissertations, together with

the publication of comprehensive monographs summarizing the results of pre-war research, became an important indicator of the normalization of scientific life.

**Keywords:** Agrophysical Institute, A.F. Ioffe, N.I. Vavilov, Great Patriotic War, Siege of Leningrad.

■ **For citation:** Smyk A.F., Guseva E.A. The years of the Great Patriotic War in the development of modern agrophysics. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 85-92 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-85-92. EDN: BBCDCV.

**А**грономическая физика как область знаний, сформировавшаяся на основе интеграции в единую систему естественнонаучных методов и законов и агрономической науки и практики, создавалась в СССР в 1930-е годы. У ее истоков стояли выдающиеся академики Абрам Федорович Иоффе (1880-1960) и Николай Иванович Вавилов (1887-1943). 24 июня 1930 г. Н.И. Вавилов подал наркому земледелия Я.А. Яковлеву записку «Некоторые соображения о ближайшем будущем развития сельского хозяйства в СССР». В записке на фоне основных государственных мероприятий в деревне – коллективизации и механизации нарисовал картину будущего освоения пространств Сибири, Дальнего Востока и Казахстана для расширения посевных площадей и решения зерновой проблемы в короткое время.

Н.И. Вавилов писал: «Чтобы планировать, нужно знать, и знать очень многое. Планировать в нашей стране особенно трудно, ибо для этого нужно обладать поистине огромными знаниями – знаниями и дифференцированными, конкретными в применении к отдельным районам, областям, и в то же время знаниями синтетическими, в масштабе всей обширной страны. [...] Отсюда совершенно исключительное значение приобретает в ближайшее время организация широкой исследовательской работы в области сельского хозяйства, создание таких условий, чтобы наука могла не только следить за жизнью, но и идти впереди нее» [1, с. 36].

С использованием методов и достижений физики, математики и биологии необходимо было обеспечить переход от описательной агрономии к науке, основанной на измерениях, теориях роста и развития растений, функционирования агроэкологических систем, физических и физико-химических процессов в системе почва–растение–деятельный слой атмосферы.

Н.И. Вавилов как президент ВАСХНИЛ пригласил возглавить новый институт Абрама Федоровича Иоффе, который уже в стенах руководимого им Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ) инициировал агрофизические исследования. Физико-агрономический институт был организован решением коллегии Народного комиссариата земледелия СССР от 5 января 1932 г. и согласно протоколу президиума ВАСХНИЛ № 89 от 7

января и приказа по институту № 1 от 17 января того же года входил в систему ВАСХНИЛ. Постановление коллегии Наркомзема СССР об организации научно-исследовательского института Агро-Физики было подписано 9 января 1932. В 1934 г. институт был переименован в Агрофизический институт (АФИ). Первоначально институт был создан и функционировал с использованием технологической и лабораторной базы ЛФТИ и с привлечением для работы его сотрудников и ученых. В 1932-1939 гг. АФИ располагался в помещениях Физико-технического института (Ленинград, Лесной, Сосновка, 2). Директором АФИ на протяжении 28 лет, с 1932 по 1960 г., был А.Ф. Иоффе.

В первом десятилетии деятельности института были сформированы научные лаборатории, развернуты фундаментальные работы по физическим методам исследования характеристик почвы, светофизиологии, измерительным приборам. В начале Великой Отечественной войны институт перестроился на военную тематику, часть сотрудников ушли на фронт и в ополчение.

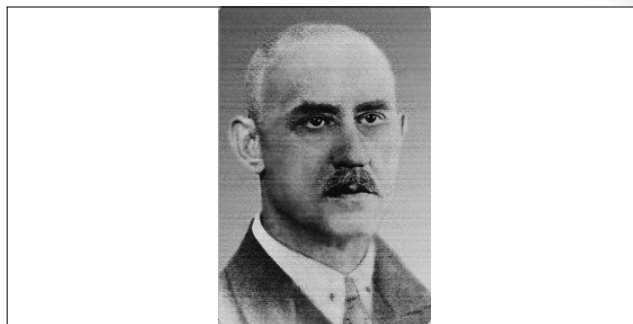
В августе 1941 г. А.Ф. Иоффе как директор ЛФТИ с частью сотрудников был эвакуирован в Казань. Эвакуация Агрофизического института тоже была не полная, большинство сотрудников остались в блокадном Ленинграде, выполняя работы по военным заказам. Героический труд коллективов научно-исследовательских институтов до сих пор остается малоизученной темой. Долгое время книги А.В. Кольцова и Г.Л. Соболева были единственными о работе ученых в блокадном Ленинграде [2, 3]. О деятельности АФИ в военные годы опубликованы лишь фрагментарные сведения.

