



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 публика-
ции трудов соискателей ученых степе-
ней кандидата и доктора наук по специ-
альностям: 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 распростра-
няется под лицензией Creative Commons
Attribution 4.0 License. Нарушение 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

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 воз-
вращаются и не рецензируются.

Выходит 4 раза в год
(Свободная цена)
Дата выхода в свет 15.09.2025
Формат 60 x 90/8. Объем 10,5 печ.л.
Тираж 500 экз
Отпечатано в типографии
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2025

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

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

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

Михаил Никитиевич 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

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

Йошисукэ 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

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 производства, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 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 «Механизации садоводства и овощеводства» Научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства Республики Узбекистан, г. Карши, Кашкадарьинская область, Республика Узбекистан

Юлия Сергеевна Ценц

доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Российской академии наук, заместитель директора по образовательной и редакционно-издательской деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация, 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

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



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

[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 Makhalek

Dr.Sc.(Eng.), Director of the Agricultural Machinery Research Institute, 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. Chernov

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 15.09.2025.

The format is 60 x 90/8. The volume is 10.5 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**

- Бахадиров Г.А., Умаров Б.Т., Турсуналиев И.Э.**
Кинематический и динамический анализ механизма машины для сортировки картофеля грохотного типа . . . 4
- Литвинов М.А., Курбанов Р.К., Захарова Н.И., Кривко С.И.**
Обоснование параметров точности позиционирования системы управления БВС в условиях закрытого грунта 10
- Черников В.Г., Соловьёв С.В., Романенко В.Ю., Перов Г.А.**
Технологические способы повышения долговечности льноуборочных машин 17
- Московский М.Н., Герасименко С.А., Хамуев В.Г., Борзенко С.И.**
Сепарация шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с колонковыми и батарейными ускорителями 24
- Пархоменко Г.Г., Подлесный Д.С., Камбулов С.И., Рыков В.Б., Полушкин О.А.**
Обоснование параметров размещения новых рабочих органов на раме парового культиватора 30
- Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П., Шаров В.В., Алдошин Н.В.**
Исследование эффекта продольного перемещения модели почвенного пласта 37

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ САДОВОДСТВА

- Чиликин А.Д., Хорт Д.О.**
Оптимизация параметров освещения в процессе съемки модуля оптической идентификации 43
- Саад Р., Ахмад А., Исса М., Халил Х., Смирнов И.Г.**
Нелинейное управление двухосевой платформой 51

ЭКОЛОГИЯ

- Джаббаров Н.И., Добринов А.В., Шамонин В.И.**
Оценка негативного влияния технологических процессов в растениеводстве на окружающую среду . . . 59

РАЗВИТИЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ

- Попов Д.В., Миронов Д.А., Ценч Ю.С.**
Эволюция проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин 66
- Сидоров И.В.**
Становление инфраструктуры химизации отечественного сельского хозяйства 74

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- Bahadirov G.A., Umarov B.T., Tursunaliyev I.E.**
Kinematic and dynamic analysis of the mechanism of a vibrating screen type potato sorting machine 4
- Litvinov M.A., Kurbanov R.K., Zakharova N.I., Krivko S.I.**
Validation of the positioning accuracy parameters of the UAV control system in controlled-environment agriculture 10
- Chernikov V.G., Solovyov S.V., Romanenko V.Yu., Perov G.A.**
Technological methods for increasing flax harvester durability 17
- Moskovsky M.N., Gerasimenko S.A., Khamuev V.G., Borzenko S.I.**
Purification of sunflower meal in a vertical pneumatic channel using column-type and battery-type air accelerators 24
- Parkhomenko G.G., Podlesny D.S., Kambulov S.I., Rykov V.B., Polushkin O.A.**
Justification of the parameters for arranging new working bodies on the frame of a steam cultivator 30
- Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P., Sharov V.V., Aldoshin N.V.**
Effect of longitudinal displacement of the soil layer model 37

GARDENING VEHICLES AND TECHNOLOGIES

- Chilikin A.D., Hort D.O.**
Optimization of lighting parameters for imaging with the optical identification module 43
- Saad R., Ahmad A., Issa M., Khalil H., Smirnov I.G.**
Nonlinear control of dual-axis platform 51

ECOLOGY

- Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., Shamonin V.I.**
Assessment of the negative environmental impact of technological processes in crop production 59

DEVELOPMENT OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

- Popov D.V., Mironov D.A., Tsench Yu.S.**
Evolution in the design of working tools for tillage machines 66
- Sidorov I.V.**
Development of the infrastructure for agricultural chemization in Russia 74



Кинематический и динамический анализ механизма машины для сортировки картофеля грохотного типа

Гайрат Атаханович Бахадиров¹,
 доктор технических наук, профессор,
 e-mail: instmech@rambler.ru;

Бехзод Тургунпулатович Умаров¹,
 кандидат технических наук, доцент,
 e-mail: bexzodumarov@mail.ru;

Исмоил Эсоналиевич Турсуналиев²,
 докторант,
 e-mail: tursunaliyevismoil@gmail.com

¹Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан;

²Ферганский государственный технический университет, г. Фергана, Республика Узбекистан

Реферат. Отметим, что сортировка представляет собой ключевой технологический этап производства картофеля. Минимизации повреждения клубней выступает основным критерием оценки эффективности сортировочных машин с эластичным покрытием рабочих поверхностей для снижения ударных нагрузок. (*Цель исследования*) Провести кинематический и динамический анализ механизма привода рабочего оборудования сортировочной машины *Tolsma* для оценки эксплуатационных характеристик в условиях картофелеводческого кластера *AGROVER* (Ташкентская область, Республика Узбекистан). (*Материалы и методы*) Методология направлена на оценку инерционных нагрузок, критичных с точки зрения минимизации повреждения клубней при сортировке, что согласуется с проблемой повышения качества работы машины. (*Результаты и обсуждение*) Проведен графический анализ вертикальной силы, действующей на клубни при колебаниях грохотов машины, показал. Как показал анализ, направление этой силы преимущественно совпадает с силой тяжести, что приводит к «забиванию» клубней в отверстия рабочей поверхности. Минимальная величина отталкивающих сил не обеспечивает эффективного перемещения продукции, усиливая риск повреждения из-за деформации эластичных покрытий и овальной формы клубней, которые действуют как клин. Установлено, что даже дополнительные механизмы не устраняют полностью проблему снижения производительности и травмирования клубней, связанную с инерционными нагрузками и геометрией грохотов. (*Выводы*) Результаты подтверждают выводы кинематического и динамического моделирования. Инерционные силы, возникающие при ускоренном движении грохотов, критически влияют на взаимодействие клубней с рабочими поверхностями, в связи с этим требуется оптимизация параметров сортировочной машины. **Ключевые слова:** сортировка овощей, калибровка, механизм, кинематика, динамика, грохот, инерционная сила, повреждение клубней.

■ **Для цитирования:** Бахадиров Г.А., Умаров Б.Т., Турсуналиев И.Э. Кинематический и динамический анализ механизма машины для сортировки картофеля грохотного типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. №3. С. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-4-9. EDN: UYGNLZ.

Scientific article

Kinematic and Dynamic Analysis of the Mechanism of a Vibrating Screen Type Potato Sorting Machine

Gayrat A. Bahadirov¹,
 Dr.Sc.(Eng.), professor,
 e-mail: instmech@rambler.ru;

Bexzod T. Umarov¹,
 Ph.D.(Eng.), associate professor,
 e-mail: bexzodumarov@mail.ru;

Ismoil E. Tursunaliyev²,
 Ph.D.(Eng.) student,
 e-mail: tursunaliyevismoil@gmail.com

¹Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbaev of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan;

²Fergana State Technical University, Fergana, Republic of Uzbekistan

Abstract. Potato and onion sorting is a key technological stage in their production process. Minimizing tuber damage is a key criterion for evaluating the efficiency of sorting machines equipped with elastic coatings on their working surfaces designed to reduce impact loads. (*Research purpose*) The study aims to conduct kinematic and dynamic analysis of the drive mechanism of the Tolsma sorting machine's working unit to assess its performance under the operating conditions of the AGROVER potato production cluster (Tashkent region, Republic of Uzbekistan). (*Materials and methods*) The methodology focuses on evaluating inertial loads which are critical to minimizing tuber damage during sorting, aligning with the broader goal of improving the machine efficiency. (*Results and discussion*) A graphic analysis was conducted to examine the vertical force acting on tubers during screen oscillation. The results show that the direction of this force closely aligns with gravity, leading to tuber clogging within the holes of the working surface. The minimal repulsive forces fail to ensure efficient produce movement, increasing the risk of damage due to elastic coating deformation and the oval shape of the tubers, which act as wedges. Even additional mechanisms do not fully resolve the problems of reduced productivity and tuber damage associated with inertial loads and screen geometry. (*Conclusions*) The findings support the results of kinematic and dynamic modeling. Inertial forces generated by the accelerated movement of the screens critically affect tubers-surfaces interaction, necessitating machine parameters optimization. **Keywords:** vegetable sorting, grading, mechanism, kinematics, dynamics, screen, inertial force, damage.

For citation: Bahadirov G.A., Umarov B.T., Tursunaliyev I.E. Kinematic and dynamic analysis of the mechanism of a vibrating screen type potato sorting machine. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 4-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-4-9. EDN: UYGNLZ.

В мире требования к качественным характеристикам продовольственных продуктов постоянно растут. В последние годы принят ряд документов, направленных на упорядочение качества сельскохозяйственной продукции, в частности картофеля и репчатого лука, где четко указаны требования к их характеристикам, включая размеры. Также установлен способ калибровки картофеля путем прохождения клубней через квадратные отверстия определенного размера, а калибровка лука – по максимальному поперечному диаметру [1, 2].

В Центральной Азии (в частности, Узбекистане и Казахстане) на предприятиях и кластерах, специализирующихся на выращивании и переработке картофеля и лука, широко применяются калибровочные машины иностранного производства (*Grimme*, *Schouten* и *Tolsma*), рабочие органы которых имеют квадратные отверстия. Наиболее распространены модели *Tolsma* благодаря компактности и простоте конструкции, надежности по сравнению с другими типами, однако они имеют несколько недостатков. Наряду с общим для всех калибровочных машин застреванием клубней в отверстиях, специфической проблемой машин *Tolsma* является частый выход из строя муфты вала, передающего движение на рабочее оборудование, а также быстрое изнашивание и разрыв ремней привода [3-5]. На данный момент обслуживают эти машины преимущественно иностранные компании, и основные причины неисправностей, а также структура их механизмов не были изучены.

Цель исследования. Провести кинематический и динамический анализ механизма, приводящего в движение рабочее оборудование машины *Tolsma*, используемой в картофелеводческом кластере *AGROVER* (Ташкентская обл.). В результате анали-

за можно сделать вывод о взаимодействии между рабочей поверхностью машины и клубнями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Рабочее оборудование машины состоит из нескольких (на рисунке 1 их пять, но может быть и три) взаимно параллельных и расположенных друг над другом грохотов, которые с обеих сторон прикреплены к раме машины с помощью двух коромысел. При запуске машины коромысло получает движение от кривошипно-шатунного механизма, и грохоты начинают колебаться вместе с коромыслом. Поскольку грохоты обладают определенной массой и совершают вращательное движение с ускорением, в них возникают инерционные силы и моменты инерционных сил, которые, в свою очередь, передаются на другие части машины. Также взаимодействие между клубнями и грохотами, движущимися с ускорением, усложняется. Для полного изучения процесса требуется кинематический и динамический анализ механизма машины. Поскольку все грохоты имеют одинаковые размеры и прикреплены к раме одинаковым образом, на начальном этапе проведен кинематический анализ только одного грохота.



Рис. 1. Калибровочная машина *Tolsma*

Fig. 1. *Tolsma* grading machine

Схема механизма передачи движения на грохот машины и траектории движения его звеньев показана на рисунке 2.

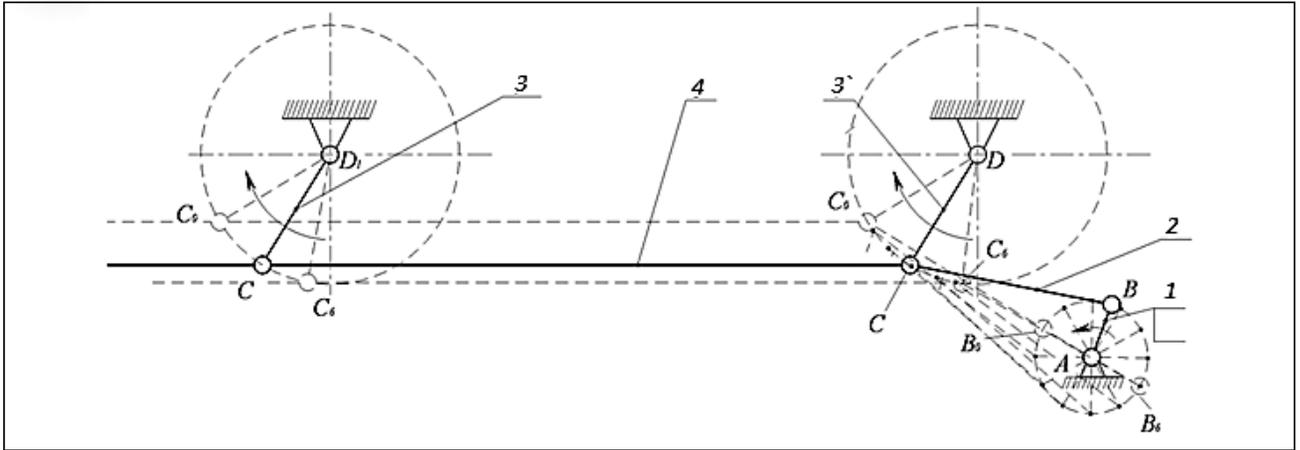


Рис. 2. Механизм передачи движения на грохот сортировочной машины: 1 – кривошип; 2 – шатун; 3, 3' – коромысло; 4 – грохот;

Fig. 2. Diagram showing the mechanism of transmitting motion to the sorting machine screen: 1 – crank; 2 – connecting rod; 3, 3' – rocker; 4 – screen

Степень подвижности механизма равна 1, т.е. его состояние можно выразить через положение кривошипа.

В механизме рабочим звеном является грохот, он прикреплен с обеих сторон к опоре через два коромысла одинаковой длины, расположенные под одинаковым углом относительно вертикали, и совершает возвратно-поступательное движение. Для кинематического анализа движения грохота достаточно изучить движение любой его точки C .

Кинематику этой точки C , которая относится к грохоту (поскольку точки сопряжения коромысел и грохота расположены друг над другом, и обозначены одной буквой C на рис. 2), будем анализировать с использованием аналитического метода (метод замкнутых контуров вектора) (рис. 3).

$$\varphi_4 = \arccos \frac{l_3^2 - l_2^2 - l_1^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_2 - l_4^2}{2l_4 \sqrt{l_2^2 + l_1^2 - 2l_1l_2 \cos \varphi_2}} - \arctan \frac{l_2 \sin \varphi_2}{l_1 - l_2 \cos \varphi_2} \quad (1)$$

Поскольку определить первую и вторую производную функции (1) по обобщенной координате φ_2 сложно, целью кинематического анализа движения точки C является лишь понимание природы инерционных сил, то движение точки C будет рассматриваться графическим методом, а закон ее движения можно восстановить с использованием метода интерполяции.

Учитывая, что в схемах на рисунках 2 и 3 начальное положение кривошипа принято с разницей в 30° , получаем следующие выражения:

$$v_c = 78 \sin(\varphi_2 - 30), \quad (2)$$

$$a_c = 78 \cos(\varphi_2 - 30). \quad (3)$$

Основная цель кинематического анализа механизма заключается в определении величины и направления инерционных сил в его ключевых точ-

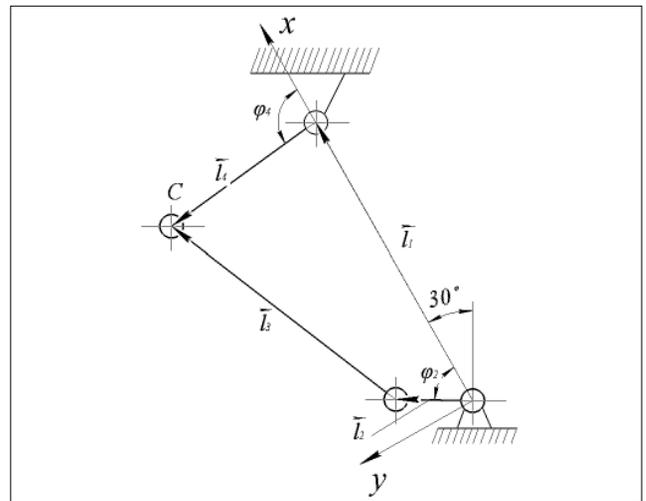


Рис. 3. Замкнутый контур векторов

Fig. 3. Closed vector loop

ках, обладающих массой. Массу грохота машины и обрабатываемых продуктов m примем за сосредоточенную массу в точке C и определим действующие на нее силы.

На точку C (рис. 4) действуют:

- сила тяжести $\vec{F}_{og'} = m\vec{g}$, (4)
- сила, направленная противоположно нормальному ускорению (центробежная)

$$\vec{F}_n = m\vec{a}_n = m \frac{v_c^2}{l_4} = m \frac{6084 \sin^2(\varphi_2 - 30)}{l_4}, \quad (5)$$

- инерционная сила, направленная противоположно тангенциальному ускорению

$$\vec{F}_i = m\vec{a}_\tau = m\vec{a}_c = m78 \cos(\varphi_2 - 30). \quad (6)$$

Известно, что в возвратно-поступательном движении все точки тела имеют одинаковую кинематику. Силы (4)-(6) также действуют на элементы (т.е. клубни), расположенные на рабочей поверхности.

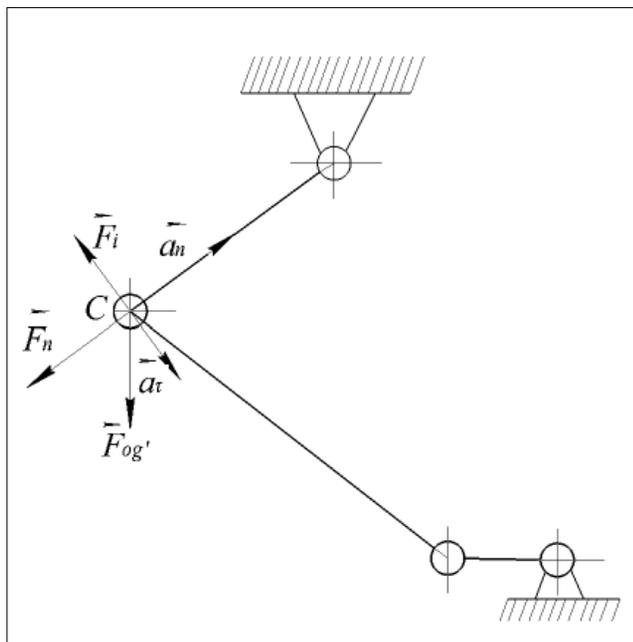


Рис. 4. Силы, действующие на точку C
Fig. 4. Forces acting on point C

Определим силы, действующие на клубни в вертикальном направлении:

- вертикальная составляющая инерционной силы, возникающая за счет тангенциального ускорения, будет:

$$\vec{F}_{iv} = 78m \cos(\varphi_2 - 30) \cos(\varphi_4 - 60); \quad (7)$$

- вертикальная составляющая инерционной силы, возникающая за счет нормального ускорения:

$$\vec{F}_{nv} = m \frac{6084 \sin^2(\varphi_2 - 30)}{l_4} \cos(150 - \varphi_4); \quad (8)$$

- общая вертикальная сила, действующая на клубень в вертикальном направлении:

$$\vec{F}_{iv} = \vec{F}_{iv} + \vec{F}_{nv} + \vec{F}_{ог'iv}. \quad (9)$$

Результаты и обсуждение. На основе геометрических и кинематических параметров сортировочной машины получим график изменения вертикальной силы в зависимости от φ_2 (рис. 5): $l_1 = 0,4$ м, $l_2 = 0,09$ м, $l_3 = 0,3$ м, $l_4 = 0,2$ м, $\omega_2 = 25$ рад/с, $0 \leq \varphi_2 \leq 2\pi$.

Вертикальные силы, действующие на клубень за один оборот кривошипа, направлены в основном вниз (рис. 5). Прыжковое движение частицы вдоль грохота обусловлено частью сил, лежащих ниже горизонтальной оси. Эта сила, отталкивающая клубень от грохота, почти не видна на рисунке 5, поскольку она очень мала по сравнению с силой, толкающей клубень к грохоту.