**Цель исследования.** Изучить историю становления Агрофизического института в первое десятилетие с момента создания с 1932 по 1944 г. На основании архивных документов проанализировать деятельность института в 1941-1944 гг.

**Материалы и методы.** В ходе исследования привлекались как общенаучные методы и принципы, так и принципы исторического исследования: сравнительно-исторический, ретроспективный. Материалами для анализа стали документы из Центрального государственного архива научно-технической документации (ЦГНТД СПб), монографии и научные публикации, посвященные периоду становления АФИ.



Федор Ефремович Колясев (1898-1958)  
Fedor Efremovich Kolyasev (1898-1958)



Владимир Павлович Мальчевский (1886-1942)  
Vladimir Pavlovich Malchevsky (1886-1942)

**Результаты и обсуждение.** В 1930-1940-е годы в Агрофизическом институте работали выдающиеся ученые, которые заложили основы современной агрофизики: академик и первый директор института А.Ф. Иоффе, академик Н.А. Максимов, доктор физико-математических наук Б.П. Александров, доктора сельскохозяйственных наук П.В. Вершинин, Ф.Е. Колясев, В.П. Мальчевский, многие известные физики, почвоведы, физиологи растений, биофизики. Труды этих ученых определили развитие агрофизики на десятилетия вперед.

В рассматриваемый период научная работа в институте проводилась по четырем главным направлениям:

- светофизиология и светокультура растений;
- физика, биофизика и теплофизика почв;
- применение изотопов в сельскохозяйственной науке и производстве
- искусственное структурообразование и воссоздание почвенной структуры [4-8].

Научная работа охватывала как фундаментальные проблемы (физика почв, светофизиология), так и прикладные задачи (искусственное структурообразование, защита почв от эрозии), а впоследствии и внедрение полупроводниковых приборов [9-11].

Через четыре года после образования Агрофизического института в отчете о работе были представлены практические результаты: созданы искусственные почвенные структуры, битумная эмульсия для закрепления песков, прозрачная пленка для защищенного грунта, разработаны метод стимуляции искусственным светом семян и рассады, методики определения влажности почвы, измерения лучеиспускания, созданы радиационный термометр, ультрафиолетовые фотометры, нефелометр, генератор ионов, пиранометр, специальные источники света и фильтры для растений [12].

В 1939-1940-е годы полным ходом проводились исследования и опыты в полевых условиях по темам: физический режим почв, тепловой баланс почвы, искусственное структурообразование почв, закрепление песков пустыни и полупустыни, битум-

ная одежда на оросительные сети в песках, культура растений при искусственном свете (создание светоизмерительных приборов), негорючая ацетатная пленка, энергетика микроклимата (теория радиационного заморозка), аэрационный способ посадки картофеля [13].

**Зимний период 1941-1942 года.** Начавшаяся война радикально изменила характер и условия научной деятельности института. С июля 1941 г. институт переключился на оборонную тематику и работал по заданию специальной комиссии Ленинградского горкома ВКП(б). Был предложен ряд рационализаторских решений в оборонном строительстве: в течение ноября и декабря 1941 г. интенсивно исследовались вопросы о применении гидрофобной земли, а также разработки физических приборов и материалов оборонного назначения [14]. Согласно приказу по институту № 86 от 11.12.1941 г. во исполнение Постановления Ленгорсовета и Военного совета Ленинградского фронта произведена частичная консервация института (Ленинград, Мойка, д. 87).