Самым большим недостатком рассматриваемого типа машин является то, что клубни застревают под действием инерционных сил в рабочем оборудовании машины, и высок риск их повреждения.

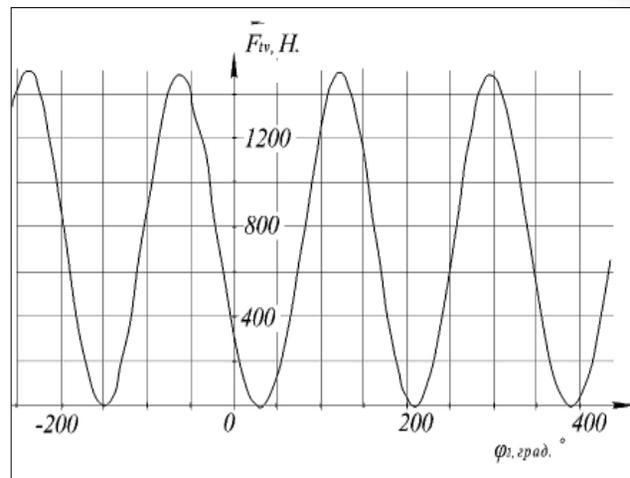


Рис. 5. Изменение вертикальной силы, действующей на клубни, в зависимости от состояния кривошипа, при этом масса клубня условно получена $m = 0,1$ кг

Fig. 5. Variation of the vertical force acting on the tubers depending on the crank position, with the tuber mass conditionally set to $m = 0.1$ kg.

Так как отверстия рабочего органа – грохота выполнены из эластичного материала, а картофельные и луковые клубни также деформируются под воздействием внешних сил, то клубень «забивается» в отверстия ударом за счет вертикального действия инерционных сил. Для устранения этого недостатка на машине установлен дополнительный механизм, что, однако, не исключает полностью «забивания» клубней в отверстия.

Из-за овальной геометрической формы клубни, поперечный размер которых больше размера отверстия, будут как «клин» входить в отверстия, когда их длинная ось перпендикулярна плоскости грохота. Этот дефект существенно влияет на производительность машины, увеличивая риск повреждения продукции в процессе сортировки и снижая проницаемость сортировочной поверхности. Полностью устранить застревание клубней картофеля дополнительными техническими средствами невозможно [6, 7].

Выводы

Грохотные сортировочные машины, разработанные компанией *Tolsma*, имеют ряд преимуществ. Однако именно при сортировке картофеля основным критерием, определяющим качество машины, являются показатели повреждения клубней в этом технологическом процессе [8-14]. Исследования показывают, что при сортировке на грохотных машинах повреждение клубней повышается. Поэтому основная цель дальнейших исследований состоит в устранении факторов, вызывающих повреждение клубней при сортировке на таких машин, с сохранением других преимущественных характеристик машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bahadirov G., Sultanov T., Umarov B., Bakhadirov K. Advanced machine for sorting potatoes tubers. *IOP Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 883. 012132. DOI: 10.1088/1757-899x/883/1/012132.
2. Bahadirov G., Umarov B., Obidov N. et al. Justification of the geometric dimensions of drum sorting machine. *IOP Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 937. N3. 032043. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032043.
3. Nie J., Wang Y., Li Y., Chao X. Artificial intelligence and digital twins in sustainable agriculture and forestry: a survey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2022. Vol. 46. N5. 5. DOI: 10.55730/1300-011X.3033.
4. Дорохов А.С., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Автоматизированная линия для послеуборочной обработки корнеплодов и картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 22-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-22-26.
5. Иванов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П. и др. Повышение эффективности грохотных картофелесортирующих машин путем совершенствования привода с модификацией алгоритма движения решет // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 13-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-13-19.
6. Крюков М.Л., Зернов В.Н., Калинин Г.А. и др. Технология уборки и транспортировки семенного картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N1. С. 24-30. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-11-2-24-30.
7. Jia Sh., Liu G., Jia J., Yang T. Development and application of the intelligent seed processing technology and equipment. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15(4). 24-28. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-24-28.
8. Khan R. Artificial intelligence and machine learning in food industries: A study. *J Food Chem Nanotechnol*. 2022. Vol. 7. N3. 60-67. DOI:10.17756/jfcn.2021-114.
9. Danielak M., Przybył K., Koszela K. The need for machines for the nondestructive quality assessment of potatoes with the use of artificial intelligence methods and imaging techniques. *Sensors*. 2023. Vol. 23. N4. 1787. DOI: 10.3390/s23041787.
10. Haverkort A.J., Struik P.C., Linnemann A.R., Wiskerke J.S.C. On processing potato 3: survey of performances, productivity and losses in the supply chain. *European Potato Journal*. 2023. Vol. 66. N2. 385-427. DOI: 10.1007/s11540-022-09576-7.
11. Cortiello M., Sanfelici A., Milc J.A., Martini S. Genotype and plant biostimulant treatments influence tuber size and quality of potato grown in the pedoclimatic conditions in Northern Apennines in Italy. *International Journal of Plant Production*. 2024. 18(36). 1-21. DOI: 10.1007/s42106-024-00311-5.
12. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Система машин как фактор научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. N4. С. 67-72. DOI: 10.31857/S250026272404012.
13. Измайлов А.Ю., Колчин Н.Н., Лобачевский Я.П., Кынев Н.Г. современные технологии и специальная техника для картофелеводства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N3. С. 43-47. EDN: TTLVUJ.
14. Orlando Guerrero I. J. et al. Embedded vision system controlled by dual multi-frequency tones. *Proceedings ICITA*. 2023. 593-603. DOI: 10.1007/978-981-19-9331-2_51.

REFERENCES

1. Bahadirov G., Sultanov T., Umarov B., Bakhadirov K. Advanced machine for sorting potatoes tubers. *IOP Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 883. 012132 (In English). DOI: 10.1088/1757-899x/883/1/012132.
2. Bahadirov G., Umarov B., Obidov N. et al. Justification of the geometric dimensions of drum sorting machine. *IOP Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 937. N3. 032043 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032043.
3. Nie J., Wang Y., LI Y., Chao X. Artificial intelligence and digital twins in sustainable agriculture and forestry: a survey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2022. Vol. 46. N5. 5 (In English). DOI: 10.55730/1300-011X.3033.
4. Dorokhov A.S., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Automated line for post-harvest processing of root crops and potatoes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N1. 22-26 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-22-26.
5. Ivanov A.G., Erokhin M.N., Kazantsev S.P. et al. Improving the efficiency of screen type potato sorting machines by a modification of the sieve drive movement algorithm. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 13-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-13-19.
6. Kryukov M.L., Zernov V.N., Kalinkin G.A. et al. Seed potatoes harvesting and transportation technology. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. Vol. 2. 24-30 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-2-24-30.
7. Jia Sh., Liu G., Jia J., Yang T. Development and application of the intelligent seed processing technology and equipment. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15(4). 24-28 (In English). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-24-28.
8. Khan R. Artificial intelligence and machine learning in food industries: A study. *J Food Chem Nanotechnol*. 2022. Vol. 7. N3. 60-67 (In English). DOI: 10.17756/jfcn.2021-114.
9. Danielak M., Przybył K., Koszela K. The need for machines for the nondestructive quality assessment of potatoes with the use of artificial intelligence methods and imaging techniques. *Sensors*. 2023. Vol. 23. N4. 1787 (In English). DOI: 10.3390/s23041787.
10. Haverkort A.J., Struik P.C., Linnemann A.R., Wiskerke J.S.C. On processing potato 3: survey of performances, productivity and losses in the supply chain. *European*

- Potato Journal*. 2023. Vol. 66. N2. 385-427 (In English). DOI: 10.1007/s11540-022-09576-7.
11. Cortiello M., Sanfelici A., Milc J.A., Martini S. Genotype and plant biostimulant treatments influence tuber size and quality of potato grown in the pedoclimatic conditions in Northern Apennines in Italy. *International Journal of Plant Production*. 2024. 18(36). 1-21 (In English). DOI: 10.1007/s42106-024-00311-5.
 12. Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P. The machine system as a factor of scientific and technological progress in agro-industrial complex. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2024. N4. 67-72 (In Russian). DOI: 10.31857/S250026272404012.
 13. Izmaylov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevskiy Ya.P., Kynev N.G. Modern technologies and special equipment for potato production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N3. 43-47 (In Russian). EDN: TTLVUJ.
 14. Orlando Guerrero I. J. et al. Embedded vision system controlled by dual multi-frequency tones. *Proceedings ICITA*. 2022. 593-603 (In English). DOI: 10.1007/978-981-19-9331-2_51.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Бахадиров Г.А. – постановка задачи, теоретический анализ, подготовка рукописи;
 Турсуналиев И.Э. – проведение экспериментов, сбор и обработка данных;
 Умаров Б.Т. – статистическая обработка результатов, редактирование текста.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Bahadirov G.A. – problem formulation, theoretical analysis, manuscript preparation;
 Tursunaliev I.E. – conducting experiments, data collection and processing;
 Umarov B.T. – statistical analysis of results, manuscript revision.
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

30.06.2025
 19.08.2025



Обоснование параметров точности позиционирования системы управления БВС в условиях закрытого грунта

Максим Алексеевич Литвинов,
кандидат технических наук,
младший научный сотрудник,
e-mail: litvvinov.max@yandex.ru;
Рашид Курбанович Курбанов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: celeba@outlook.com;

Наталья Ивановна Захарова,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: smedia@vim.ru;
Станислав Иванович Кривко,
инженер,
e-mail: stk_30@mail.ru.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что позиционирование беспилотного воздушного судна в условиях закрытого грунта возможно без применения спутниковой навигации. Внесение изменений в стандартное программное обеспечение полетного контроллера с внедрением программных блоков по обработке и дешифрации данных видеопотокового сенсора и лазерного дальномера позволяют добиться высокой точности определения координат по высоте и в плане. (*Цель исследования*) Определение параметров точности позиционирования беспилотного воздушного судна при использовании в качестве приборов для вычисления координат видеопотокового сенсора и лазерного дальномера. (*Материалы и методы*) Изучили данные, поступающие от сенсора *optical flow & LIDAR sensor 3901-LOX* в полетный контроллер беспилотного воздушного судна, полученные с помощью порта отладчика. Использовали детектор *Canny* и фильтр Гаусса для определения точных контуров контрастных объектов на горизонтальной плоскости и вычисления координат множества точек при обработке данных видеопотока, а также коэффициента их масштабирования по данным лазерного дальномера. При обработке данных исследований использованы методы математической статистики для определения погрешностей вычисления координат позиционирования. (*Результаты и обсуждения*) Установили, что полученные данные с видеопотокового сенсора и значения высоты, полученные от лазерного дальномера, обладают высокой точностью и позволяют проводить аэрофотосъемку состояния сельскохозяйственных биообъектов в условиях закрытого грунта. (*Выводы*) Определили, что программное обеспечение для обработки данных видеопотока и лазерного дальномера позволяет осуществлять аэрофотосъемку в условиях закрытого грунта с вычислением координат беспилотного воздушного судна в пространстве с точностью более 95 процентов.
Ключевые слова: сельское хозяйство, беспилотное воздушное судно, закрытый грунт, теплица, система позиционирования, видеопотоковый сенсор, лазерный дальномер, оценка функционирования, программное обеспечение.

■ **Для цитирования:** Литвинов М.А., Курбанов Р.К., Захарова Н.И., Кривко С.И. Обоснование параметров точности позиционирования системы управления БВС в условиях закрытого грунта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 10-16. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-10-16. EDN: YNSECO.

Scientific article

Validation of the Positioning Accuracy Parameters of the UAV Control System in Controlled-Environment Agriculture

Maxim A. Litvinov,
Ph.D.(Eng.), junior researcher,
e-mail: litvvinov.max@yandex.ru;
Rashid K. Kurbanov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: celeba@outlook.com;

Natalia I. Zakharova,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: smedia@vim.ru;
Stanislav I. Krivko,
engineer,
e-mail: stk_30@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper demonstrates that positioning an unmanned aerial vehicle (UAV) in controlled agricultural environments is possible without reliance on satellite navigation. Modifications to the standard flight controller software, specifically, the

integration of modules for processing and decoding data from a video stream sensor and a laser rangefinder, ensures high accuracy in determining coordinates both in height and in plan. (*Research purpose*) The study aims to determine the positioning accuracy parameters of a UAV when using a video stream sensor and a laser rangefinder as primary instruments for coordinate calculation. (*Materials and methods*) Data from the Optical Flow & LIDAR Sensor 3901-L0X, transmitted to the UAV flight controller via the debugger port, were analyzed. The Canny detector and Gaussian filter were applied to extract precise contours of high-contrast objects on a horizontal plane and to compute the coordinates of multiple points in the processed video stream. The scaling factor of these coordinates was determined based on laser rangefinder measurements. Methods of mathematical statistics were used to process the research data and calculate errors in determining positioning coordinates. (*Results and discussion*) The findings indicate that combining data from the video stream sensor with height measurements from the laser rangefinder yields high accuracy and enables aerial imaging of agricultural biological objects in greenhouse environments. (*Conclusions*) The study determined that the software for processing video stream and laser rangefinder data enables aerial imaging in greenhouse environments, achieving UAV spatial coordinate calculation accuracy exceeding 95 percent.

Keywords: agriculture, unmanned aerial vehicle, enclosed environment, greenhouse conditions, positioning system, video stream sensor, laser rangefinder, performance evaluation, software.

■ For citation: Litvinov M.A., Kurbanov R.K., Zakharova N.I., Krivko S.I. Validation of the positioning accuracy parameters of the UAV control system in controlled-environment agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 10-16 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-10-16. EDN: YNSECO.

С развитием технологий в сфере сельского хозяйства нарастает потребность в автоматизации процессов, где высок риск ошибки из-за человеческого фактора при монотонных работах и мониторинге состояния посевов [1]. Внедрение научно-технических решений в агропроцессы существенно повышает их производительность и объем выпускаемой продукции [2, 3]. В связи с этим применение роботизированных средств и беспилотных воздушных судов (БВС) в системе «умное поле» или «умная теплица» является перспективным направлением [4, 5]. Тепличные комплексы, в свою очередь, являются основным компонентом экологически чистого производства сельскохозяйственной продукции, где необходима минимизация воздействия химических средств на людей и окружающую среду [6]. Применение мини-дронов с размером рамы до 250 мм в условиях закрытого грунта и на селекционных линиях позволит автоматизировать мониторинг, анализ и уход за растениями [7, 8]. Важным фактором для выполнения полетов в пространственно ограниченных условиях остается обеспечение точного позиционирования [9, 10].

При проведении мониторинга сельскохозяйственных биообъектов ориентирование БВС в пространстве производится с помощью GPS/ГЛОНАСС навигации [11, 12]. В условиях закрытого грунта из-за наличия металлических каркасов теплиц, представляющих собой клетку Фарадея, и переотражения сигнала от спутниковой навигации снижается точность позиционирования БВС ввиду накопления ошибок при расчете положения, что может привести к дрейфованию с дальнейшим столкновением с насаждениями, элементами строений и коммуникаций, а также к аварийной посадке и

прекращению выполнения полетного задания. Использование видеопотокового сенсора и лазерного дальномера позволяет осуществлять автоматическое удержание позиции БВС в условиях закрытого грунта.

В исследовании описывается обоснование параметров точности позиционирования системы управления БВС в условиях закрытого грунта без использования GPS/ГЛОНАСС навигации.

Цель исследования – определение параметров точности позиционирования беспилотного воздушного судна при использовании в качестве приборов для вычисления координат видеопотокового сенсора и лазерного дальномера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Программное обеспечение большинства систем управления полетом БВС основано на открытом исходном коде (*INAV, Betaflight, Ardupilot, PX4*) [13]. Поскольку в документации к программному обеспечению указано только то аппаратное обеспечение, которое прошло тестирование и имеет совместимость с исходным кодом прошивки, возникают проблемы при подключении необходимых сторонних компонентов и требуется разработка собственных программных модулей, которые позволят внедрить аппаратное обеспечение, расширяющее функциональные возможности БВС [14, 15].

Для реализации задач исследования по использованию БВС в условиях закрытого грунта была разработана прошивка для полетного контроллера *HappyModel Crazybee F4 V3* [16] и программный код для обработки значений, полученных с дальномера и сырых видеоданных. Настройка аппаратного обеспечения БВС производилась в стандартном программном обеспечении *INAV Configurator*. Тестирование программного обеспечения прово-

дили на разработанном в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ беспилотном воздушном судне на основе полетно-го контроллера *Crazybee F4 PRO V3.1* (рис. 1).

Установленный на БВС полетный контроллер *Happy model Crazybee F4 V3* выступал в роли макетной платы для отладки процессов (отладчик), протекающих при вычислениях во время полета. Благодаря этому отпала необходимость в установке дополнительной обвязки на макетной плате для гироскопа, *OSD (On-Screen Display)* чипа, регулятора оборотов, *BEC (Battery Elimination Circuit)* для питания дополнительных устройств, а также отладчика для конфигуратора. Использование видеопотокового сенсора и лазерного дальномера *Matek optical flow & lidar sensor 3901-L0X* позволило осуществить автоматическое удержание позиции БВС без спутниковой навигации.

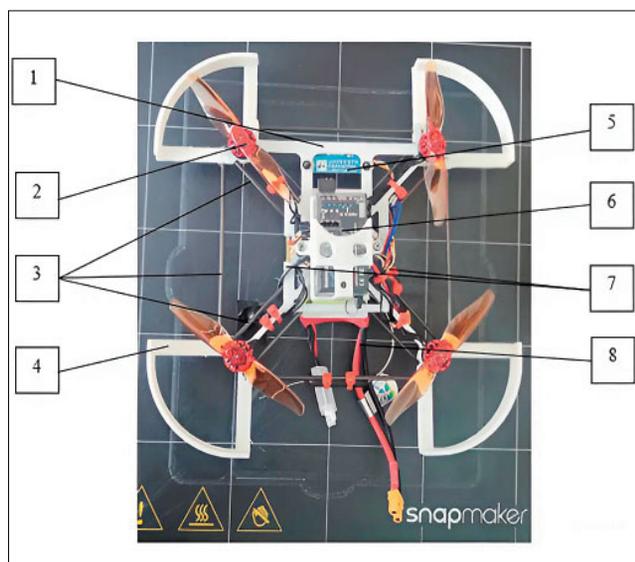


Рис. 1. Общий вид собранного квадрокоптера с размером рамы 150 мм: 1 – хребет рамы; 2 – винтомоторная группа; 3 – армирующие карбоновые прутки; 4 – защита винтомоторной группы; 5 – сенсор *optical flow & LiDAR sensor 3901-L0X*; 6 – стек приемника и полетного контроллера *AIO*; 7 – разъемы отладчика; 8 – АКБ с отсеком

Fig. 1. General view of the assembled quadcopter with a 150 mm frame size: 1 – frame backbone; 2 – motor-propeller assembly; 3 – reinforcing carbon rods; 4 – motor-propeller guard; 5 – optical flow and LiDAR sensor (3901-L0X); 6 – receiver and AIO flight controller stack; 7 – debugger connectors; 8 – battery with housing

Для оценки функционирования видеопотокового сенсора *PMW3901* была использована контрастная панель с нанесенной разметкой с шагом 50 мм, размещенная на расстоянии 50-100 см до сенсора на полу. Параллельно производилась оценка перемещения БВС в пространстве по совпадению графиков получаемого сигнала с отладчика (рис. 2).

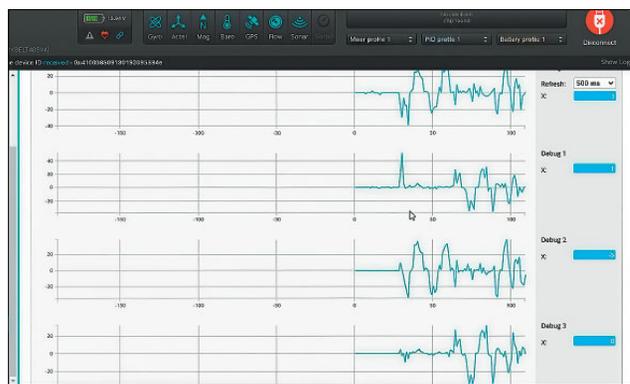


Рис. 2. Оценка функционирования видеопотокового сенсора
Fig. 2. Performance evaluation of the video stream sensor

В связи с тем, что на парных графиках соответственно *debug 0* и *debug 2*, *debug 1* и *debug 3* [17, 18] присутствует разное количество максимумов и минимумов, производили доработку кода обработки сырых видеоданных сенсора *PMW3901* и отладку детектора *Canny*.

Для подавления шума, вызывающего расхождение в графиках *debug 0* и *debug 2*, *debug 1* и *debug 3* был применен детектор *Canny*, который реагирует на границы, но при этом игнорирует ложные линии, точно определяя контур (без его фрагментирования), и реагирует на каждый из контуров один раз, что позволяет избежать восприятия широких полос изменения яркости как совокупности границ [19].

Для снижения нагрузки на микроконтроллер и повышения быстродействия видеопоток конвертировался из цветного в оттенки серого, чтобы уменьшить вычислительные затраты, а для подавления шума, использовали размываем кадром фильтром Гаусса [20]. После внедрения в программный код детектора *Canny* и фильтра Гаусса при перемещении измерительной системы относительно контрастной пластины через программу захвата видеопотока видно, что захваченный контур имеет четкие границы, на основе которых производится формирование плоскости с координатами множества точек (рис. 3).

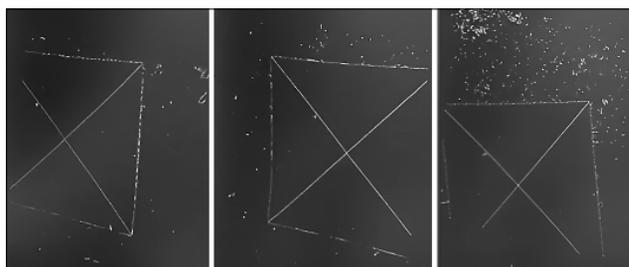


Рис. 3. Захват обработанного видеопотока с помощью детектора *Canny* с сенсором *PMW3901*
Fig. 3. Processed video stream captured using the *Canny* detector with the *PMW3901* sensor

Для интерпретирования данных об ускорении и получения измеренного полетным контроллером расстояния использовалась система уравнений коллинеарных векторов конечной скорости и пройденного пути по формуле:

$$\begin{cases} S = v_0 + \frac{a}{t} \cdot t^2, \\ v = v_0 + a \cdot t \end{cases} \quad (1)$$

где S – путь, пройденный телом, м; v – конечная скорость, м/с; v_0 – начальная скорость тела, м/с; a – ускорение тела, м/с²; t – время, за которое тело прошло этот путь, с.

При этом следует учесть, что необходимо рассматривать расстояние, пройденное на ускорении и торможении, поскольку БВС – инерциальная система и при перемещении по контрастной панели из начальной в конечную точку висения возникает сила инерции, которую необходимо погасить резким ростом ускорения торможения, в связи с чем возможны погрешности, влияющие на величину измеренного пройденного расстояния.

Средняя погрешность [21] измеренного значения пройденного пути относительно реального:

$$\Delta = \left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i^{\text{Общ}} - S_i^{\text{Реал}}}{S_i^{\text{Реал}}} \right| \right) / n, \quad (2)$$

где $S_i^{\text{Общ}}$ – сумма измеренного пройденного расстояния на разгоне и торможении, м; $S_i^{\text{Реал}}$ – реальное расстояние пройденное БВС, м; n – количество измерений.

Для валидации данных, полученных с лазерного дальномера VL53L0X, проведено исследование по измерению расстояния от плоскости пола до сенсора дальномера. Для измерений использовали линейку длиной 1 м, установленную перпендикулярно плоскости пола. Через каждые 10 см закрепляли БВС с установленным лазерным дальномером VL53L0X и отладочной платой Crazybee F4 V3.1. Результаты десяти измерений дальномера получали через отладчик на компьютере по графику высоты (рис. 4).

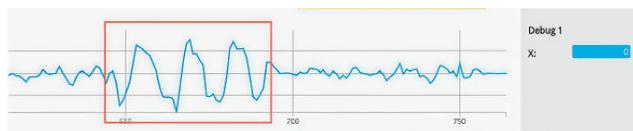


Рис. 4. Исследование по валидации данных дальномера
Fig. 4. Assessment of rangefinder data validity

Полученные данные проверяли по попаданию измерений в доверительный интервал по абсолютной погрешности. Коэффициент Стьюдента для 10 измерений и доверительной вероятности 0,95 составляет $t_p = 2,26$ [22].

Доверительный интервал определяли по формуле:

$$\Delta_p = t_p \cdot \sigma. \quad (3)$$

Относительная погрешность измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{\Delta_{\text{сп}}}, \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Через порт отладчика полетного контроллера Crazybee F4 PRO V3.1 получены графики ускорения по осям перемещения, полученных от видеопотокового сенсора PMW3901 (рис. 5). С помощью данных графиков и их интерпретации было определено пройденное расстояние, измеренное полетным контроллером.

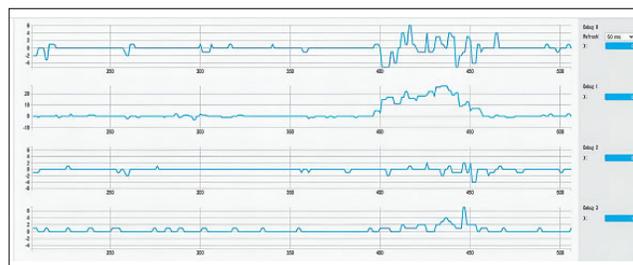


Рис. 5. Графики ускорений по осям перемещения:
 X – ускорение м/с²; Y – время, мс

Fig. 5. Acceleration plots along the movement axes:
 X – acceleration, m/s²; Y – time, ms

Данные из графика ускорения, времени и расчетов по формулам (1) и (2) приведены в сводной таблице 1.

Исходя из того, что средняя погрешность измерений составляет 1,71% и не превышает 5%-ный уровень статистической значимости, можно сделать вывод, что разработанная прошивка и программный код для видеопотокового сенсора PMW3901 способна обеспечить позиционирование БВС в условиях закрытого грунта без применения GPS/ГЛОНАСС навигации.

Результаты измерений дальномера получали также через отладчик полетного контроллера. Измерения графика высоты (рис. 4) представлены в таблице 2. Оценку доверительного интервала производили по измеренному отклонению высоты по формуле (3):

$$\Delta_p = 2,26 \cdot 0,0335 \text{ м} = 0,757 \text{ см}.$$

Наибольшее отклонение в выборке по абсолютной погрешности составляет 1,3 см, соответственно попадает в диапазон значений $1,23 \pm 0,0757$ см, а относительная погрешность, согласно формуле (4), составляет 4%. Можно сделать вывод, что разработанный программный код лазерного дальномера VL53L0X может обеспечить удержание высоты. Таким образом, БВС с системой позиционирования позволяет проводить аэрофотосъемку состояния сельскохозяйственных биообъектов в условиях закрытого грунта.

Таблица 1

Table 1

Сводные результаты измерений видеопотокового сенсора PMW3901
SUMMARY OF MEASUREMENTS FOR THE PMW3901 VIDEO STREAM SENSOR

№ п/п	$S_{\text{разг}}, \text{ м}$	$v_0, \text{ м/с}$	$a_{\text{разг}}, \text{ м/с}^2$	$t_{\text{разг}}, \text{ с}$	$S_{\text{разг}}, \text{ м}$	$v_0^{\text{торм}}, \text{ м/с}$	$a_{\text{торм}}, \text{ м/с}^2$	$t_{\text{торм}}, \text{ с}$	$S_{\text{торм}}, \text{ м}$	$S_{\text{общ}}, \text{ м}$	$\Delta, \%$
1	0,1	0	252	0,02	0,050	5,04	-250	0,020	0,051	0,101	1,20
2	0,1	0	100	0,03	0,051	3,20	-100	0,033	0,051	0,102	2,39
3	0,1	0	50	0,04	0,048	2,20	-48	0,043	0,050	0,099	1,38
4	0,1	0	60	0,04	0,050	2,46	-60	0,041	0,050	0,101	0,86
5	0,1	0	150	0,03	0,051	3,90	-150	0,025	0,051	0,101	1,32
6	0,1	0	58	0,04	0,051	2,43	-58	0,041	0,051	0,102	1,80
7	0,1	0	50	0,04	0,048	2,20	-50	0,043	0,048	0,096	3,66
8	0,1	0	66	0,04	0,050	2,57	-66	0,043	0,050	0,100	0,14
9	0,1	0	64	0,04	0,051	2,56	-64	0,041	0,051	0,102	2,35
10	0,1	0	64	0,04	0,051	2,55	-64	0,042	0,051	0,101	1,21
11	0,1	0	50	0,04	0,049	2,21	-50	0,043	0,049	0,098	2,34
12	0,1	0	67	0,04	0,049	2,57	-67	0,043	0,049	0,098	1,82
13	0,1	0	54	0,04	0,051	2,35	-54	0,042	0,051	0,103	2,54
14	0,1	0	50	0,04	0,050	2,23	-50	0,043	0,050	0,099	0,61
15	0,1	0	66	0,04	0,050	2,57	-66	0,041	0,050	0,100	0,25
16	0,1	0	51	0,04	0,049	2,23	-51	0,042	0,049	0,097	2,65
17	0,1	0	65	0,04	0,051	2,58	-65	0,041	0,051	0,102	2,36
18	0,1	0	59	0,04	0,051	2,45	-59	0,041	0,051	0,102	2,08
19	0,1	0	58	0,04	0,051	2,42	-58	0,043	0,051	0,101	1,29
20	0,1	0	52	0,04	0,049	2,25	-52	0,044	0,049	0,097	2,97
21	0,1	0	64	0,04	0,050	2,54	-64	0,042	0,050	0,101	0,70
Средняя погрешность											1,71

Таблица 2

Table 2

Измерение высоты от плоскости пола до датчика лазерного дальномера
MEASUREMENT RESULTS FOR THE HEIGHT FROM THE FLOOR PLANE TO THE LASER RANGEFINDER SENSOR

Показатель	Высота, см									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Высота по линейке, см	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Высота по графику отладчика, см	8,9	18,7	28,8	38,7	48,7	58,8	68,7	78,7	88,7	98,8
Отклонение высоты, см	1,1	1,3	1,2	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2
$\Delta_{\text{ср}}, \text{ см}$	1,23									
$\sigma, \text{ см}$	0,0335									

Выводы. Исследована система позиционирования беспилотного воздушного судна (БВС) без использования спутниковой навигации в условиях закрытого грунта. Разработанные БВС и программное обеспечение для обработки данных видеопотока и лазерного дальномера позволяет осуществлять выполнение полетного задания в теплицах и помещениях, где из-за наличия металлического

каркаса и переотражения спутникового сигнала возможны ошибки при вычислении полетным контроллером положения в пространстве.

Разработанная система позиционирования позволит выполнять автоматизированный полет с вычислением координат БВС в пространстве по горизонтальной плоскости с точностью 98,29% в плане и 96% по высоте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Nagaraja G., Shoba H., Sreedevi M.S., Krishnamma P.N. The impact of robotics and drones on agricultural efficiency and productivity. *International Journal of Research in Agronomy*. 2024. 7(9S). 1001-1009. DOI: 10.33545/2618060X.2024.v7.i9Sn.1650.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве (окончание) // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4(298). С. 2-6. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
- Rejeb A., Abdollahi A., Rejeb K., Treiblmaier H. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol.

198. 107017. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107017.
4. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
 5. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45. EDN: RLCDHO.
 6. Шарый С.В., Водолазская Н.В., Шарая О.А. Инновационные решения для тепличных комплексов // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2022. N3(35). С. 109-116. EDN: AWVCSYA.
 7. Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов // *Автоматика и телемеханика*. 2014. N2. С. 16-30. EDN: RXKJAF.
 8. Свецкий А.В. Применение искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // *Сельское хозяйство*. 2022. N3. С. 1-12. DOI: 10.7256/2453-8809.2022.3.39469.
 9. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
 10. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
 11. Nguyen N.P., Hong S.K. Position control of a hummingbird quadcopter augmented by gain scheduling. *Int J Engineering Research & Technology*. 2018. Vol. 11(10). 1485-1498.
 12. Андреев И.П., Замятин А.Ю., Иванов А.В. Особенности выполнения НИР «Комплексные исследования методов и технологий применения отечественной электронной компонентной базы в беспилотных авиационных системах и средствах их наземного управления» // *Славянский форум*. 2023. N3(41). С. 428-455. EDN: CUWDDUA.
 13. Федупин А.М., Дрягин Д.М. Перспективы применения крупноразмерных БПЛА при решении задач комплексного обследования территорий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2021. N1(218). С. 271-281. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-271-281.
 14. Jing Y., Wang X., Heredia-Juesas J. et al. PX4 Simulation results of a quadcopter with a disturbance-observer-based and pso-optimized sliding mode surface controller. *Drones*. 2022. 6(9). 261. DOI: 10.3390/drones6090261.
 15. Ivashko V., Krulikovskiy O., Haliuk S., Samila A. Review of operating systems used in unmanned aerial vehicles. *Informatics, Control, Measurement in Economy and Environment Protection*. 2025. Vol. 15(1). 95-100. DOI: 10.35784/iarpog.6786.
 16. Литвинов М.А., Куприн А.А. Применение беспилотных воздушных систем в сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2023. N6. С. 28-35. DOI: 10.33920/sel-10-2306-03.
 17. Ковалев И.В., Лосев В.В., Сарамуд М.В. и др. К вопросу формирования блочно-модульной структуры системы управления беспилотных летательных объектов // *Современные инновации, системы и технологии*. 2021. Т. 1. N3. С. 54-71. DOI: 10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64.
 18. Данилова С.Д. Разработка модели визуальной одометрии на основе сенсоров и анализа видеопотока // *Computational Nanotechnology*. 2024. Т. 11. N1. С. 36-47. DOI: 10.33693/2313-223X-2024-11-1-36-47.
 19. Али Б., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // *Гироскопия и навигация*. 2022. Т. 30. N4(119). С. 87-105. DOI: 10.17285/0869-7035.00105.
 20. Конаныхин А.Ю., Конаныхина Т.Н., Панищев В.С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстродействующей обработке символьной информации // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11. N4. С. 106-119. DOI: 10.21869/2223-1536-2021-11-4-106-119.
 21. Чикмарев А.Д. Сравнение критериев идентификации математических моделей при решении измерительных задач // *Измерительная техника*. 2022. N8. С. 41-45. DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-8-41-45.
 22. Иванищев Ю.Г., Давыдов В.М., Старцев Н.А. Возможности использования доверительного интервала при принятии параметров нормализованной модели // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2021. N1(60). С. 35-48. EDN: WLPUGL.

REFERENCES

1. Nagaraja G., Shoba H., Sreedevi M.S., Krishnamma P.N. The impact of robotics and drones on agricultural efficiency and productivity. *International Journal of Research in Agronomy*. 2024. 7(9S). 1001-1009 (In English). DOI: 10.33545/2618060X.2024.v7.i9Sn.1650.
2. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogonov Yu.Kh. The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N4(298). 2-6 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
3. Rejeb A., Abdollahi A., Rejeb K., Treiblmaier H. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 198, 107017 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2022.107017.
4. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering*. 2021. N1 (101). 26-35 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
5. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Digitization

- aspects of the system of technologies and machines. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian). EDN: RLCDHO.
6. Shariy S.V., Vodolazskaya N.V., Sharaya O.A. Innovative solutions for greenhouse complexes. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2022. N3(35). 109-116 (In Russian). EDN: AWVCYA.
 7. Aleksandrov A.G., Palenov M.V. Adaptive pid controllers: state-of-the-art and future developments. *Automation and Remote Control*. 2014. N2. 16-30 (In Russian). EDN: RXKJAF.
 8. Svetsky A.V. The use of artificial intelligence in agriculture. *Agriculture*. 2022. N3. C. 1-12 (In Russian). DOI: 10.7256/2453-8809.2022.3.39469.
 9. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
 10. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned aircraft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
 11. Nguyen N.P., Hong S.K. Position control of a hummingbird quadcopter augmented by gain scheduling. *Int J Engineering Research & Technology*. 2018. Vol.11(10). 1485-1498 (In English).
 12. Andreev I.P., Zamyatin A.J., Ivanov A.V. Features of the implementation of research work «Comprehensive studies of methods and technologies for the use of domestic electronic component base in unmanned aerial systems and means of their ground control». *Slavic Forum*. 2023. N3(41). 428-455 (In Russian). EDN: CUWDUA.
 13. Fedulin A.M., Driagin D.M. Prospects of male-class uavs using for the huge territories aerial survey. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2021. N1(218). 271-281 (In Russian). DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-271-281.
 14. Jing Y., Wang X., Heredia-Juesas J. et al. PX4 Simulation results of a quadcopter with a disturbance-observer-based and PSO-optimized sliding mode surface controller. *Drones*. 2022. 6(9). 261 (In English). DOI: 10.3390/drones6090261.
 15. Ivashko V., Krulikovskiy O., Haliuk S., Samila A. Review of operating systems used in unmanned aerial vehicles. *Informatics, Control, Measurement in Economy and Environment Protection*. 2025. Vol. 15(1). 95-100 (In Russian). DOI: 10.35784/iapgos.6786.
 16. Litvinov M.A., Kuprin A.A. Application of unmanned air systems in agriculture. *Agricultural machinery: service and repair*. 2023. N6. 28-35 (In Russian). DOI: 10.33920/sel-10-2306-03.
 17. Kovalev I.V., Losev V.V., Saramud M.V. et al. To the question for formation of a block-modular structure of the control system for unmanned aerial vehicles. *Modern Innovations, Systems and Technologies*. 2021. Vol. 1. N3. 54-71 (In Russian). DOI: 10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64.
 18. Danilova S.D. Development of a visual odometry model based on sensors and video stream analysis. *Computational Nanotechnology*. 2024. Vol. 11. N1. 36-47 (In Russian). DOI: 10.33693/2313-223X-2024-11-1-36-47.
 19. Ali B., Sadekov R.N., Tsodokova V.V. A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on computer vision systems. *Gyroscopy and Navigation*. 2022. Vol. 13. N4. 87-105 (In Russian). DOI: 10.17285/0869-7035.00105.
 20. Konanykhin A.Yu., Konanykhina T.N., Panishchev V.S. A method for improving the selected area of the image with high-speed processing of symbolic information. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, computer engineering, information science. medical instruments engineering*. 2021. Vol. 11. N4. C. 106-119 (In Russian). DOI: 10.21869/2223-1536-2021-11-4-106-119.
 21. Chikmarev A.D. Comparison of criteria for identification of mathematical models in solving measurement problems. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022. N8. 41-45 (In Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-8-41-45.
 22. Ivanishchev Yu.G., Davydov V.M., Startsev N.A. Opportunities to use a confidence interval when adopting the parameters of a normalized model. *Bulletin of PNU*. 2021. N1(60). 35-48 (In Russian). EDN: WLPUGL.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Литвинов М.А. – работа над аппаратной частью;
 Курбанов Р.К. – научное руководство, формирование задач исследования, настройка системы управления полетом;
 Захарова Н.И. – проведение испытаний, подготовка статьи;
 Кривко С.И. – работа над программной частью разработки.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Litvinov M.A. – development of hardware components;
 Kurbanov R.K. – scientific supervision, formulation of research objectives, configuration of the flight control system;
 Zakharova N.I. – conducting experiments, drafting the research manuscript;
 Krivko S.I. – software development.
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

30.06.2025
 18.08.2025

EDN: RUIOYE

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-17-23

Научная статья
УДК 338.43(471):633.521

Технологические способы повышения долговечности льноуборочных машин

Виктор Григорьевич Черников,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
e-mail: v.chernikov@fncl.ru;
Сергей Викторович Соловьёв,
младший научный сотрудник,
e-mail: s.solovyov@fncl.ru;

Владислав Юрьевич Романенко,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: v.romanenko@fncl.ru;
Геннадий Анатольевич Перов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: g.perov@fncl.ru

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

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

Реферат. Отметим, что многообразие природных условий возделывания и уборки льна в разных зонах страны обуславливает актуальность вопроса повышения надежности как серийных, так и вновь разработанных машин для отрасли льноводства. (*Цель исследования*) Разработать методологию повышения долговечности лсноуборочных машин за счет разработки новых и внедрения унифицированных узлов в 1,5 раза. (*Материалы и методы*) Показатели надежности на первой стадии создания машин определяли путем расчетов, показатели надежности серийных машин – на основе эксплуатационных испытаний и обследований в хозяйствах, а также при ускоренных стендовых испытаниях отдельных узлов и машин в целом. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что приведенные расчеты достаточно полно иллюстрируют оценку работоспособности лсноуборочных машин с использованием обобщенного нагрузочного графика. Показали, что нормирование режимов работы механизмов не требует длительных статических испытаний в полевых условиях и позволяет прогнозировать долговечность элементов привода. Выявлено, что регламентирование режимов создает предпосылки не только для повышения надежности расчетов элементов лсноуборочных машин на заданный срок службы, но послужит основой программирования ускоренных стендовых испытаний и прогнозирования долговечности. (*Выводы*) Методика может быть рекомендована при решении вопросов в области обеспечения долговечности деталей и узлов лсноуборочных машин. Подтверждена необходимость разработки методологии повышения износостойкости на основе формализации базы накопленных знаний современными методами и средствами. Приведены примеры, подтверждающие, что разработка новых узлов, в частности, очесывающего механизма, подбирающего барабана, и внедрение унифицированных узлов позволят увеличить долговечность машин в 1,5 раза.