В январе 1942 г. условия резко меняются, от недоедания и холода (температура в зиму 1941 г. опускалась ниже 41 °С) умирают сотрудники. О погибших сообщает в своем отчете Федор Ефремович Колясев, до эвакуации работавший заместителем директора АФИ: «С этого времени голодная смерть вырывает как основных работников ФАИ, так и прикомандированных решением Лен. совета для выполнения оборонных работ». В конце декабря гибнет зав. лабораторией пленки кандидат наук Федоров, руководивший оборонным применением ацетил-целлюлозной пленки, и кандидат наук Покровский (светотехника). В январе умерли кандидат физических наук (агроном в прошлом) Богомолов, давший ряд капитальных работ по движению тепла в почве, руководитель работ по применению битума в оборонном и сельскохозяйственном деле кандидат наук Бонасевич, зав. экспериментальными мастерскими Богданов. В феврале гибнет ст. научный сотрудник Доброхотова (светофизиология) и в марте руководитель работ по светокультуре и



Мария Константиновна Мельникова (1902-1987)  
 Maria Konstantinovna Melnikova (1902-1987)



Валентина Абрамовна Иоффе (1910-1985)  
 Valentina Abramovna Ioffe (1910-1985)

светофизиологии профессор Шынчевский. «Одновременно выбывают и прикомандированные в ФАИ: кандидат наук Воскресенский, сдавший накануне своей смерти исчерпывающий отчет по изучению физико-механических свойств гидрофобной земли, кандидат наук Артемьев, исследовавший стойкость гидрофобной земли против биологических факторов» [14, с. 1].

В газете «Известия» 3 октября 1941 г. сообщалось о том, что ученые Физико-агрономического института под руководством профессора Ф.Е. Колясева разработали технологический процесс и предложили способы производства новых гидроизоляционных материалов в заводском масштабе. В лаборатории светобиологии, возглавляемой профессором В.П. Мальчевским, велись исследования по выращиванию овощей при электрическом освещении в условиях осени и зимы [2].

Несмотря на катастрофические условия, голод и гибель сотрудников, научная деятельность института полностью не прекращается.

«Должен отметить подлинный героизм работников СНИГГИМа (указанный выше т. Воскресенский, доктор Мисаринов, кандидат Гейтман), кандидатов Благовидова и Немчинова, которые в январе месяце, находясь в больнице по причине крайнего истощения, все же не прерывали работы, стараясь обработать накопленный цифровой материал. Исключительный энтузиазм и упорство в работе в этот период проявили: кандидат физических наук В.А. Иоффе (Технологический институт им. Молотова) и доктор физических наук Палеев (Ленинградский политехнический институт): благодаря им освоен завод Дормоста по изготовлению гидрофобной земли для оборонного и гражданского строительства, как и ранее освоен завод «Кооператор» в гор. Пушкине. Таким образом, ввиду срыва плановой эвакуации основных сотрудников ФАИ, совместно с оборудованием, назначенной на 21-е августа 1941 года ФАИ лишился основных кадров и возможности продуктивной работы на оборону на ближайшее время» [14, с. 2].

Валентина Абрамовна Иоффе, дочь академика

А.Ф. Иоффе, оставалась в Ленинграде и всю блокаду работала по оборонной тематике. «Первое время ею были проведены работы по борьбе с танками противника и по получению гидрофобных, водонепроницаемых материалов. Она организовала завод по получению гидрофобной земли в Пушкине, применявшейся при возведении оборонных рубежей. Завод изготовил сотни тонн материала. В.А. Иоффе и ее сотрудники А.В. Фролов, В.К. Афанасьев, Р.Н. Стрельцына (студентка ЛПИ) покинули завод только после того, как он был разрушен снарядами вражеской артиллерии. С 1942 г. В.А. Иоффе с успехом выполняла работы по защите боевых кораблей и другие специальные задания» [15].

Положение ленинградцев в то страшное время можно определить одной авторской фразой: «Быт блокадного Ленинграда в январе 1942 года не поддается описанию». И определяющей, конечно, была массовая смертность. «Январь 1942 г., в котором ежедневно умирали 3-4 тысячи человек, был самым страшным месяцем блокады...», – пишет Г.Л. Соболев, основываясь на анализе документальных источников [16, с. 242].

**Эвакуация и работа на УЗЛОС (1942-1944 гг.).** В 1942 г. группа сотрудников Агрофизического института эвакуируется в Карагайский район Пермского края на Менделеевскую опытную станцию, где организуется филиал института – Менделеевская группа.

Еще в 1899 г. Д.И. Менделеев рекомендовал пермским земским деятелям создать специальное опытное поле, где можно культивировать сорта злаковых культур, наглядно показать местному населению выгоды культурного земледелия. Это небольшое опытное поле в честь ученого стало называться Менделеевским, железнодорожная станция тоже стала Менделеевской.

Пермскому краю (Молотовская область) во время войны довелось стать крупнейшим центром эвакуации из города на Неве. На территории Карагайского района были размещены Всесоюзный научно-исследовательский институт льна (ВНИИЛ) и Всесоюзный Агрофизический институт. «Эти ин-

ституты имеют в своем составе 28 человек профессоров, докторов, кандидатов наук и старших научных сотрудников, 34 человека младших научных сотрудников, лаборантов и техников» [17, с. 153].

В конце февраля 1942 г. АФИ эвакуировался на ст. Менделеевская на базу Уральской зональной льняной опытной станции (УЗЛОС), где продолжил свою деятельность. Исполняющим обязанности директора опытной станции был назначен Ф.Е. Колясев. Он с самого начала организации АФИ и до конца своих дней оставался профессором института.

17 и 19 января 1942 г. из Ленинграда выехали две группы научных и технических сотрудников института. Из-за сильного истощения многим пришлось остаться на лечение в медицинском стационаре в Ярославле. Работа технического персонала института была приостановлена. «В течение марта месяца невозможно было думать о какой-то бы ни было работе, так как сотрудники передвигались с трудом. Условия, которые встретили сотрудники и их семьи на УЗЛОС были отчаянные. Отсутствие пищи, воды, дров, теснота помещений, невозможность купить что-либо вновь ставила под угрозу оставшихся в живых сотрудников.

В результате сообщений Обкому ВКП(б) и областным организациям положение со снабжением было выправлено и с мая месяца сотрудники были включены в плановое снабжение по городским нормам. Другое положение, грозящее срывом работ, заключалось в отсутствии технических условий: отсутствие электричества, освещения, служебных помещений, реактивов, операционных средств (первый аванс был получен только в конце мая). Однако чувство ответственности за сохранение остатков коллектива, патриотические чувства сотрудников и сплоченность в преодолении трудностей позволили с апреля месяца начать кое-какие плановые работы.

Работа в апреле, мае и июне 1942 года нарастала по интенсивности. При следующем составе сотрудников: Колясев, Солечник, Михайлов, Карфункель, Лобанова, пом. директора по хоз. части Васильев, лаборант Николаева и практикант Созинова» [14, с. 4].

В 1942 г. были начаты внеплановые работы, связанные с военным положением страны: «Гидрофобная земля и ее применение» (В.А. Карфункель) и «Искусственные корма из отходов сельскохозяйственного производства» (Н.Я. Солечник, Г.П. Михайлов). Как следует из отчета, при выполнении данных работ была оказана помощь областных организаций [14].

В 1943 г. выполнение научно-исследовательских и опытных полевых работ также затруднялось слабой материальной базой: недостатком рабочих рук, тягловой силы, горючего, служебных помещений,

оборудования, воды, электроэнергии. Штат института не был полностью укомплектован из-за отсутствия квалифицированных специалистов. Несмотря на это, план научных исследований, утвержденный ВАСХНИЛ на 1943 г., был выполнен, за исключением темы «Разработка звукового метода определения пористости (скважности) почвы» из-за отсутствия оборудования [18].

Прорабатывались темы: гидрофобная земля и ее применения в оборонном и сельскохозяйственном строительстве; хранение и сушка незрелого зерна; производственное испытание аэрационного метода посадки картофеля; агротехническая оценка послонной обработки почвы; сохранение влаги в почве; разработка агротехники высокостабильных кулис для яровых посевов.

Кроме того проводились внеплановые работы: искусственные корма из отходов сельского хозяйства; применение мылонафта в качестве инсекто-фунгицида. В условиях войны повышение урожайности было особенно важным. Вопрос обеззараживания посевного материала для улучшения качества семян и последующего урожая в военное время стоял очень остро. В институте были начаты испытания фунгицидных свойств мылонафта в отношении культуры льна, так как работа производилась на базе льняной опытной станции. В зависимости от результатов планировалось в 1944 г. продолжить испытания на других культурах [19].