Ключевые слова: техника для уборки льна, долговечность машин, унификация узлов, модернизация узлов и деталей, средний нормальный режим, полигон распределенных нагрузок, эквивалентная нагрузка, обобщенный нагрузочный график.

■ **Для цитирования:** Черников В.Г., Соловьёв С.В., Романенко В.Ю., Перов Г.А. Технологические способы повышения долговечности лсноуборочных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 17-23. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-17-23. EDN: RUIOYE.

Scientific article

Technological Methods for Increasing Flax Harvester Durability

Viktor G. Chernikov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, corresponding member of the
Russian Academy of Sciences, chief researcher,
e-mail: v.chernikov@fncl.ru;
Sergey V. Solovyov,
junior researcher, e-mail: s.solovyov@fncl.ru;

Vladislav Yu. Romanenko,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: v.romanenko@fncl.ru;
Gennady A. Perov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: g.perov@fncl.ru

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

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center for Bast Fiber Crops No. FGSS-2022-0005).

Abstract. The paper highlights that the diverse natural conditions for flax cultivation and harvesting across different regions of the country require improvements in the reliability of both serially produced and newly developed machinery for the flax industry. (*Research purpose*) The study aims to develop a methodology to increase the durability of flax harvesters through the design both new and standardized components, with the goal of extending machine service life by a factor of 1.5. (*Materials and methods*) Reliability indicators at the first stage of machine creation were determined by calculations, reliability indicators of serial machines were determined on the basis of operational tests and surveys in farms, as well as during accelerated bench tests of individual components and machines as a whole. (*Results and discussion*) The results show that the presented calculations effectively support the performance evaluation of flax harvesters using a generalized load mode. It is demonstrated that standardizing the operating modes of mechanisms eliminates the need for lengthy static (statistical) field tests and enables prediction of component durability. Furthermore, regulating these operating modes creates the foundation not only for improving the reliability of service life estimates but also for programming accelerated bench tests and the prediction of drive component durability. (*Conclusions*) The proposed methodology can be recommended for addressing durability challenges in the components and assemblies of flax harvesters. The study confirms the need for developing a wear-resistance improvement strategy based on the formalization of accumulated knowledge using modern tools and engineering techniques. The provided examples demonstrate that developing new components, specifically the stripping mechanism and the pickup drum, and introducing standardized units can increase machine durability by a factor of 1.5.

Keywords: flax harvesting machinery, flax harvesters, machine durability, component standardization, modernization of components and parts, average normal operating mode, load distribution polygon, equivalent load, generalized load curve.

■ **For citation:** Chernikov V.G., Solovyov S.V., Romanenko V.Yu., Perov G.A. Technological methods for increasing flax harvester durability. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 17-23 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-17-23. EDN: RUIOYE.

Возрождение российской экономики немислимо без подъема АПК и одной из основных отраслей этого комплекса – льноводства [1]. Конкурентоспособность льноуборочной техники напрямую связана с качеством проектно-конструкторских работ, технологической подготовкой производства. Комплексная механизация операций уборки льна зависит от средств, которые должны обладать энергонасыщенностью, повышенной универсальностью, возможностью использовать большое количество сменных рабочих органов [2-4]. При современном уровне развитии науки и техники стало возможным более точно прогнозировать и управлять отдельными операциями, выполняемыми льноуборочными машинами [5].

Цель исследования. Разработать методологию повышения долговечности льноуборочных машин за счет разработки новых и внедрения унифицированных узлов в 1,5 раза.

Материалы и методы. Показатели надежности на первой стадии создания машин определяли путем расчетов, показатели надежности серийных машин – на основе эксплуатационных испытаний и обследований в хозяйствах, а также при ускоренных стендовых испытаниях отдельных узлов и машин в целом [5-7].

На первой стадии создания машин большое внимание было уделено унификации узлов и деталей. Конструктивная унификация дает большой эффект не только в производстве, но и в эксплуатации машин. При этом создаются более благоприятные условия для совершенствования машин, выбора прогрессивных методов получения заготовок и технологии их изготовления. Только в льноуборочных комбайнах ЛК-4Т и ЛК-4А унифицированы: редуктор привода очесывающего аппарата, элементы гидравлической системы, резинотехнические изделия комбайнов; в подборщиках тресты – редуктор привода комлеподбивателя, распределительный редуктор, гидрораспределитель; в теребилке ТЛН-1,5 и ТЛН-1,9 – редукторы привода и делители [8].

Большая работа была проведена по повышению качества серийных машин путем их модернизации. На льноуборочных комбайнах, начиная с модификации ЛК-4Т и до ЛК-4А, внедрен новый очесывающий аппарат, его долговечность повысилась в 1,5 раз. В предшествующих модификациях льнокомбайнов неправильное нагружение ведомого диска, воспринимающего при вращении барабана инерционные нагрузки от неуравновешенных гребней в виде изгибающего момента, который действует перпендикулярно плоскости диска, выводило барабан из строя.

На новом барабане ведомый диск установлен на эксцентрик с возможностью осевого перемещения, а подшипники поводков заключены в амортизаторы. При вращении барабана за счет смещения ведомого диска на величину, равную расстоянию между осями вращения гребней и поводков, гребни совершают вращательно-поступательное движение. Благодаря свободной установке на эксцентрик ведомого диска и заключению подшипников в амортизаторы устранены ударные нагрузки.

Для быстрого устранения забивания стеблями поперечный транспортер льнокомбайнов выполнен подъемным. Испытания комбайнов с таким транспортером проводились на ряде машиноиспытательных станций, где новые узлы были положительно оценены и рекомендованы в серийное производство.

Аналогичная работа выполнена с подборщиком тресты и оборачивателем (рис. 1) [9, 10].

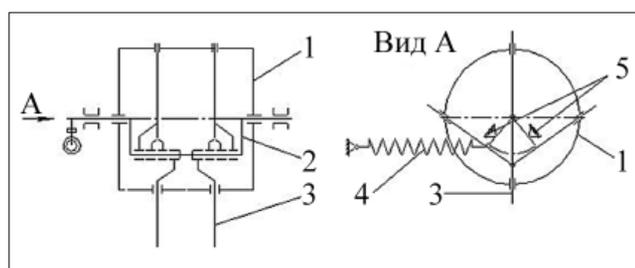


Рис. 1. Подбирающий аппарат льноподборщика и льнооборачивателя: 1 – кожух; 2 – эксцентрическая ось; 3 – пальцы; 4 – пружина; 5 – упоры

Fig. 1. Picking device of the flax picker and the flax turner: 1 – casing; 2 – eccentric axis; 3 – fingers; 4 – spring; 5 – stops

С целью улучшения качества работы на высокоурожайном льне и повышения производительности льнокомбайнов проводятся совместные работы ученых и конструкторов по установке на комбайнах передвижных очесывающих аппаратов, смонтированных на общей раме с зажимным транспортером относительно поперечного транспортера, что позволяет регулировать его положение в зависимости от длины стеблей льна. При этом улучшается чистота очеса короткого и длинностебельного льна, уменьшаются потери стеблей при уборке полегшего льна. Транспортер вороха имеет устройство, позволяющее распределять его по длине кузова прицепа, что способствует сокращению простоев комбайнов и численности обслуживающего персонала.

Однако бесперебойная работа всего парка машин обеспечивается не только конструктивными улучшениями, но и качеством технического обслуживания и ремонта машин в эксплуатации. Несмотря на все возрастающий объем производства запасных частей, в них все же ощущается недостаток. Важнейшим условием для решения данной

задачи является определение научно обоснованных норм расхода запасных частей [11-14].

В ходе создания и испытаний льнокомбайнов ЛК-4Т и до ЛК-4А широко изучались усилия (нагрузки) в узлах очесывающего аппарата гребневого типа, что позволило разработать и внедрить мероприятия по увеличению технологической и эксплуатационной надежности аппарата [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для анализа входных и выходных процессов привода очесывающего аппарата льнокомбайна проведен полевой эксперимент, во время которого крутящий момент на валу очесывающего барабана, угловая скорость его вращения и скорость комбайна записывались в онлайн-режиме на ноутбуке, с установленным программным обеспечением «Испытания» с применением измерительной системы ИП 264. Одной из особенностей программы является возможность передачи данных в формат MS Excel и дальнейшего построения графиков (рис. 2).

При обработке результатов исследований использовались методы математической статистики и теории случайных функций.

Наблюдается также период $\tau = 2,28$ с, равный времени одного оборота барабана, что очевидно, связано с его биением (рис. 3b). Период, соответствующий длительности работы одного очесывающего гребня ($\tau = 0,57$ с), виден только на осциллограммах. На графиках корреляционных функций, вычисленных по ординатам, дискретно считанным через $\tau = 0,05$ с, он не выявляется.

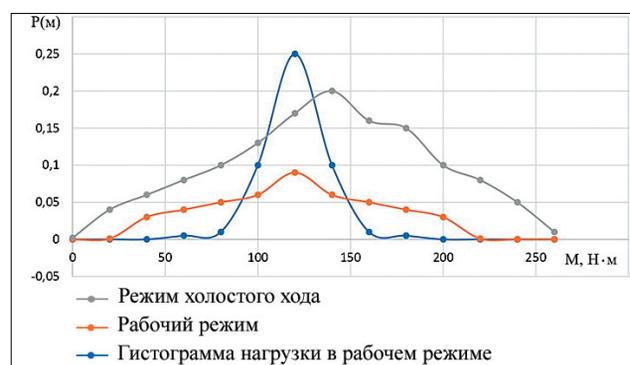


Рис. 2. Кривые плотности нормального распределения вероятностей $P(M)$ момента нагрузки на валу барабана
Fig. 2. Probability density curves $P(M)$ for the normal distribution of the load moment on the drum shaft

Изучаемый процесс формирования нагрузки может быть отнесен к классу нестационарных, обладающих свойством обобщенной текущей эргодичности. Для описания таких процессов средними статистическими характеристиками с удовлетворительной точностью можно применить выборочное осреднение по времени нескольких реализаций на интервалах (на валу барабана он найден равным

0,46 с), что близко соответствует периоду двойного оборота вала барабана. Такая частота колебаний может быть объяснена только собственными колебаниями системы привода барабана.

Подтверждение этому дает анализ графика корреляционной функции изменения крутящего момента при режиме холостого хода (рис. 3): здесь легко прослеживается несущая гармоника колебательного процесса с тем же периодом (оранжевая линия). При специальном динамическом исследовании системы привода собственная частота ее найдена близкой к указанной выше ($\tau = 0,46$ с).

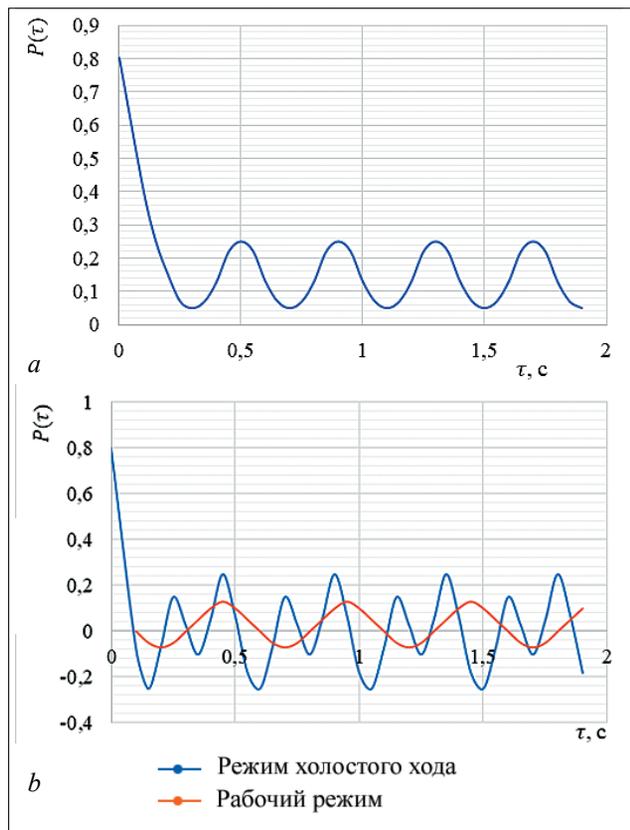


Рис. 3. Графики корреляционных функций изменения крутящего момента $P(\tau)$ при рабочем режиме (а) и в режиме холостого хода (б)

Fig. 3. Graphs of the correlation function for torque variation in operating mode (a) and idle mode (b)

Наиболее неблагоприятные нагрузки в барабане и в его приводе – это результат резонанса: период собственных колебаний системы барабана кратен периоду одного его оборота. По предварительной оценке, вызванное этим максимальное динамическое нагружение примерно вдвое превышает расчетную среднемаксимальную нагрузку режима рабочего хода. Снижение динамических нагрузок вредных сопротивлений механизма – первоочередные задачи совершенствования конструкции очесывающего аппарата льнокомбайна ЛК-4.

Эти работы подробно изложены в наших исследованиях по определению усилий в узлах очесывающего аппарата льнокомбайнов ЛК-4Т и ЛКВ-4Т, что позволило внести в его конструкцию ряд новшеств, обеспечивших повышение срока службы аппаратов в 1,5 раза.

У льнокомбайнов в начале работы, т.е. в период приработки (до 20-25 га), наблюдается повышенное число отказов. В дальнейшем параметр потока отказов уменьшается, наступает период нормальной эксплуатации. К наработке 60-70 га параметр потока отказов возрастает.

Проведена теоретическая и экспериментальная работа по расчету долговечности зубчатых колес трансмиссии привода льнокомбайна. Режим его работы определялся изменением крутящего момента на ведущем валу привода в производственных испытаниях. Измерения крутящих моментов записывались в режиме онлайн на компьютер с использованием разработанной программы.

В результате расчетов было найдено, что режим нагружения привода близок среднему нормальному, определена интегральная функция. Для составления нагрузочного графика для среднего нормального режима получено уравнение, в котором учитывается относительное время работы привода на нагрузках данного уровня с вычетом табличного значения нормальной функции распределения данной величины.

На рисунке 4 показаны нагрузочный график среднего нормального режима и график накопленных частностей относительной нагрузки, полученный при испытании очесывающего аппарата (M и M_{\max} – нагружающий и максимальный нагружающий момент, кН·м; $M_{\text{экв}}$ и $M_{\text{экв. изг}}$ – эквивалентный момент и эквивалентный изгибающий момент, кН·м; t_1 и $t_{\text{сут}}$ – время нагружения и суточное время нагружения, с).

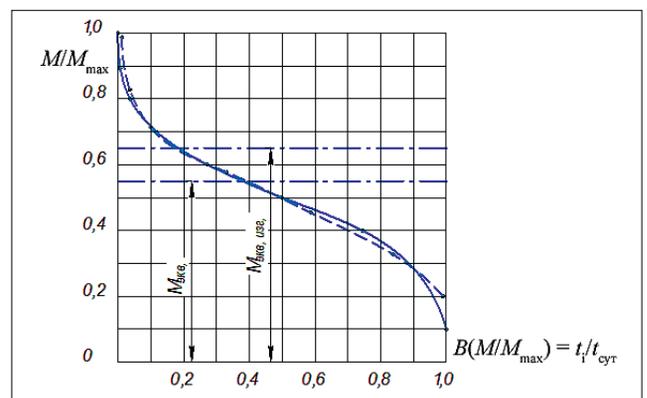


Рис. 4. Нагрузочный график среднего нормального режима (сплошная линия) и полигон распределения нагрузки, полученный при испытаниях очесывающего аппарата Fig. 4. Load curve representing the average normal mode (solid line) and the load distribution polygon obtained during tests of the stripping unit

Количественная оценка напряженности деталей привода может быть произведена при помощи эквивалентной нагрузки (M) путем приведения переменного нагрузочного режима к условному постоянному режиму, оказывающему такое же повреждающее действие, как и переменный режим, охарактеризованный нормальным распределением. Для определения эквивалентной нагрузки по расчетам долговечности зубчатых передач, работающих при среднем нормальном режиме нагружения, предложено эмпирическое выражение.

По величине эквивалентной нагрузки возможно оценить реально достижимую долговечность зубчатых колес трансмиссии льнокомбайна, используя кривую усталости Веллера.

Определяя затем возможное число циклов нагружения зубьев колеса по контактным напряжениям, проведены расчеты для трех вариантов привода льнокомбайна. Это позволило выбрать лучший вариант привода расчетной (наивысшей) долговечности. Вариант привода, удовлетворяющий расчетам и успешно прошедший производственные испытания, в настоящее время принят для серийно выпускаемых льнокомбайнов ЛК-4Т... ЛК-4А.

По изложенной выше методике были изучены эксплуатационные нагрузки привода подборщика тресты для оценки надежности его трансмиссии, что позволило уточнить нагрузки, принятые при расчетах зубчатых передач по критерию выносливости. Эквивалентный крутящий момент, требуемый для расчета зубчатых передач, определялся из выражения, в котором учтены: функция распределения эксплуатационных моментов; значения длительно действующего максимального и минимального эксплуатационных моментов; детерминированный показатель кривой усталости.

Для типовых режимов нагружения эквивалентные моменты определяются по известной методике. Однако, как показал опыт, эксплуатационные нагрузки в элементах трансмиссии подборщика тресты без существенной погрешности не могут быть отнесены ни к одному из типовых режимов. В этой ситуации статистическое распределение эксплуатационной нагрузки можно с достаточной точностью представить как соединение нескольких составляющих с нормальным распределением. Для этой операции наиболее удобный прием состоит в замене графика полученного статистического распределения некоторым числом равнобедренных треугольников, сумма ординат которых наиболее близко соответствует ординатам заменяемого статистического распределения. Здесь используется то обстоятельство, что распределение по закону равнобедренного треугольника в свою очередь довольно точно может быть заменено нормальной функцией распределения.

Попутно следует отметить, что для случая разложимых случайных процессов формирования нагрузки, как это имеет место и для подборщика тресты ввиду разветвленности системы его привода, такой способ изображения исходного статистического распределения имеет не только формальный, но и очевидный физический смысл.

Обработка по указанной методике всех остальных осциллографических записей и соответствующие эквивалентные моменты для расчета зубчатых передач привода подборщика тресты приведены в *таблице*.

Приводной вал машины		Эквивалентные моменты, Н·м		Пиковые моменты, Н·м
		$m = 3$	$m = 9$	
ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ МОМЕНТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИВОДА ПОДБОРЩИКОВ ТРЕСТЫ EQUIVALENT MOMENTS FOR CALCULATING THE GEAR DRIVES OF THE FLAX PICK-UP MECHANISM				
Таблица Table				
Вал отбора мощности		93,5	124,3	255,0
Промежуточный карданный вал		98,0	138,0	240,0
Карданный вал на приводе транспортера		40,3	55,7	130,0
Приводной вал очесывающего аппарата		54,0	84,7	150,0
Ведущий вал привода подбойки		21,5	29,0	34,6
Приводной вал зажимного транспортера		80,5	108,5	183,0
Карданный вал на приводе верхней ленты зажимного транспортера		46,4	52,4	107,0

Выводы. В исследовании подтверждена необходимость разработки методологии повышения износостойкости на основе формализации базы накопленных знаний современными методами и средствами. Приведенные расчеты достаточно полно иллюстрируют идею оценки работоспособности элементов привода льнокомбайна ЛК-4Т с использованием обобщенного нагрузочного графика.

Нормирование режимов работы механизмов льнокомбайна, не требуя длительных статистических испытаний в полевых условиях, позволяет прогнозировать долговечность элементов привода.