К 1944 г. была налажена работа четырех лабораторий: водной, тепловой, микроклимата, гидроизоляции. Лаборатория свето-физиологии и лаборатория пленки оставались временно законсервированными по условиям военного времени [18]. Институт работал по темам: сохранение влаги в почве (руководитель Ф.Е. Колясев); повышение всхожести семян физическими методами (руководитель Г.П. Михайлов); разработка новых гидроизоляционных материалов (руководитель Н.Я. Солечник); улучшение микроклимата сельскохозяйственных культур (руководитель В.П. Кислов); разработка портативной физической аппаратуры для измерения влажности и температуры зерна при его хранении (руководитель Б.П. Александров).

Работы на базе УЗЛОС проводились в двух направлениях. С одной стороны, институт продолжил разработку, изыскание и апробацию новых видов гидроизоляции на основе гидрофобной земли, а также разработку теории движения воды в почве и почвенного испарения. С другой стороны, на УЗЛОС было организовано производственное испытание в условиях Предуралья тех новых агротехнических приемов, которые были разработаны в институте в прежние годы [14, 19].

Помимо плановых тем коллектив института выполнил ряд внеочередных исследований, вытекающих

из условий военной жизни: искусственные корма, повышение всхожести семян зерновых культур [20].

В целях использования грубых кормов в животноводстве был предложен горячий метод известкования соломы, апробированный на стаде молочных коров близлежащего совхоза. Полученные результаты (прибавка молока 1,75 л/сут на корову) дали основания для широкого внедрения горячего известкования соломы в практику. С этой целью была составлена инструкция по приготовлению и применению, она была передана в Молотовское областное земельное управление. Также проводилась работа по обогащению белками концентрированных и грубых кормов для свиней. Оказывалась существенная помощь местным колхозам и совхозам в обработке почвы и посевах.

В 1944 г. институт оказал научную помощь по применению гидрофобной земли, особенно при производстве кирпичей и черепицы, в строительстве по меньшей мере 100-200 хозяйствам.

По вопросу повышения качества семян зерновых культур было рассмотрено влияние кратковременного замораживания на всхожесть. Установлены условия влажности, температуры и продолжительности при очистке и сортировке семян, способы и продолжительность прогревания семян весной (влияние зимнего прогревания и просушивания семян на повышение их всхожести).

Ученые Агрофизического института (АФИ) в годы Великой Отечественной войны готовили диссертационные работы, в них систематизировали новые результаты исследований. Так, в 1944 г. в эвакуации на базе Уральской зональной льняной опытной станции были подготовлены к защите одна кандидатская и шесть докторских диссертаций. Кроме этого были подготовлены к печати монография В.П. Мальчевского «Материалы по свето-физиологии растений», подводящая итоги довоенных исследований, и монография Ф.Е. Колясева «О факторах движения воды в почве» [21].

По постановлению Совнаркома СССР от 8 января 1945 г. Агрофизический институт возобновил свою деятельность в Ленинграде.

**Выводы.** Великая Отечественная война радикально изменила как характер научной работы, так и условия ее осуществления. Агрофизический институт оказался в ситуации резкой утраты кадров, срыва плановой эвакуации, вынужден был продолжать действовать в блокадном Ленинграде, а после эвакуации функционировал в условиях дефицита материальных, технических и человеческих ресурсов.

Наиболее трагичным и одновременно героическим этапом стала зима 1941/1942 г. Коллектив, продолжая научную деятельность, выполнял оборонные задания, чтобы обеспечить внедрение новых материалов, приборов, технологий, прежде всего по применению гидрофобной земли, светотехническим и теплотехническим направлениям.

Эвакуация АФИ в Молотовскую область в 1942 г. сопровождалась тяжелым переездом, суровыми условиями труда и быта. Институту удалось сохранить ядро научных кадров и восстановить исследовательскую деятельность. В 1943 г. при ограниченной материально-технической базе институт в целом выполнил план по критически важным темам: сохранению влаги в почве, повышению урожайности, разработке новых агротехнических приемов, поиску заменителей дефицитных химических средств.

Значительная часть этих работ имела прикладной характер с ориентацией на немедленное внедрение в производство. Продолжая разработки по гидрофобной земле и теории водно-тепловых процессов в почве, институт успешно проводил производственные испытания ранее созданных агротехнических решений в условиях Предуралья. Показателем нормализации научной жизни к 1944 г. и возвращению из эвакуации стали подготовка кандидатских и докторских диссертаций, а также издание монографий, подводящие итоги довоенных исследований.

В условиях на грани физического выживания советские ученые сумели сохранить научную школу, обеспечить выполнение жизненно важных оборонных и хозяйственных задач, заложить основу послевоенного развития.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баутин В.М., Глазко В.И. Н.И. Вавилов как организатор науки // *Известия ТСХА*. 2012. Вып. 1. С. 214.
2. Кольцов А.В. Учёные Ленинграда в годы блокады 1941-1943 гг. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 142 с.
3. Соболев Г.Л. Учёные Ленинграда в годы Великой Отечественной войны. 1941–1945 гг. М.; Л.: Наука, 1966. 171 с.
4. Усков И.Б., Якушев В.П., Чесноков Ю.В. Агрофизический институт: от физических исследований к практике растениеводства (1932-2017) // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. №3. С. 429-436.
5. Усков И.Б., Якушев В.П., Чесноков Ю.В. Агрофизический институт: междисциплинарные и многопрофильные исследования для практики земледелия и растениеводства (1932–2022). 90 лет Агрофизического института как история приоритетных достижений в отечественной и мировой агрофизической науке // *Сельскохозяйственная биология*. 2022. Т. 57. №3. С. 403-424.
6. Глобус А.М. Агрофизический институт: 75 лет на пути к точному земледелию. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН,

2007. 112 с.
7. Смык А.Ф., Гусева Е.А., Форш Е.А. История современной агрономической физики: вклад и значение работ А.Ф. Иоффе // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N4. С. 150-156. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-96-102.
  8. Смык А.Ф., Гусева Е.А., Форш Е.А. «Признанный отец советской физики» – создатель отечественной агрофизики // *Журнал Российского национального комитета по истории и философии науки и техники*. 2023. Т. 1. N1. С. 137-156.
  9. Максимов Н.А. Краткий курс физиологии растений. 2-е изд., испр. и доп. М.; Л.: Сельхозгиз. 1931.
  10. Колясев Ф.Е., Вершинин П.В. Метод искусственного образования структуры почвы. М.; Л.: Сельхозгиз. 1935.
  11. Вершинин П.В. Физико-химические основы искусственной структуры почв // *Научные труды Агрофизического института*. Л.: 1935.
  12. Иоффе А.Ф. Отчёт о работе Физико-технического института // *Успехи физических наук*. 1936. Т. 16. Вып. 7. С. 847-871.
  13. Обзор работы института за 1942 г. // ЦГАНТД СПб. Ф. Р-328. Оп. 11. Д. 28. 28 л.
  14. Отчёт о научно-исследовательской работе за 1-е полугодие 1942 г. // ЦГАНТД СПб. Ф. Р-328. Оп. 11. Д. 29. 23 л.
  15. Валькова О.А. Ленинградские женщины-учёные в обороне своего любимого города. Документальная публикация // *Журнал Российского национального комитета по истории философии науки и техники*. 2025. Т. 3. Вып. 3. С. 46-63. DOI: 10.62139/2949-608X-2025-3-3-46-63.
  16. Соболев Г. Л. Ленинград в борьбе за выживание в блокаде. Кн. 1: июнь 1941 – май 1942. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2013. 696 с.
  17. Деятельность академических групп (Куйбышевской, Молотовской и Свердловской) в период Великой Отечественной войны // *Вестник Академии наук СССР*. 1945. N5-6. С. 152-155.
  18. Отчёт о научно-исследовательской работе за 1-е полугодие 1944 г. ЦГАНТД СПб. Ф. Р-328. Оп. 11. Д. 39. 93 л.
  19. Отчёт о научно-исследовательской работе за 1943 г. ЦГАНТД СПб. Ф. Р-328. Оп. 11. Д. 34. – 55 л.
  20. Тематический план научно-исследовательских работ на 1944 г. ЦГАНТД СПб. Ф. Р-328. Оп. 11. Д. 37. 29 л.
  21. Колясев Ф.Е. О факторах движения воды в почве // *Почвоведение*. 1944. N2-3. С. 80-86.