Регламентирование режимов позволит не только повысить надежность расчетов элементов комбайна на заданный срок службы, но послужит основой программирования ускоренных стендовых испытаний и прогнозирования долговечности.

Разработка новых узлов: очесывающего механизма, подбирающего барабана, а также внедрение унифицированных узлов позволит увеличить долговечность машин в 1,5 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ущাপовский И.В., Попов Р.А. Основные проблемы научного обоснования льноводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 45-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52.
2. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2023. N4(310). С. 2-5. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
3. Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Методологические аспекты стандартизации машинных технологий производства продукции растениеводства // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N1 (34). С. 61-67. EDN: WDXYHY.
4. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
5. Соловьёв С.В., Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. Результаты камеральных работ по отделению семенных коробочек льна-долгунца при очесе на корню гребенками однороторного очесывающего барабана // *Инженерные технологии и системы*. 2024. 34(3). С. 350-369. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202403.350-369.
6. Черников В.Г., Романенко В.Ю., Андрощук В.С., Шишин Д.А. Пути повышения надежности льноуборочных машин // *Техника и оборудование для села*. 2017. N2. С. 30-33. EDN: XXRSML.
7. Ценч Ю.С., Миронов Д.А., Пыжов В.В. Развитие методов восстановления деталей тракторных двигателей // *Технический сервис машин*. 2025. Т. 63. N1. С. 102-110. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.
8. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворезущих рабочих органов в различных почвенных условиях // *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30. N4. С. 699-710. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.
9. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. Исследование технологий уборки льна льноуборочными машинами // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N1. С. 19-24. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24.
10. Соловьёв С.В., Романенко В.Ю., Черников В.Г. Разработка самоходного оборачивателя лент льна на дистанционном управлении // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N4. С. 10-16. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-10-16.
11. Лачуга Ю.Ф., Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. Научные аспекты повышения эффективности процессов очеса семенных коробочек при двухфазной уборке льна-долгунца // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. N1. С. 53-58. DOI: 10.31857/S2500262722010094.
12. Дорохов А.С., Костомахин М.Н., Воронов А.Н. Сбор информации о надежности сельскохозяйственных машин с использованием систем мониторинга с помощью контроля параметров технического состояния // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2018. N8. С. 53-61. EDN: YAQTDN.
13. Ценч Ю.С. Научно-технический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
14. Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P. Development of analytical methodology for detail durability test while arranging metallurgical machines. *Proceedings ICIE 2019*. 2020. 83-90. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_10.
15. Blinkov I.V., Anikin V.N., Petrzhik M.I. et al. Acquisition and properties of wear-resistant PVD/CVD-coatings on a hard-alloy tool. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011. Vol. 52. N1. 109-114. DOI: 10.3103/S1067821211010068.

REFERENCES

1. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovsky I.V., Popov R.A. The main problems of scientific support of flax growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N3. 45-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52.
2. Lobachevskiy Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Shogonov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agricultural engineering scientific organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N4(310). 2-5 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
3. Beylis V.M., Tsench Yu.S. Methodological aspects of standardization of machine technologies for crop production. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2019. 1(34). 61-67 (In Russian). EDN: WDXYHY.
4. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
5. Solovyov S.V., Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. The results of the laboratory study on the separating fiber flax seed balls when combing the standing plants with a single-rotor comb-dresser. *Engineering Technologies and Systems*. 2024. N34(3). 350-369 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.034.202403.350-369.
6. Chernikov V.G., Romanenko V.Yu., Androshchuk V.S.,

- Shishin D.A. Ways to improve the reliability of flax harvesters. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017. N2. 30-33 (In Russian). EDN XXRSML.
7. Tsench Yu.S., Mironov D.A., Pyzhov V.V. Development of Methods for Restoring Parts of Tractor Engines. *Technical Service of Machines*. 2025. Vol. 63. N1. 102-110 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.
 8. Sidorov S.A., Mironov D.A., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Assessment of durability and service life of two-layer hardened earth cutters in various soil conditions. *Engineering Technologies and Systems*. 2020. Vol. 30. N 4. 699-710 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.
 9. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. Flax harvesting technologies for flax harvesting machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N1. 19-24 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24.
 10. Solovyov S.V., Romanenko V.Yu., Chernikov V.G. Development of remote-controlled self-propelled flax windrow turner. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 10-16 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-10-16.
 11. Lachuga Yu.F., Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Scientific aspects of improving the efficiency of seedpod combing processes in two-phase harvesting of flax. *Russian Agricultural Sciences*. 2022. N1. 53-58 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262722010094.
 12. Dorokhov A.S., Kostomakhin M.N., Voronov A.N. Collection of information on the reliability of agricultural machines using monitoring systems by monitoring the parameters of the technical condition. *Agricultural Machinery Service and Repair*. 2018. N8. 53-61 (In Russian). EDN: YAQTDN.
 13. Tsench Yu.S. Scientific and technological potential as the main factor for agricultural mechanization development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
 14. Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P. Development of analytical methodology for detail durability test while arranging metallurgical machines. *Proceedings ICIE*. 2019. 2020. 83-90 (In English). DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_10.
 15. Blinkov I.V., Anikin V.N., Petrzhik M.I. et al. Acquisition and properties of wear-resistant PVD/CVD-coatings on a hard-alloy tool. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011. Vol. 52. N1. 109-114 (In English). DOI: 10.3103/S1067821211010068.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Черников В.Г. – научное руководство, постановка проблемы;
Соловьев С.В. – сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, проведение опытов;

Романенко В.Ю. – литературный анализ, формирование общих выводов, редактирование и доработка текста статьи, подготовка материала к публикации;

Перов Г.А. – обработка полученных данных, редактирование и доработка текста статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Chernikov V.G. – scientific supervision, problem statement.
Solovyov S.V. – collection and analysis of analytical and practical materials on the research topic, conducting experiments;
Romanenko V.Yu. – literature review, formation of general conclusions, editing and revision of the manuscript text, preparation of material for publication;
Perov G.A. – data processing, editing and revision of the manuscript text.

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

30.06.2025
04.08.2025



Сепарация шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с колонковыми и батарейными ускорителями

Максим Николаевич Московский,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;
Станислав Александрович Герасименко,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com;

Виктор Геннадьевич Хамуев,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: victor250476@yandex.ru;
Сергей Игоревич Борзенко,
младший научный сотрудник,
e-mail: serzhhbk@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что воздушная (аспирационная) сепарация частиц по плотности и размеру с помощью воздушного потока – наиболее эффективный и экономически оправданный метод очистки от лузги подсолнечного шрота. Снижение содержания лузги и увеличение концентрации белка позволяет повысить кормовую ценность и расширяет сферы применения шрота, особенно в высокопродуктивном животноводстве. (*Цель исследования*) Повышение эффективности выделения белковой фракции при очистке шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с батарейными и колонковыми ускорителями воздушного потока и рассекателями обрабатываемого материала. (*Материалы и методы*) Исследования проводили в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ на макете пневмосепарирующего канала. Колонковые и батарейные ускорители воздушного потока обеспечивают равномерное распределение воздушного потока над слоем материала, что позволило повысить экспозицию процесса сепарации и четкость разделения материала. (*Результаты и обсуждения*) Разработанный макетный образец вертикального пневмоканала обеспечивает выход белка не менее 75 процентов и полноту выделения примеси не менее 70 процентов. (*Выводы*) Коэффициент живого сечения ускорителя в макетном образце пневмоканала должен составлять 50-60 процентов, а высота батарейного ускорителя – от 55 до 75 миллиметров. Высота установки батарейного ускорителя над вершинами рассекателей потока обрабатываемого материала должна быть от 160 до 220 миллиметров. Оптимальная удельная нагрузка обрабатываемого материала составляет до 2,0 килограммов на один сантиметр кубический в час. При пропускной способности машины до 2 тонн в час содержание выделяемого компонента (белка) в исходном материале от 35 до 40 процентов.
Ключевые слова: шрот подсолнечника, лузга, очистка, воздушная сепарация, вертикальный пневмоканал, батарейный ускоритель, колонковый ускоритель.

■ **Для цитирования:** Московский М.Н., Герасименко С.А., Хамуев В.Г., Борзенко С.И. Сепарация шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с колонковыми и батарейными ускорителями // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 0-0. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-24-29. EDN: PYGRAN.

Scientific article

Purification of Sunflower Meal in a Vertical Pneumatic Channel Using Column-Type and Battery-Type Air Accelerators

Maksim N. Moskovsky,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;
Stanislav A. Gerasimenko,
Ph.D.(Eng), senior researcher,
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com;

Viktor G. Khamuev,
Ph.D.(Eng), leading researcher,
e-mail: victor250476@yandex.ru;
Sergey I. Borzenko,
junior researcher,
e-mail: serzhhbk@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that air (aspiration) separation of meal particles by density and size using an air flow is the most efficient and economically viable method for removing husks from protein in sunflower meal. Reducing husk content and

increasing protein concentration enhances the feed value and broadens the application scope of the meal, particularly in high-yield livestock farming. (*Research purpose*) The study aims to improve the efficiency of protein fraction extraction during the purification of sunflower meal in a vertical pneumatic channel equipped with battery-type and column-type air accelerators, as well as input flow deflectors. (*Materials and methods*) The research was conducted at the Federal Scientific Agroengineering Center VIM using a model of a pneumatic separation channel. The column-type and battery-type air accelerators ensured uniform airflow distribution across the input material layer, improving separation efficiency and enhancing the precision of input material separation. (*Results and discussion*) The developed model of the vertical pneumatic channel provides a protein yield of at least 75 percent and an impurity removal rate of no less than 70 percent. (*Conclusions*) The live cross-section coefficient of the accelerator in the model pneumatic channel should be maintained at 50–60 percent, and the height of the battery-type accelerator should range from 55 to 75 millimeters. The recommended installation height of the battery-type accelerator above the input flow deflectors is between 160 and 220 millimeters. The optimal specific load of the processed material is up to 2.0 kilograms per cubic centimeter per hour. At a machine throughput of up to 2 tons per hour, the protein content in the raw material ranges from 35 to 40 percent.

Keywords: sunflower meal, husk, purification, air separation, vertical pneumatic channel, battery-type air accelerator, column-type air accelerator.

For citation: Moskovsky M.N., Gerasimenko S.A., Khamuev V.G., Borzenko S.I. Purification of sunflower meal in a vertical pneumatic channel using column-type and battery-type air accelerators. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 24-29 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-24-29. EDN: PYGRAN.

Подсолнечный шрот – ценный белковый кормовой продукт, получаемый после экстракции масла из подсолнечника [1]. По данным Росстата, в 2024 г. объем производства жмыхов и шротов всех видов масличных культур в России составил 14 617,7 тыс. т, что на 8,7% (на 1171,0 тыс. т) больше, чем в 2023 г. Ожидается дальнейший рост переработки из-за высокого спроса на растительный белок в животноводстве и кормовой промышленности [2].

Шрот подсолнечника содержит значительное количество лузги (кожура семян), что влияет на его питательную ценность и усвояемость [3, 4]. Одним из способов отделения лузги является воздушная сепарация [5]. Наиболее эффективны сепараторы с вертикальным пневмоканалом, так как частицы находятся во взвешенном состоянии дольше, чем в сепараторах с горизонтальным пневмоканалом [6–8]. Однако при подаче измельченного шрота подсолнечника в пневмоканал сепаратора под воздействием вертикально-восходящего воздушного потока можно наблюдать неравномерное распределение материала по высоте пневмоканала, что влияет на качество разделения. В связи с этим стоит задача создания оптимальных условий для наиболее равномерного распределения материала в вертикальном пневмоканале [9, 10].

Цель исследования. Повышение эффективности выделения белковой фракции при очистке шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с батарейными и колонковыми ускорителями воздушного потока и рассекателями обрабатываемого материала.

Материалы и методы. Исследования проводили на макетном образце с пневмосепарирующими каналами разной высоты для выделения белковой фрак-



Рис. 1. Расположения ускорителей и рассекателей в пневмоканалах макетного образца: 1 – колонковый ускоритель; 2 – батарейный ускоритель; 3 – рассекатели
Fig. 1. Arrangement of accelerators and deflectors in the pneumatic channels of the prototype: 1 – column-type accelerator; 2 – battery-type accelerator; 3 – deflectors

ции и лузги при различном давлении воздушного потока. В пневмоканалах были установлены рассекатели движущегося потока обрабатываемого материала над поддерживающим ситом (*рис. 1*) [11].

Устройством, сочетающим функцию равномерного распределения давления воздуха над слоем материала и ускорения воздушного потока, может быть батарейный ускоритель (*рис. 2*).

Технологический процесс сепарации шрота в опытном образце сепарирующей установки (*рис. 3*) состоит в следующем.

Измельченный шрот из загрузочного бункера 1 самотеком поступает на поддерживающее сито 2, над которым установлен первый пневмосепарирующий канал 6 первого этапа выделения массы белка. В каналах расположены рассекатели потока об-

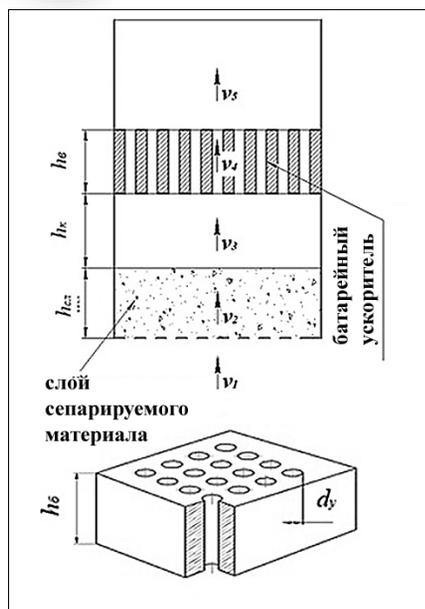


Рис. 2. Схема батарейного ускорителя воздушного потока

Fig. 2. Diagram of a battery-type air accelerator

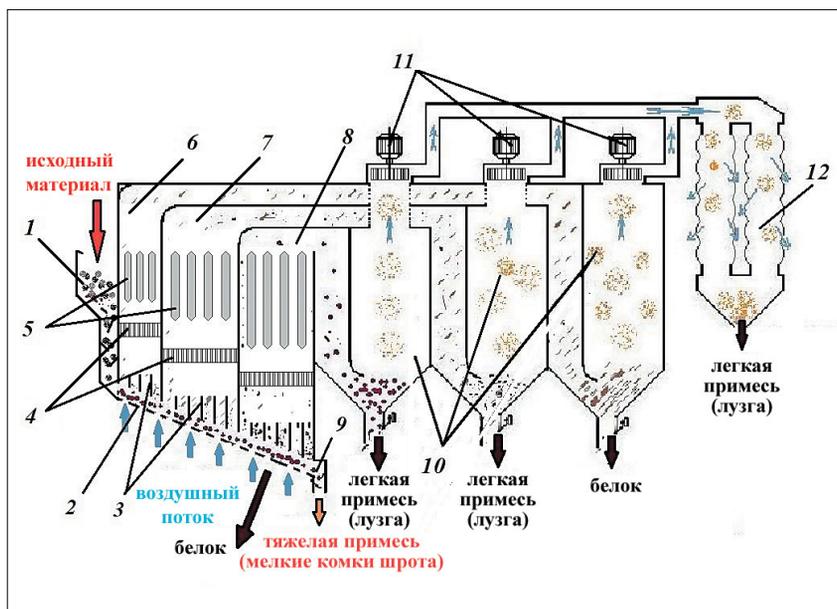


Рис. 3. Технологическая схема опытного образца установки для переработки отходов зернобобовых культур

Fig. 3. Technological flow diagram of a prototype machine for processing legume crop impurities

рабатываемого материала 3, батарейные и колонковые ускорители воздушного потока 4 и 5, которые предназначены для трансформации и стабилизации взаимодействия потоков материала и воздуха. Двигаясь по ситам, материал разделяется во втором 7 и в третьем 8 пневмосепарирующих каналах (второй этап выделения белка или лузги) и далее выводится через патрубок. Белковая часть материала может проходить через отверстия поддерживающего сита, под ним необходимо предусмотреть сборник белка без ущерба движению восходящему воздушному потоку. Легкие фракции воздушным потоком выносятся в осадочные камеры 9, и происходит первая ступень очистки отработанного воздуха. Далее через вентиляторы 10 воздушный поток направляется на вторичной очистку в фильтрах 11.

Для выбора вентиляторов определяют расход воздуха в пневмосепарирующих каналах:

$$Q_g = B \cdot L \cdot v,$$

где B и L – ширина и длина канала, м; v – скорость воздушного потока в канале, м/с.

Скорость воздушного потока в каналах выбирается с учетом физико-механических свойств разделяемых компонентов [9]. Скорость в первом канале (предназначен для выделения белка) $v_{\max} = 4$ м/с, а во втором и третьем (выделение более тяжелых фракций) $v_{\max} = 10$ м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На рисунке 4 показан график зависимости полноты выделения отходов ϵ (%) от коэффициента живого сечения K батарейного ускорителя:

$$K = \frac{S_{\text{отв}}}{S_{\text{общ}}} \cdot 100\%,$$

где $S_{\text{отв}}$ – площадь живого сечения отверстий батарейного ускорителя; $S_{\text{общ}}$ – общая площадь поперечного сечения батарейного ускорителя.

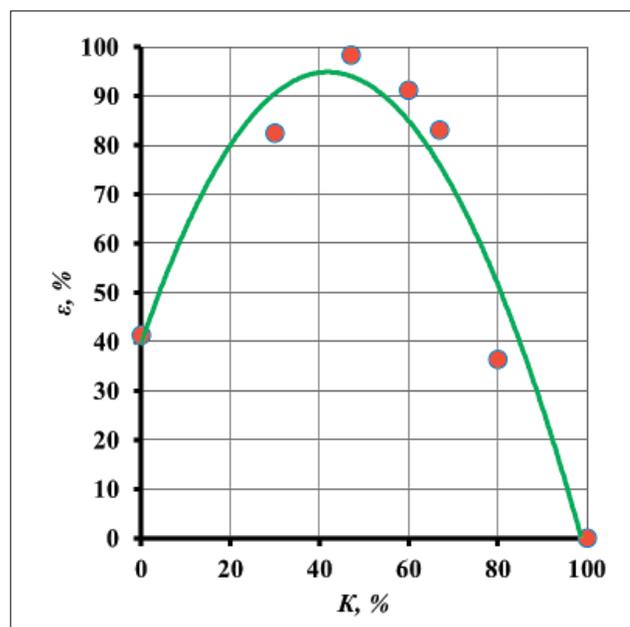


Рис. 4. График зависимости полноты выделения примеси (ϵ) от коэффициента живого сечения батарейного ускорителя (K)

Fig. 4. Dependence of impurity separation efficiency (ϵ) on the of the live cross-section coefficient (K) of the battery-type air accelerator

Полноту выделения отхода ε (%) и выход белка ξ (%) определяли по формулам [11, 12]:

$$\varepsilon = \frac{M_{\Sigma\text{отх}}}{M_{O\text{отх}}} \cdot 100, \quad \xi = \frac{M_{\Sigma\text{белк}}}{M_{O\text{белк}}} \cdot 100,$$

где $M_{\Sigma\text{отх}}$ – суммарная масса частиц отхода во фракционных емкостях, г; $M_{O\text{отх}}$ – общая масса отхода в исходном материале, г; $M_{\Sigma\text{белк}}$ – суммарная масса частиц белка во фракционных емкостях, г; $M_{O\text{белк}}$ – общая масса белка в исходном материале, г.

Из графика видно, что оптимальное значение коэффициента живого сечения (при условии полноты выделения отходов не менее 0,7, или 70%) варьируется в пределах от 30 до 67% при полноте выделения от 82,4 до 98,3%, поэтому для сепарации измельченного шрота оптимальный коэффициент живого сечения батарейного ускорителя $K = 50\%$.

На рисунке 5 представлены графики зависимости выхода белка ξ (%) и полноты выделения отхода ε (%) от удельной нагрузки обрабатываемого материала q при различном динамическом давлении P воздушного потока в пневмосепарирующем канале с батарейными и колонковыми ускорителями и от высоты их расположения при $P=5,4$ Па.

Из графиков видно, что оптимальное динамическое давление воздушного потока в канале с ускорителями составляет 2,4 и 5,4 Па при удельной нагрузке до $2 \text{ кг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$. В этих пределах выделение белка составляет не ниже 94%, а полнота выделения отходов не ниже 73%.