## REFERENCES

1. Bautin V.M., Glazko V.I. N.I. Vavilov as an organizer of science. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2012. Issue 1. 214 (In Russian).
2. Koltsov A.V. Scientists of Leningrad during the siege of 1941-1943. М.; L.: USSR Academy of Sciences, 1962. 142 (In Russian).
3. Sobolev G.L. Scientists of Leningrad during the Great Patriotic War. 1941-1945. М.; L.: Nauka. 1966. 171 (In Russian).
4. Uskov I.B., Yakushev V.P., Chesnokov Yu.V. Agrophysical Institute: from physical research to the practice of crop production (1932-2017). *Agricultural Biology*. 2017. Vol. 52. N3. 429-436 (In Russian).
5. Uskov I.B., Yakushev V.P., Chesnokov Yu.V. Agrophysical Institute: interdisciplinary and multidisciplinary research for the practice of agriculture and crop production (1932-2022). 90 years of the Agrophysical Institute as a history of priority achievements in Russian and world agrophysical science. *Agricultural Biology*. 2022. Vol. 57. N3. 403-424 (In Russian).
6. Globus A.M. Agrophysical Institute: 75 years on the way to precision agriculture. St. Petersburg: Institute of Nuclear Physics of the RAS. 2007. 112 (In Russian).
7. Smyk A.F., Guseva E.A., Forsh E.A. History of modern agronomy physics: contribution and significance of A.F. Ioffe works. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N4. 96-102 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-96-102.
8. Smyk A.F., Guseva E.A., Forsh E.A. «The recognized father of Soviet physics» – the creator of Russian agrophysics. *Journal of the Russian National Committee for the History and Philosophy of Science and Technology*. 2023. Vol. 1. N1. 137-156 (In Russian).
9. Maksimov N.A. A short course in plant physiology. 2nd ed., ispr. and add. М.; L.: Selkhozgiz. 1931 (In Russian).
10. Kolyasev F.E., Vershinin P.V. Method of artificial formation of soil structure. М.; L.: Selkhozgiz. 1935 (In Russian).
11. Vershinin P.V. Physico-chemical foundations of artificial soil structure // *Scientific works of the Agrophysical Institute*. L.: 1935 (In Russian).
12. Ioffe A.F. Report on the work of the Institute of Physics and Technology. *Advances in Physical Sciences*. 1936. Vol. 16. Iss. 7. 847-871 (In Russian).
13. Review of the Institute's work for 1942. TSGANTD SPb. F. R-328. Op. 11. D. 28. 28 l (In Russian).
14. Report on research work for the 1st half of 1942. TSGANTD SPb. F. R-328. Op. 11. d. 29. 23 l (In Russian).
15. Valkova O.A. Women scientists of Leningrad in defense of their beloved city (documentary publication). *Journal of the Russian National Committee for the History and Philosophy of Science and Technology*. 2025. Vol. 3. Iss. 3. 46-63 (In Russian). DOI: 10.62139/2949-608X-2025-3-3-46-63.
16. Sobolev G.L. Leningrad in the struggle for survival in the blockade. Book 1: June 1941 – May 1942. St. Petersburg: St. Petersburg University. 2013. 696 (In Russian).
17. Activities of academic groups (Kuibyshev, Molotov and

- Sverdlovsk) during the Great Patriotic War. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences*. 1945. N5-6. 152-155.
18. Report on scientific research work for the 1st half of 1944. TSGANTD SPb. F. R-328. Op. 11. D. 39. 93 l (In Russian).
19. Report on scientific research work for 1943. TSGANTD SPb. F. R-328. Op. 11. D. 34. 55 l (In Russian).
20. The thematic plan of scientific research for 1944. TSGANTD SPb. F. R-328. Op. 11. D. 37. 29 l (In Russian).
21. Kolyasev F.E. On the factors of water movement in the soil. *Soil Science*. 1944. N2-3. 80-86 (In Russian).

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

**Заявленный вклад соавторов:**

Смык А.Ф. – научное руководство, постановка задачи исследования;

Гусева Е.А. – сбор материалов и его систематизация.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Coauthors' contribution:**

Smyk A.F. – scientific guidance, formulating the research problem

Guseva E.A. – collection and systematization of the material.

*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

02.04.2026  
15.05.2026