Результаты сравнительных исследований показали, что установка в канале батарейных ускорителей над вершинами расщепителей потока обрабаты-

ваемого материала на высоте 160 и 220 мм повышает полноту выделения отхода, нагрузку до $2 \text{ кг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$, а наибольшая полнота выделения отхода $\varepsilon = 99,8\%$ у канала с ускорителями, установленными на высоте $H = 160$ мм (рис. 5с).

На очистку поступает материал, представляющий собой сложную механическую смесь белка и клетчатки в виде лузги в целом или дробленом виде. Выход белка такого материала зависит от способов очистки на очистительных комплексах или элеваторах, состояния машин для очистки и сортировки и колеблется около 75%. Для наиболее полного выделения отходов и минимизации потерь белкового материала в отходы в машине необходимо установить последовательно три пневмосепарирующих канала над общей наклонной поддерживающей сеткой. Согласно результатам исследований, в каждый канал необходимо установить расщепители обрабатываемого материала, движущегося по поддерживающему сити, и батарейные и колонковые ускорители воздушного потока

Технологический процесс сепарации предусматривает равномерную загрузку материала в пневмосепарирующие каналы и вывод белка, для чего должны быть загрузочный бункер с регулируемой подачей материала, а также выводные патрубки белка с устройством, препятствующим излишнему подосу воздуха при работе машины [13-15]. Отработанный после сепарации воздух содержит белок и примеси, которые необходимо выделить. Для этого предусмотрены осадочные камеры с автоматическими клапанами вывода белка и примесей. Очистка отработанного воздуха происходит в тканевых фильтрах.

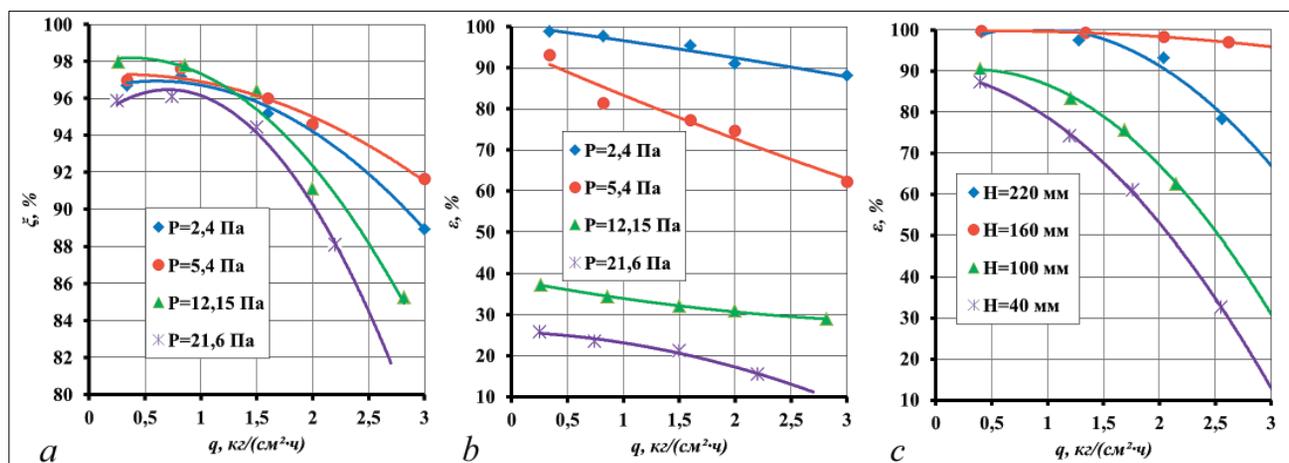


Рис. 5. Зависимость выхода белка ξ (a) и полноты выделения отхода ε (b) от удельной нагрузки обрабатываемого материала q при различном динамическом давлении P воздушного потока в пневмосепарирующем канале с батарейными и колонковыми ускорителями; c – зависимость полноты выделения отхода от удельной нагрузки материала q и высоты расположения батарейных ускорителей H над вершинами расщепителей потока материала при $P=5,4$ Па

Fig. 5. Dependences on the specific load of the processed material of protein yield (a) and completeness of waste release (b) at different dynamic pressure of the air flow in the pneumatic separation channel with battery and column accelerators; completeness of waste release (c) at different heights of the battery accelerators and $P=5.4$ Pa

Выводы. Экспериментально установлено, что коэффициент живого сечения ускорителя должен составлять 50–60%, высота батарейного ускорителя – от 55 до 75 мм. Высота установки батарейного ускорителя над вершинами рассекателей потока обрабатываемого материала должна быть от 160 до 220 мм.

Динамическое давление в пневмосепарирующем канале для достижения максимально возможного количества белка (не менее 75%) и полноты выделения примеси (не менее 70%) должно составлять

от 2,4 до 5,4 Па. Ширина батарейного ускорителя должна быть равна ширине пневмоканалов и составлять 200 мм, длина – 260 мм для 1-го канала и 480 мм для 2- и 3-го каналов.

Оптимальная удельная нагрузка обрабатываемого материала составляет до 2,0 кг/(см²·ч). Это обеспечивает пропускную способность машины до 2 т/ч при варьировании содержания выделяемого компонента (белка) в исходном материале от 35 до 40%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Баязитова К.Н., Иль Е.Н., Иль Д.Е. и др. Применение подсолнечного шрота и дробленых семян льна в рационе сухостойных коров // *Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина*. 2023. N1-1(116). С. 165-174. DOI: 10.51452/kazatu.2023.1(116).1346.
- Дорохов А.С., Чилингарян Н.О. Состояние и перспективы развития комбикормовой промышленности в Российской Федерации // *Аграрный вестник Урала*. 2020. N7(198). С. 75-84. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-198-7-75-84.
- Крылова И.В., Федоров А.В., Доморощенкова М.Л. и др. Влияние состава подсолнечного шрота на эффективность отделения белковой части сырья от клетчатки методом механического фракционирования // *Научный журнал НИУ ИТМО*. 2024. N1 (59). С. 3-13. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13.
- Крылова И.В., Федоров А.В. Изучение фракционирования подсолнечного шрота при различных способах измельчения // *Вестник Международной академии холода*. 2024. N3. С. 56-61. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-56-61.
- Доморощенкова М.Л., Крылова И.В., Кандроков Р.Х. Исследование продуктов переработки подсолнечного шрота и жмыха, полученных механическим способом // *Вестник ВНИИ жиров*. 2020. N1-2. С. 30-36. DOI: 10.25812/VNPIG.2020.90.41.022.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Зюлин А.Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурсо- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. N1. С. 2-9. EDN: JXTJCH.
- Московский М.Н., Борзенко С.И. Распределение высокозагрязненного соевого материала в глубоком воздушном канале // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N4. С. 42-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-42-48.
- Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Исследование осадочной камеры второй аспирации универсального сепаратора зернового вороха // *Пермский аграрный вестник*. 2023. N3(43). С. 4-11. DOI: 10.47737/2307-2873_2023_43_4.
- Хамуев В.Г., Пехальский И.А., Герасименко С.А., Борзенко С.И. Разработка рабочего органа вертикального пневмоканала для очистки шрота подсолнечника // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2024. N5(77). С. 402-411. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-45.
- Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Обоснование основных конструктивных параметров разделительной камеры пневмосепаратора с использованием различных методов расчета траекторий частиц в пневмосепарирующем канале // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022. Т. 23. N3. С. 402-410. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.402-410.
- Борзенко С.И., Герасименко С.А. Определение положения сужающих перегородок в глубоком пневмоканале при очистке высокозагрязненного соевого материала // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2024. N5(77). С. 411-418. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-46.
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Определение толщины сужающих перегородок в вертикальном пневмосепарирующем канале при очистке семян сои // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 79-84. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-79-84.
- Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
- Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Повышение эффективности пневмосепарирующего устройства машины предварительной очистки зерна // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. N4. С. 22-27. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-22-27.
- Дринча В.М., Ценч Ю.С. Эволюция зерно-семяочистительной техники в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N1. С. 24-33. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-1-24-33.

REFERENCES

- Bayazitova K.N., Il E.N., Il D.E. et al. Application of sunflower meal and crushed flax seeds in the diet of dry cows. *Herald of science of S.Seifullin Kazakh agrotechnical university*. 2023. N1-1(116). 165-174 (In Russian). DOI: 10.51452/kazatu.2023.1(116).1346.
- Dorokhov A.N., Chilingaryan N.O. Status and development

- prospects of the feed industry in the Russian Federation. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020. N7(198). 75-84 (In Russian). DOI: 10.32417/1997-4868-2020-198-7-75-84.
3. Krylova I.V., Fedorov A.V., Domoroshchenkova M.L. et al. Influence of the composition of sunflower meal on the efficiency of separating the protein part of the raw material from fiber by mechanical fractionation. *Scientific Journal NRU ITMO*. 2024. N1 (59). 3-13 (In Russian). DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13.
 4. Krylova I.V., Fedorov A.V. Sunflower meal fractionation using various crushing techniques. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. N3. 56-61 (In Russian). DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-56-61.
 5. Domoroshchenkova M.L., Krylova I.V., Kandrov R.H. Research of products of sunflower meal and cake processing produced by mechanical methods. *Vestnik of the All-Russia Scientific Research Institute of Fats*. 2020. N1-2. 30-36 (In Russian). DOI: 10.25812/VNIIG.2020.90.41.022.
 6. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Zyulin A.N. Development and implementation of highly efficient resource and energy saving technologies and technical means of post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2009. N1. 2-9 (In Russian). EDN: JXTJCH.
 7. Moskovskiy M.N., Borzenko S.I. Distribution of heterogeneous, highly impure soy material in a deep air channel. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N4. 42-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-42-48.
 8. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V.Yu. Investigation of the settling chamber of the second aspiration of the universal grain heap separator. *Perm Agrarian Journal*. 2023. N3(43). 4-11 (In Russian). DOI: 10.47737/2307-2873_2023_43_4.
 9. Khamuev V.G., Pekhalsky I.A., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I. Development of the working body of a vertical pneumatic channel for cleaning sunflower meal. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2024. 5(77). 402-411 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-45.
 10. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V. Yu. Substantiation of the main design parameters of the separator chamber of the pneumatic separator using various methods for calculating particle trajectories in the pneumoseparating channel. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022. Vol. 23. N3. 402-410 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.402-410.
 11. Borzenko S.I., Gerasimenko S.A. Determination of the position of constricting baffles in a deep pneumatic duct during cleaning of highly contaminated soybean material. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2024. N5(77). 411-418 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-46.
 12. Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Quantifying narrowing partition thickness in a vertical pneumatic separation channel for soybean seed cleaning. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 79-84 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-79-84.
 13. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25 (In English). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
 14. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V.Yu. Increasing the efficiency of the pneumatic separating device of a grain pre-cleaner. *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 24. N4. 22-27 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-22-27.
 15. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Evolution of grain and seed cleaning equipment in Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N1. 24-33 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-1-24-33..

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Московский М.Н. – научное руководство, формирование общих выводов;

Хамуев В.Г. – сборка установки, методология, обобщение данных литературы, итоговая переработка статьи;

Герасименко С.А. – сборка установки, проведение опыта, обработка данных опыта, составление начального варианта статьи, литературный анализ, доработка текста;

Борзенко С.И. – сборка установки, проведение опыта, литературный анализ.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Moskovsky M.N. – scientific supervision, formulation of general conclusions;

Khamuev V.G. – setup assembly, development of methodology, literature review, final revision of the manuscript;

Gerasimenko S.A. – setup assembly, experiment conduction, data processing, drafting the initial version of the manuscript, literature review, manuscript revision;

Borzenko S.I. – setup assembly, experiment conduction, 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

30.06.2025

14.08.2025



Обоснование параметров размещения новых рабочих органов на раме парового культиватора

Галина Геннадьевна Пархоменко¹,
 кандидат технических наук,
 ведущий научный сотрудник,
 e-mail: parkhomenko.galya@yandex.ru;
Дмитрий Сергеевич Подлесный^{1,2},
 старший преподаватель,
 e-mail: podlesniy.dmitri@yandex.ru;
Сергей Иванович Камбулов^{1,2},
 доктор технических наук, профессор,
 главный научный сотрудник,
 e-mail: kambulov.s@mail.ru;

Виктор Борисович Рыков^{1,2},
 доктор технических наук, профессор,
 главный научный сотрудник,
 e-mail: rykovvb@mail.ru;
Олег Алексеевич Полушкин²,
 доктор технических наук, профессор,
 e-mail: polushckinol@yandex.ru

¹Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация;

²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что существующие паровые культиваторы не всегда соответствуют требованиям по качественным показателям технологического процесса поверхностной обработки почвы, в частности, при использовании стрельчатых лап. Совершенствование рабочих органов парового культиватора может осуществляться путем коренной модернизации конструкции, при полном отказе от стрельчатых лап. (*Цель исследования*) Выбор рационального размещения рабочих органов на раме парового культиватора. (*Материалы и методы*) Предлагаемая конструкция нового рабочего органа парового культиватора, без стрельчатых лап, состоит из стойки с долотом и последовательно установленных на ней лево- и правосторонних плоскорезов. (*Результаты и обсуждение*) Выявлены виды сред, влияющие на тяговое сопротивление рабочего органа парового культиватора: при отсутствии разрушенной почвы с боковых сторон среда сплошная; при наличии разрушенной почвы с одной стороны – полусплошная, с двух сторон – свободная. Определена наиболее рациональная схема размещения четного количества рабочих органов на раме парового культиватора, т.е. двухрядная с изменяемой шириной захвата. При этом половина рабочих органов функционирует в условиях сплошной среды, один – полусплошной, а остальные – свободной среды с наименьшим тяговым сопротивлением. (*Выводы*) В результате расчетов определены следующие параметры размещения на раме парового культиватора: схема двухрядная с четным количеством рабочих органов; количество рабочих органов 6; ширина захвата машины 3 метра; расстояние вдоль рабочего органа 52-54 сантиметра; поперечное расстояние между рабочими органами 48-50 сантиметров.

Ключевые слова: паровой культиватор, обработка почвы, рама культиватора, параметры культиватора.

■ **Для цитирования:** Пархоменко Г.Г., Подлесный Д.С., Камбулов С.И., Рыков В.Б., Полушкин О.А. Обоснование параметров размещения новых рабочих органов на раме парового культиватора // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 30-36. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-30-36. EDN: LXTVNQ.

Scientific article

Justification of the Parameters for Arranging New Working Bodies on the Frame of a Steam Cultivator

Galina G. Parkhomenko¹,
 Ph.D.(Eng.), leading researcher,
 e-mail: parkhomenko.galya@yandex.ru;
Dmitry S. Podlesny^{1,2},
 senior lecturer, e-mail: podlesniy.dmitri@yandex.ru;
Sergey I. Kambulov^{1,2},
 Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher,
 e-mail: kambulov.s@mail.ru;

Viktor B. Rykov^{1,2},
 Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher,
 e-mail: rykovvb@mail.ru;
Oleg A. Polushkin²,
 Dr.Sc.(Eng.), professor,
 e-mail: polushckinol@yandex.ru

¹Agricultural Research Center «Donskoy», Zernograd, Russian Federation;

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that existing steam cultivators do not always meet the quality requirements for the technological process of surface tillage, particularly when equipped with sweep shares. The performance of steam cultivator working bodies can be improved through a fundamental redesign involving the complete elimination of sweep shares. (*Research purpose*) The study aims to determine the optimal arrangement of working bodies on the frame of a steam cultivator. (*Materials and methods*) The proposed design of the new working element, excluding sweep shares, consists of a shank with a chisel and consecutively mounted left- and right-sided flat cutters. (*Results and discussion*) The study identified three distinct soil conditions affecting the draft resistance of the steam cultivator's working element: solid – without loosened soil on the sides; semi-solid – with loosened soil on one side; and free – with loosened soil on both sides. It was established that most efficient arrangement of an even number of working bodies on the cultivator frame is a two-row configuration with adjustable working width. In this arrangement, half of the working bodies operate under solid conditions, one operates under semi-solid conditions, and the rest operate under free conditions, which ensure the lowest draft resistance. (*Conclusions*) The calculations yielded the following optimal parameters for arrangement of working bodies on the steam cultivator frame: a two-row arrangement with an even number of working bodies; a total of 6 working bodies; a machine working width of 3 meters; a longitudinal spacing between working bodies of 52–54 centimeters; and a transverse spacing of 48–50 centimeters.

Keywords: steam cultivator, soil cultivation, cultivator frame, cultivator parameters.

■ **For citation:** Parkhomenko G.G., Podlesny D.S., Kambulov S.I., Rykov V.B., Polushkin O.A. Justification of the parameters for arranging new working bodies on the frame of a steam cultivator. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 30-36 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-30-36. EDN: LXTVQNQ.

При возделывании сельскохозяйственных культур одним из основных процессов обработки почвы является культивация, которая заключается в рыхлении, крошении почвы, подрезании корневой системы сорняков. Эти процессы осуществляются культиваторами. Однако существующие паровые культиваторы не всегда соответствуют требованиям по качественным показателям технологии процесса поверхностной обработки почвы. Совершенствование рабочих органов парового культиватора может осуществляться путем коренной модернизации его конструкции, полного отказа от стрельчатых лап.

Повышение эффективности почвообрабатывающих машин требует создания принципиально новой конструкции рабочих органов, проектирование которых основано на общей методологии исследования. Должны быть учтены свойства среды, в которой функционирует рабочий орган, с использованием для его проектирования бионического формообразования [1, 2]. При этом методика определения параметров при актуальных требованиях к качеству обработки почвы [3] должна иметь единую структуру, пригодную для расчета различных конструкций рабочего органа с учетом индивидуальных особенностей и назначения почвообрабатывающей машины.

Рабочий орган парового культиватора предназначен для подрезания сорных растений по всей поверхности поля, нарушения капиллярности и перемешивания растительных остатков в верхнем слое почвы, создания четкого посевного ложа. Наиболь-

ший научный и практический интерес представляют результаты исследования взаимодействия рабочего органа с обрабатываемой средой. Это послужит основой для проектирования, определения параметров и режимов функционирования новых рабочих органов на основании силового расчета [4], структурного моделирования [5] и характеристик энергетического средства для агрегатирования почвообрабатывающей машины [6]. Также необходимо учитывать условия функционирования рабочего органа [7], в частности, аридность климата [8, 9]. Новым направлением адаптации рабочего органа к условиям обрабатываемой среды является разработка конструкции с изменяемыми параметрами [10].

Отмечен ряд недостатков рабочих органов парового культиватора [11]. Так, при использовании стрельчатых лап отмечается большая неравномерность по глубине хода рабочих органов культиватора [12], вынос влажных слоев на поверхность поля, залипание, образование гребней и борозд [13].

Параметры и режимы функционирования рабочего органа необходимо определять комплексно, с использованием согласованных между собой зависимостей, учитывающих не только геометрию конструкции [14, 15]. Не менее важны физико-механические свойства обрабатываемой среды, а также требуемые качественные и энергетические показатели технологического процесса [16, 17].

Цель исследования – выбор рационального размещения предлагаемых новых рабочих органов на раме парового культиватора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В отделе механизации растениеводства Аграрного научного центра «Донской» разработана конструкция нового рабочего органа, без стрельчатых лап, который состоит из стойки с долотом и последовательно установленных на ней лево- и правосторонних плоскорезов (рис. 1).

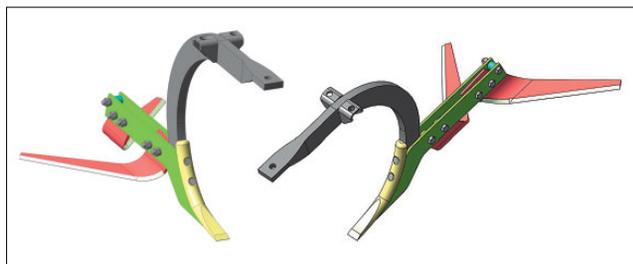


Рис. 1. Новый рабочий орган парового культиватора
Fig. 1. New working body of the steam cultivator

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При разработке конструкции парового культиватора необходимо выбирать схему размещения рабочих органов, при которой не возникают заклинивание комков почвы и забивание растительными остатками промежутков между соседними стойками, но обеспечивается полное подрезание сорной растительности и гладкая поверхность обработанного поля с минимальной гребнистостью, с преобладающим размером фракций не более 25 мм.

При размещении рабочих органов следует стремиться к уменьшению массы за счет сокращения длины, но обеспечивая требуемую ширину захвата машины в зависимости от тягового класса агрегирующего трактора. Также необходимым условием рационального размещения является выбор наименьшего из возможного количества рабочих органов на раме, функционирующих в сплошной среде необработанной почвы. Выполнение данного условия существенно влияет на снижение тягового сопротивления культиватора.

Можно выделить следующие виды сред, влияющих на тяговое сопротивление рабочего органа парового культиватора:

- при отсутствии разрушенной почвы с боковых сторон – сплошная среда;
- при наличии разрушенной почвы с одной стороны – полусплошная среда;
- при наличии разрушенной почвы с двух сторон – свободная среда.

Максимальное тяговое сопротивление наблюдается при размещении рабочих органов в один ряд, поскольку их взаимодействие с необработанной почвой характеризуется наличием сплошной среды. Помимо этого, возможно забивание растительными остатками и почвой промежутков между соседними стойками рабочих органов (рис. 2).

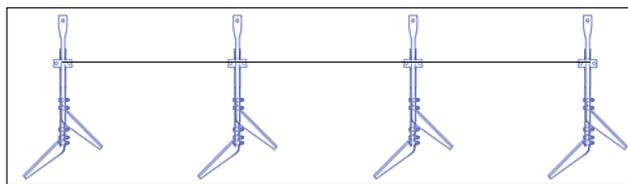


Рис. 2. Схема размещения рабочих органов культиватора в один ряд

Fig. 2. Single-row arrangement of the cultivator's working bodies

Этот недостаток можно устранить при размещении рабочих органов в два и более ряда.

При размещении рабочих органов в два ряда тяговое сопротивление парового культиватора снижается ввиду сокращения количества рабочих органов, функционирующих в сплошной среде неразрыхленной почвы.

В условиях сплошной среды функционируют рабочие органы только первого ряда, а следующие за ними взаимодействуют с разрыхленной почвой, осуществляя процесс полусплошного (с одной стороны) и свободного (с двух сторон) резания. При функционировании рабочих органов в полусплошной среде тяговое сопротивление ниже, чем в условиях сплошной среды из-за рассеивания напряжений у границы разрыхленной почвы.

Тяговое сопротивление снижается ввиду сокращения количества рабочих органов, функционирующих в сплошной среде неразрыхленной почвы. В условиях сплошной среды функционируют рабочие органы только первого ряда, а следующие за ними взаимодействуют с разрыхленной почвой, осуществляя процесс полусплошного (с одной стороны) и свободного (с двух сторон) резания. При функционировании рабочих органов в полусплошной среде тяговое сопротивление ниже, чем в условиях сплошной среды из-за рассеивания напряжений у границы разрыхленной почвы.

При установке рабочих органов в два ряда возможны различные варианты размещения (рис. 3). Вариант 1 с нечетным количеством рабочих органов предусматривает, что четыре передние рабочие органы функционируют в условиях сплошной среды, а три задние – в свободной среде.

В варианте 2 с нечетным количеством рабочих органов три передние функционируют в условиях сплошной среды, два боковые задние – в полусплошной и два центральные – в свободной среде.

В варианте 3 размещения на раме предлагается схема с четным количеством рабочих органов. Половина из них функционирует в условиях сплошной среды, один – в полусплошной, остальные – в свободной среде с наименьшим тяговым сопротивлением. При такой схеме размещения возможно регулирование ширины захвата культиватора посред-

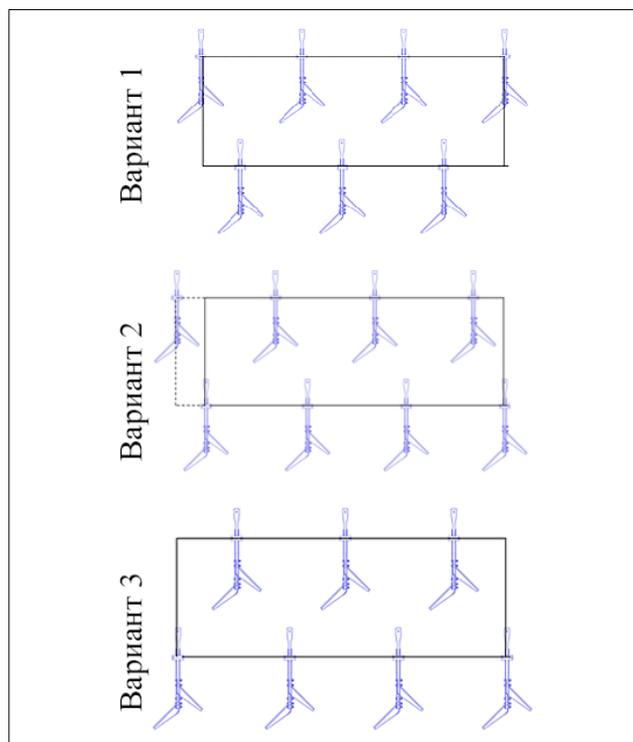


Рис. 3. Схема размещения рабочих органов парового культиватора в два ряда

Fig. 3. Two-row arrangement of the steam cultivator's working bodies

ством демонтажа крайнего рабочего органа переднего ряда.

При функционировании рабочего органа сорная растительность уничтожается в процессе скользящего резания. Поэтому при размещении рабочих органов на раме необходимо учесть перекрытие плоскорезных рыхлителей (проекций соседних плоскорезных рыхлителей при размещении их в два ряда) в поперечном направлении (вариант 2). Данное условие является необходимым для того, чтобы не возникало огрехов при подрезании сорной растительности и сплошном рыхлении почвы при работе культиватора, поскольку он перемещается по полю не всегда прямолинейно.

Отклонение движения культиватора от прямолинейной траектории учитывается углом ω в зависимости от продольного размещения, длины L рабочих органов (рис. 4а) при их перекрытии Δ по формуле:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\Delta}{L}. \quad (1)$$

Размер поперек M есть промежуток между стойками (проекциями их при размещении рабочих органов культиватора в два ряда) в поперечном направлении (вариант 3).

При определении размера вдоль L необходимо учитывать наличие опережающей трещины при взаимодействии с почвой долота рабочего органа,

которое формирует опережающую трещину в продольном направлении, а плоскорезные рыхлители разрезают отделенный массив почвы в поперечном направлении. Опережающая трещина приводит к возникновению области напряженного состояния и разрушению почвы перед лобовой поверхностью долота под углом скола почвы. При этом, чем выше скорость движения, тем дальше распространяется фронт трещины, что сопровождается большей интенсивностью крошения почвы предлагаемым новым рабочим органом.

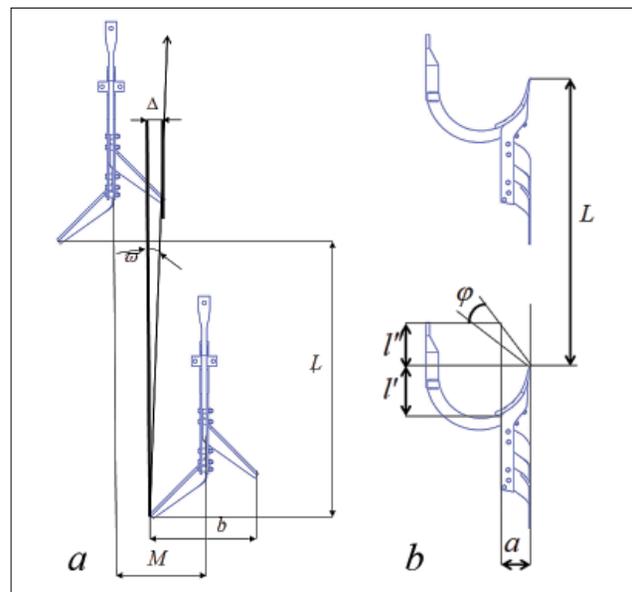


Рис. 4. Определение расстояния между рабочими органами с учетом перекрытия (а) и расстояние между рабочими органами вдоль по ходу движения культиватора (б)
Fig. 4. Determination of spacing between working bodies, taking overlap into account (a) and spacing along the working bodies as the cultivator moves (b)

При размещении рабочих органов вдоль L покрытие области напряженного состояния l'' пространства между стойками характеризуется выносом долота l' в продольном направлении с учетом фронта опережающей трещины (рис. 4б).

$$L \geq l' + l''. \quad (2)$$

Зависимость (2) является условием, при соблюдении которого исключено забивание парового культиватора почвой и растительными остатками в промежутке между передним и задним рядами рабочих органов при размещении их в два ряда.

Вынос долота l' влияет на характер взаимодействия рабочего органа с пластом почвы. При небольшом выносе пласт под влиянием фронта опережающей формируемой трещины расходится в стороны и стойка функционирует в разрушенной почве, что снижает тяговое сопротивление и положительно влияет на качество обработки почвы.

Чрезмерно увеличенный вынос долота может привести к сгуживанию почвы в виде холмика [9] перед рабочим органом и возрастанию тягового сопротивления, повышает гребнистость поля.

При рационально выбранном размере выноса долота формируемая опережающая трещина раскрывается, пласт скалывается и сдвигается в боковые стороны, образуется продольная щель и стойка перемещается по обработанной почве. С учетом соотношения для определения угла скола почвы [10]:

$$L \geq \operatorname{atg} \frac{\beta + \varphi + \rho}{2} + l', \quad (3)$$

где β – угол крошения или установки долота рабочего органа к дну борозды (на схеме не показан), град.; φ – угол внешнего трения почвы по поверхности рабочего органа, град.; ρ – угол внутреннего трения почвы (на схеме не показан), град.

Область напряженного состояния перед рабочим органом культиватора в поперечном направлении формирует поле деформации почвы. Ширину поля можно определить для стрельчатой лапы по зависимости [11]:

$$П = 2 \cdot a + b + 0,5 \cdot \operatorname{atg} \frac{\beta + \varphi + \rho}{2} \cdot \cos \frac{\gamma}{2}, \quad (4)$$

где a – глубина культивации, м; b – ширина рабочего органа, м; γ – угол раствора лапы, град.

Поскольку у плоскорезных рыхлителей рабочего органа угол раствора $\gamma = \pi$, $\cos \pi = 0$ зависимость (4) примет вид:

$$П = 2 \cdot a + b. \quad (5)$$

В поперечно-вертикальной плоскости можно выделить три области напряженного состояния почвы [12] перед рабочим органом культиватора:

- область крошения пласта, определяемая контуром рабочего органа;
- область крошения пласта за пределами рабочего органа, определяемая фронтом распространения опережающей трещины;
- область напряженного состояния деформированного пласта, не достигающего предела разрушения.

При этом чем больше энергии затрачивается в области 1 (E_1) и 2 (E_2), тем ниже энергоемкость (E) обработки почвы паровым культиватором.

Область крошения пласта за пределами рабочего органа определяет условия функционирования в сплошной, полусплошной или свободной среде.

Коэффициент полезного действия рабочего органа рассчитывается по формуле [10]:

$$\eta = \frac{E_1 + E_2}{E} = \frac{E_1 + E_2}{E_1 + E_2 + E_3}. \quad (6)$$

Составляющая полной энергоемкости (E), затрачиваемая на деформирования почвы без крошения (E_3), расходуется нерационально на излишнее уплотнение почвы. Соотношение составляющих формулы (6) зависит от размещения поперек M рабочих органов на раме.

Для обеспечения сплошной культивации почвы без пропусков и огрехов в виде необработанных полос необходимо рабочие органы размещать на раме парового культиватора поперек M таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$M > П. \quad (7)$$

Подставив зависимость (5) в неравенство (7) получим формулу для определения размера поперек M :

$$M > 2 \cdot a + b. \quad (8)$$

Размер поперек M между соседними рабочими органами оказывает значительное влияние на качество обработки почвы. При размещении рабочих органов в один ряд на раме, как правило, либо происходит забивание пространства между рабочими органами при малом M , либо остаются огрехи в виде не полностью подрезанной сорной растительности и необработанной почвы M . Поэтому на раме парового культиватора целесообразно разместить рабочие органы в два ряда.

Наиболее рациональной схемой размещения четного количества рабочих органов на раме культиватора является вариант двухрядной схемы с изменяемой шириной захвата (см. рис. 3).

Количество рабочих органов парового культиватора выбирается в зависимости от размещения их на раме [13] при ширине захвата B с учетом перекрытия Δ :

$$n = \frac{B}{b - \Delta}. \quad (9)$$

где b – ширина рабочего органа, м.

Ширина захвата культиватора выбирается для определенного тягового класса трактора исходя из суммарного тягового сопротивления рабочих органов [14, 15]. При этом тяговое сопротивление рабочих органов, функционирующих в условиях сплошной, полусплошной или свободной среде в зависимости от места и схемы размещения вдоль на раме различно.

На основании приведенных зависимостей произведены расчеты и определены параметры размещения на раме парового культиватора:

- схема двухрядная с четным количеством рабочих органов;
- количество рабочих органов 6;
- ширина захвата машины 3 м;
- расстояние продольное между рабочими органами 52-54 см;
- расстояние поперечное между рабочими органами 48-50 см.

Выводы. Совершенствование рабочих органов парового культиватора может осуществляться путем коренной модернизации конструкции, полного отказа от стрельчатых лап. Предложенная конструкция нового рабочего органа не содержит стрельчатых лап, состоит из стойки с долотом и последовательно установленных на ней лево- и правосторонних плоскорезов.

Необходимым условием рационального размещения рабочих органов является выбор наименьшего из возможного их количества на раме культиватора, функционирующих в сплошной среде необработанной почвы.

При размещении рабочих органов в два и более ряда исключается забивание растительными остатками и почвой промежутков между соседними стойками. При этом тяговое сопротивление культиватора снижается ввиду сокращения количества ра-

бочих органов, функционирующих в сплошной среде неразрыхленной почвы.

Наиболее рациональной схемой размещения четного количества рабочих органов на раме парового культиватора является двухрядная с изменяемой шириной захвата. При этом половина рабочих органов функционирует в условиях сплошной среды, один – в полуплоской, а остальные – в свободной среде с наименьшим тяговым сопротивлением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mamkagh A. Effect of soil moisture, tillage speed, depth, ballast weight and, used implement on wheel slippage of the tractor: a review. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*. 2019. N9 (1). 1-7. DOI: 10.9734/AJAAR/2019/46706.
2. Panagos P., Borrelli P., Poesen J. et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. 2015. N54. 438-447. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.
3. Chappell A., Webb N. Using albedo to reform wind erosion modelling, mapping and monitoring. *Aeolian Research*. 2016. N23. 63-78. DOI: 10.1016/j.aeolia.2016.09.006.
4. 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.
5. Botta G.F., Antille D.L., Bienvenido F. et al. Energy requirements for alleviation of subsoil compaction and the effect of deep tillage on sunflower (*Helianthus annuus L.*) yield in the western region of Argentina's rolling pampa. *Engineering for Rural Development*. 2019. N22. 174-178. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N216.
6. Helmana D., Lenskya I.M., Bonfilb D.J. Early prediction of wheat grain yield production from root-zone soil water content at heading using *Crop RS-Met*. *Field Crops Research*. 2019. N232. 11–23. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.12.003.
7. Nakhaei M., Tafreshi A.M., Tafreshi G.M. A new approach in comparison and evaluation of the overall accuracy of six soil-water retention models using statistical benchmarks and fuzzy method. *Eurasian Soil Science*. 2021. N54 (5). 716-728. DOI: 10.1134/S1064229321050136.
8. Niu G., Shao L.-T., Sun D.A., Guo X. A simplified directly determination of soil-water retention curve from pore size distribution. *Geomechanics and Engineering*. 2020. N20 (5). 411-420. DOI: 10.12989/gae.2020.20.5.411.
9. Lachuga Y., Akhalaya B., Shogenov Y. et al. Tillage de-
- vice of precision processing with pulsed blows of compressed air. Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS), Springer, Cham. 2023. 510.
10. Amin M., Khan M.J., Jan M.T. et al. Effect of different tillage practices on soil physical properties under wheat in semi-arid environment. *Soil and Environment*. 2014. Vol. 33 (1).
11. Mairghanya M., Yahyaa A., Adamb N.M. et al. Rotary tillage effects on some selected physical properties of fine textured soil in wetland rice cultivation in Malaysia. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 194(1-2). 1-11. DOI: 10.1016/j.still.2019.104318.
12. Мяло В.В., Мяло О.В., Демчук Е.В. Обоснование основных параметров рабочего органа культиватора для сплошной обработки почвы // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2019. N2 (34).
13. Wang M., Fu Z.L., Zheng Z.Q. et al. Effect of performance of soil cultivator with different surface textures of shovel wing. *Agriculture*. 2021. 11. 1039. DOI: 10.3390/agriculture11111039.
14. Никонов М.В., Бунеев С.С., Шубкин С.Ю., Клапп А.В. Математическое обоснование схемы расположения рабочих органов на раме культиватора // *Агрпромышленные технологии Центральной России*. 2020. N2 (16). С. 98-103. DOI: 10.24888/2541-7835-2020-16-98-103.
15. Андреев В.Л., Дёмшин С.Л., Ильичёв В.В. и др. Многофункциональный почвообрабатывающий агрегат со сменными рабочими органами // *Вестник НГИЭИ*. 2018. N11 (90). С. 87-102. EDN: YQDNRR.
16. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С., Квас С.А. Развитие технологий полосной энергоресурсосберегающей обработки почвы // *Технический сервис машин*. 2018. Т. 132. С. 232-237. EDN: VLSWCQ.
17. Mudarisov S.G., Mudarisov I.I., Lobachevsky Ya.P. et al. Modeling the technological process of tillage. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 190 (2). 70-77. DOI: 10.1016/j.still.2018.12.004.

REFERENCES

1. Mamkagh A. Effect of soil moisture, tillage speed, depth, ballast weight and, used implement on wheel slippage of the tractor: a review. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*. 2019. N9 (1). 1-7 (In English). DOI: 10.9734/AJAAR/2019/46706.
2. Panagos P., Borrelli P., Poesen J. et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. 2015. N54. 438-447 (In English). DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.
3. Chappell A., Webb N. Using albedo to reform wind erosion

- modelling, mapping and monitoring. *Aeolian Research*. 2016. N23. 63–78 (In English). DOI: 10.1016/j.aeolia.2016.09.006.
4. Akhalaia B.Kh., Starovoitov S.I., Tsench Yu.S. 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.
 5. Botta G.F., Antille D.L., Bienvenido F. et al. Energy requirements for alleviation of subsoil compaction and the effect of deep tillage on sunflower (*Helianthus annuus L.*) yield in the western region of Argentina's rolling pampa. *Engineering for Rural Development*. 2019. N22. 174-178 (In English). DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N216.
 6. Helmana D., Lenskya I.M., Bonfilb D.J. Early prediction of wheat grain yield production from root-zone soil water content at heading using Crop RS-Met. *Field Crops Research*. 2019. N232. 11–23 (In English). DOI: 10.1016/j.fcr.2018.12.003.
 7. Nakhaei M., Tafreshi A.M., Tafreshi G.M. A new approach in comparison and evaluation of the overall accuracy of six soil-water retention models using statistical benchmarks and fuzzy method. *Eurasian Soil Science*. 2021. N54 (5). 716–728 (In English). DOI: 10.1134/S1064229321050136.
 8. Niu G., Shao L.-T., Sun D.A., Guo X. A simplified directly determination of soil-water retention curve from pore size distribution. *Geomechanics and Engineering*. 2020. N20 (5). 411-420 (In English). DOI: 10.12989/gae.2020.20.5.411.
 9. Lachuga Y., Akhalaya B., Shogenov Y. et al. tillage device of precision processing with pulsed blows of compressed air. *Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS)*, Springer, Cham. 2023. 510. (In English).
 10. Amin M., Khan M.J., Jan M.T. et al. Effect of different tillage practices on soil physical properties under wheat in semi-arid environment. *Soil and Environment*. 2014. Vol. 33 (1). (In English).
 11. Mairghanya M., Yahyaa A., Adamb N.M. et al. Rotary tillage effects on some selected physical properties of fine textured soil in wetland rice cultivation in Malaysia. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 194 (1-2). 1-11 (In English). DOI: 10.1016/j.still.2019.104318.
 12. Myalo V.V., Myalo O.V., Demchuk E.V. Foundation of the basic parameters of the working bodies of cultivators for continuous tillage. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*. 2019. N2 (34). (In Russian).
 13. Wang M., Fu Z.L., Zheng Z.Q. et al. Effect of performance of soil cultivator with different surface textures of shovel wing. *Agriculture*. 2021. N11. 1039 (In English). DOI: 10.3390/agriculture11111039.
 14. Nikonov M., Buneev S., Shubkin S., Klapp A. Mathematical substantiation of the scheme of location of working bodies on the frame of a cultivator. *Agro-Industrial Technologies of Central Russia*. 2020. N2 (16). 98-103 (In Russian). DOI: 10.24888/2541-7835-2020-16-98-103.
 15. Andreev V.L., Dyomshin S.L., Ilyichev V.V. et al. Multifunctional soil-cultivating unit with replaceable working bodies. *Bulletin NGIEI*. 2018. N11 (90). 87–102 (In Russian). EDN: YQDNRR.
 16. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Tsench Ju.S., Kvas S.A. Improved technology for stripe energy resource-saving soil processing. *Machinery Technical Service*. 2018. Vol. 132. 232-237 (In Russian). EDN: VLSWCQ.
 17. Mudarisov S.G., Mudarisov I.I., Lobachevsky Ya.P. et al. Modeling the technological process of tillage. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 190(2). 70-77 (In English). DOI: 10.1016/j.still.2018.12.004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Пархоменко Г.Г. – методология, проведение исследований, обработка экспериментальных данных, формирование общих выводов, визуализация;
 Подлесный Д.С. – поиск и анализ литературы, обработка экспериментальных данных, визуализация, доработка текста;
 Камбулов С.И. – концептуализация, научное руководство;
 Рыков В.Б. – методология, поиск и анализ литературы, проведение исследований, визуализация;
 Полушкин О.А. – концептуализация, научное руководство.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Parkhomenko G.G. – methodology, conducting research, experimental data processing, formulation of general conclusions, visualization;
 Podlesny D.S. – literature search and analysis, experimental data processing, visualization, text revision;
 Kambulov S.I. – conceptualization, scientific supervision;
 Rykov V.B. – methodology, literature search and analysis, conducting research, visualization;
 Polushkin O.A. – conceptualization, scientific supervision.
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

26.06.2025
 15.08.2025

EDN: CZNTZO

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-37-42



Научная статья

УДК 631.312



Исследование эффекта продольного перемещения модели почвенного пласта

Юлия Сергеевна Ценч¹,

доктор технических наук, доцент,
член-корреспондент Российской академии наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Яков Петрович Лобачевский¹,

доктор технических наук, профессор,
академик Российской академии наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

Владимир Васильевич Шаров²,

кандидат технических наук, хранитель фондов,
e-mail: sharov_vv56@mail.ru;

Николай Васильевич Алдошин¹,

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
e-mail: naldoshin@yandex.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Музей памяти Лопасненского края, г. Чехов, Российская Федерация

Реферат. Рассмотрены вопросы перемещения почвенного пласта при различных способах вспашки. Выявлен эффект продольного перемещения пласта в процессе его оборота. (*Цель исследования*) Изучение кинематики продольного перемещения почвенного пласта при различных способах оборота (в собственную борозду и в соседнюю борозду) и его количественная оценка. (*Материалы и методы*) Явление перемещения пласта в продольном направлении было обнаружено при изучении кинематики физических моделей пластов. Для проведения исследований была изготовлена пластичная модель почвенного пласта толщиной 1 сантиметр, шириной 2 и длиной 7,5 сантиметра. Закрутка пласта на 180° осуществлялась на расстоянии 5 сантиметров. Объяснением этого явления может быть тот факт, что при осуществлении оборота пласта его центр тяжести поднимается над дном борозды дважды в результате смены опорных ребер пласта. Вследствие этого средняя линия пласта приобретает изогнутый вид. (*Результаты и обсуждение*) Проекция изогнутой линии на плоскость дна борозды всегда короче, чем длина самой линии, поэтому, если специально не растягивать пласт, он неминуемо должен переместиться в продольном направлении в сторону заземленного конца на некоторую величину. Установлены зависимости, позволяющие определять величину продольного перемещения, а также скорость и ускорение поперечного сечения пласта при осуществлении оборота в зависимости от кинематических параметров почвенного пласта. (*Выводы*) Величина продольного перемещения пласта прямо пропорциональна его толщине и зависит от коэффициентов устойчивости и закрутки.

Ключевые слова: обработка почвы, почвенный пласт, оборот пласта, продольное перемещение пласта, кинематика.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П., Шаров В.В., Алдошин Н.В. Исследование эффекта продольного перемещения модели почвенного пласта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 37-42. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-37-42. EDN: CZNTZO.

Scientific article

Effect of Longitudinal Displacement of the Soil Layer Model

Yulia S. Tsench¹,

Dr.Sc.(Eng.), associate professor, corresponding member
of the Russian Academy of Sciences,
chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Yakov P. Lobachevsky¹,

Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy
of Sciences, chief researcher,
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

Vladimir V. Sharov²,

Ph.D.(Eng.), curator of collections,
e-mail: sharov_vv56@mail.ru;

Nikolay V. Aldoshin¹,

Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher,
e-mail: naldoshin@yandex.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²Lopasnya Region Memorial Museum, Chekhov, Russian Federation

Abstract. The study investigates the displacement of the soil layer under different plowing methods. A distinct effect of longitudinal displacement during layer inversion was identified. (*Research purpose*) To examine the kinematics of the longitudinal displacement of the soil layer under different inversion methods (into its own furrow and into the adjacent furrow) and to provide a quantitative assessment of this phenomenon. (*Materials and methods*) The phenomenon of longitudinal displacement was discovered during a kinematic study of physical soil layer models. For the experiments, a plastic model of a soil layer was constructed with dimensions of 1 centimeter in thickness, 2 centimeters in width, and 7.5 centimeters in length. The layer was subjected to a 180° twist over a distance of 5 centimeters. This displacement can be attributed to the elevation of the model's center of gravity above the furrow bottom during inversion, which occurs twice due to the sequential shift of the layer's supporting edges. As a result, the central line of the model becomes curved. (*Results and discussion*) The projection of the curved line onto the plane of the furrow bottom is always shorter than the actual length of the line itself. As a result, unless the layer is forcibly stretched, it inevitably undergoes longitudinal displacement toward the clamped end. The study established relationships that make it possible to determine the magnitude of this displacement, as well as the velocity and acceleration of the soil layer's cross-section during inversion, based on the kinematic parameters of the layer. (*Conclusions*) The magnitude of the soil layer's longitudinal displacement is directly proportional to its thickness and is influenced by the stability and twisting coefficients.

Keywords: soil tillage, soil layer, soil layer inversion, soil layer longitudinal displacement, kinematics.

■ **For citation:** Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P., Sharov V.V., Aldoshin N.V. Effect of longitudinal displacement of the soil layer model. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 37-42 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-37-42. EDN: CZNTZO.

Научкой и практикой доказано, что почва в процессе производства продуктов растениеводства не только не изнашивается, как другие средства производства (машины, сооружения и т.д.), но при правильном ее использовании улучшаются показатели плодородия, обеспечивается рост урожайности сельскохозяйственных культур [1, 2].

По данным Вернадского В.И. [3] с момента возникновения осознанного земледелия сменилось уже более 600 поколений людей. Все это время происходило совершенствование способов и орудий труда по обработке почвы. Постепенно, земледelec освоил такой универсальный прием обработки почвы как выделение из сплошного массива и оборот пласта на 130-180°. Это позволило увеличить глубину и однородность обрабатываемого слоя, производить запашку органики и растительных остатков, уничтожать сорные растения, что значительно повысило урожайность возделываемых культур.

Технология отвальной вспашки широко применяется в наши дни и имеет немало разновидностей [4]. Виды вспашки, осуществляемой отвальными плугами, отличаются друг от друга способом оборота почвенного пласта, который при вращении испытывает деформации различного типа (Алдoшин Н.В. Моделирование качества выполнения механизированных работ. Горячкинские чтения; 1-я Междунар. науч.-практ. конф. 2013. С. 6-13), [5, 6]. Проведенные исследования кинематики оборота пласта в соседнюю борозду [7] показывают, что за счет неравномерной деформации ребер и искривления нейтральной линии пласта, его поперечное сечение перемещается не только в поперечном, но и в продольном направлении.

Обобщая исследования испытателей, профессор Ю.А. Вейс в своей книге [8] отмечал, что при де-

тальном изучении работы плугов было обнаружено интересное явление: одновременно с оборотом пласта происходит его смещение не только в поперечном, но и в продольном направлении, причем правая сторона пласта перемещалась вперед в большей степени, чем левая.

Такие же результаты получены В.Г. Кирюхиным [9]. Проведенные им полномасштабные полевые исследования по изучению перемещения почвы плугом выявили, что полевая грань пласта растягивается при обороте, а бороздная сминается, в результате пласт оборачивается вокруг нижнего бороздного ребра и одновременно с этим отгибается, перемещаясь в направлении движения корпуса. Величина перемещения напрямую зависит от глубины вспашки и ширины вырезаемого пласта.

Эти известные примеры из наблюдений за движением пласта при осуществлении традиционной вспашки [9, 10], помимо многих других, авторами приведены намеренно, так как продольное перемещение почвы до сих пор не получило теоретического осмысления и не учитывается при проектировании лемешно-отвальных поверхностей. Необходимо провести определение факторов, влияющих на продольное перемещение почвенного пласта при обороте и дать их оценку.

Цель исследования. Изучить кинематику продольного перемещения почвенного пласта при различных способах оборота и дать его количественную оценку.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для проведения исследований изготавливалась пластиковая модель почвенного пласта толщиной 1 см, шириной 2 и длиной 7,5 см, закрутка пласта на 180° происходила на расстоянии 5 см. Закручивание модели пласта осуществлялось постепенно, с передней части, при аккурат-

ном и плавном нагружении, до поворота поперечного сечения пласта на некоторый угол, после чего нагружалось следующее поперечное сечение и т.д.

В процессе закручивания модели пласта соблюдалось условие перемещения центра тяжести его поперечного сечения только в продольно-вертикальной плоскости, при этом нижнее ребро пласта не отрывалось от дна борозды. Величина поворота каждого сечения рассчитывалась в зависимости от расстояния, на котором должно произойти оборачивание пласта на 180°. Последовательное воздействие на поперечные сечения осуществлялось с помощью специальной рамки, размеры которой соответствуют поперечным размерам модели.

При достижении оборота поперечного сечения пласта на 180° проводились замеры длины всех ребер пласта и других кинематических показателей.

Для сравнения кинематических показателей аналогичная модель пласта закручивалась на 180° с укладкой в соседнюю борозду (рис. 1).

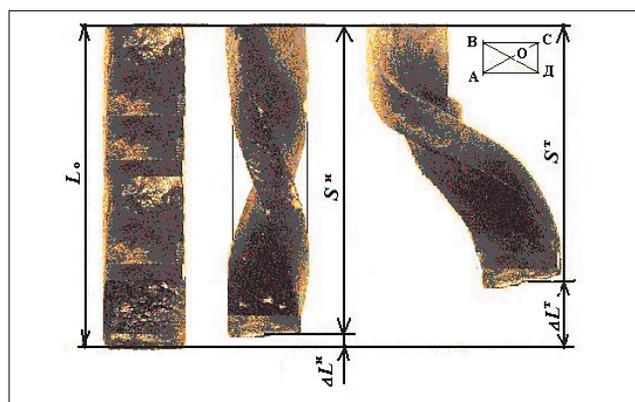


Рис. 1. Кинематика пластиковой модели пласта: слева – пласт до закручивания; в середине – пласт обернут в собственную борозду; справа – в соседнюю борозду

Fig. 1. Kinematics of the soil layer model made of plastic: left – before twisting; center – inverted into its own furrow; right – rotated into the adjacent furrow

Эффект перемещения пласта в продольном направлении был обнаружен при изучении кинематики физических моделей пластов [11]. Объяснением этого явления может быть тот факт, что при обороте пласта его центр тяжести поднимается над дном борозды дважды. Первый раз когда поперечное сечение пласта вращается относительно ребра Д, второй – при смене опорного ребра и вращении пласта вокруг ребра С. В результате средняя линия пласта О–О'–О'' приобретает изогнутый вид (рис. 2). Проекция изогнутой линии на плоскость дна борозды всегда короче, чем длина самой линии, поэтому, если специально не растягивать пласт, он неминуемо должен переместиться в продольном направлении в сторону заземленного конца на некоторую величину ΔL.

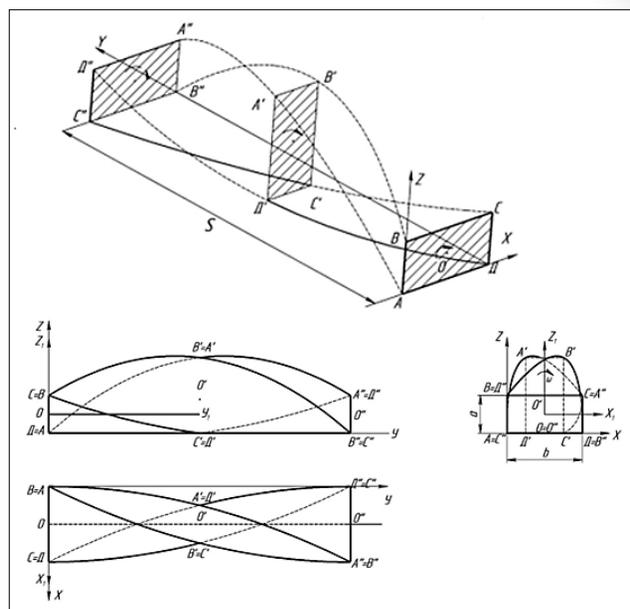


Рис. 2. Кинематика теоретического пласта при обороте в собственную борозду

Fig. 2. Kinematics of the theoretical soil layer during inversion into its own furrow

Усредненные значения результатов исследования пластиковой модели почвенного пласта приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Наблюдения за кинематикой модели пласта, в которой коэффициент устойчивости $k = b/a = 2$, а коэффициент закрутки $\mu = S/b = 2,5$, показали, что при закрутке в свою борозду пласт перемещается в продольном направлении на 3 мм, что составляет 5,8% его первоначальной длины. Ребра пласта при этом подвергаются растяжению, причем величина деформации ребер А и В (34,62%) примерно в 3 раза превышает деформацию ребер С и Д (11,54%).

Величина продольного перемещения при закручивании пластиковой модели пласта в соседнюю борозду составила 19,23% от первоначальной длины, а деформация ребер А и Д равна 48,08%, что в 1,4 раза больше деформации аналогичных ребер пласта при обороте в собственной борозде.

Выявленный эффект продольного перемещения пласта до сих пор не подвергался теоретическим исследованиям. С целью проведения всестороннего анализа необходимо составить математическую модель, описывающую процесс оборота пласта.

Если принять условие, что средняя линия пласта О–О'–О'' одновременно является и нейтральной, т.е. напряжения сжатия и растяжения в ней равны нулю, тогда величина продольного перемещения пласта определится разницей между длиной средней линии пласта L_0 и расстоянием, на котором осуществляется закрутка пласта:

$$S = \mu \cdot b = \mu \cdot k \cdot a, \text{ т.е. } \Delta L = L_0 - S,$$

Кинематические параметры пластиковой модели пласта Kinematic parameters of the soil layer model made of plastic					
Показатели	S , мм	$L(0-\pi)$, мм	L_0 , мм	E , %	ΔL , мм
Ребро А	50 (48)	70 (77)	52 (52)	34,62 (48,08)	3 (10)
Ребро В	50 (48)	70 (77)	52 (52)	34,62 (48,08)	3 (10)
Ребро С	50 (48)	58 (52)	52 (52)	11,54 (0)	3 (10)
Ребро Д	50 (48)	58 (52)	52 (52)	11,54 (0)	3 (10)

S – расстояние, на котором происходит закрутка модели пласта на π рад, мм; $L(0-\pi)$ – длина ребер и средней линии модели пласта после его оборота на π рад., мм; L_0 – первоначальный продольный размер модели пласта, участвующий в обороте, мм; E – деформация ребер модели пласта, %; ΔL – продольное перемещение поперечного сечения модели пласта, мм.
 В скобках указано значения при укладке модели пласта в соседнюю борозду.

$$\text{или } \Delta L = \mu \cdot k \cdot a \cdot \left(\frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \frac{\pi^2(k^2 + 1)}{4 \cdot \mu^2 \cdot k^2}} \times \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{\pi^2(k \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)^2}{4 \cdot \mu^2 \cdot k^2 + \pi^2(1 + k^2)}} d\alpha - 1 \right). \quad (1)$$

Анализ полученной зависимости показывает, что величина продольного перемещения пласта ΔL прямо пропорциональна его толщине и зависит от коэффициентов k и μ . Графические зависимости продольного перемещения пласта ΔL от k и μ в интервале оборота от 0 до 90° показаны на рисунке 3.

Характеры графических зависимостей носят вид плавных кривых. С увеличением коэффициента устойчивости пласта k величина перемещения ΔL возрастает, и наоборот, с ростом коэффициента закрутки пласта μ , перемещение ΔL плавно уменьшается. При толщине пласта $a = 15$ см продольное перемещение максимальное $\Delta L = 9,2$ см при $k = 2,6$, $\mu = 1,5$ и минимальное $\Delta L = 1,6$ см при $k = 1,0$; $\mu = 4,0$. С увеличением толщины пласта до $a = 30$ см максимальное значение перемещения $\Delta L = 18,3$ см при $k = 2,6$; $\mu = 1,5$, а минимальное значение $\Delta L = 3,3$ см при $k = 1,0$; $\mu = 4,0$. Таким образом, видно, что с ростом толщины пласта в два раза его максимальное и минимальное перемещения в продольном направлении также увеличиваются в два раза.

Наличие продольного перемещение пласта говорит о том, что он приобретает в процессе оборота не только угловое, но и продольное ускорение, которое определяется по формуле:

$$a_{\text{пр}} = (V_{\text{max}} - V_0) / t, \quad (2)$$

где V_{max} – максимальная продольная скорость поперечного сечения пласта при его обороте в собственной борозде, м/с; V_0 – начальная скорость поперечного сечения пласта, м/с; t – время, за которое происходит изменение скорости продольного перемещения пласта, с.

Время t определяется как отношение величины продольного перемещения поперечного сечения пласта в интервале оборота от 0 до 90° – $\Delta L/2$ к средней скорости движения $(V_{\text{max}} - V_0) / 2$

$$t = \Delta L / (V_{\text{max}} - V_0).$$

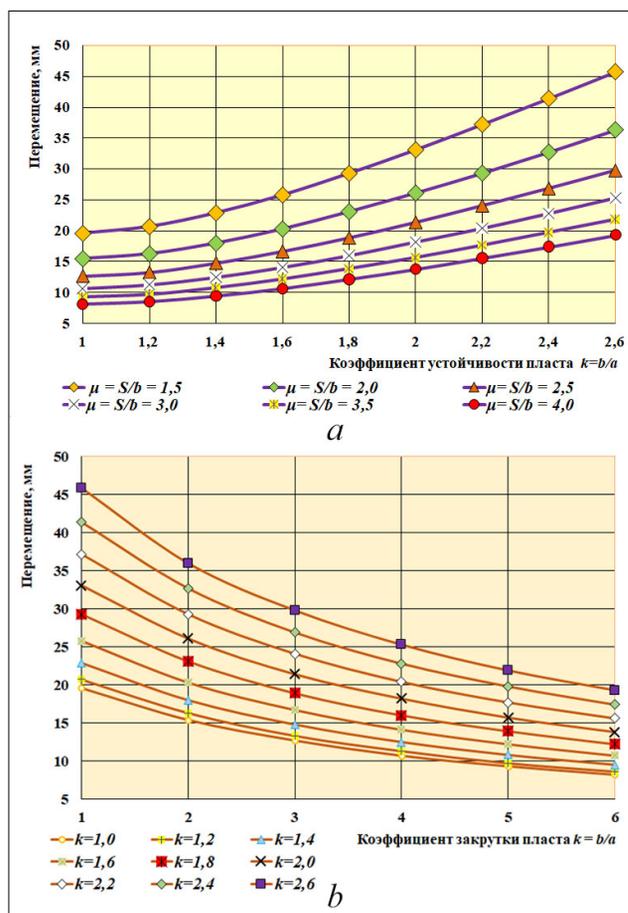


Рис. 3. Продольное перемещение теоретического пласта в интервале от 0 до 90° при толщине пласта $a = 0,15$ м: а – в зависимости от коэффициента μ , при различных значениях коэффициента k ; б – в зависимости от коэффициента k , при различных значениях коэффициента μ
 Fig. 3. Longitudinal displacement of the theoretical soil layer in the range from 0 to 90° at a soil layer thickness of $a = 0.15$ m: а – as a function of coefficient μ , at different values of coefficient k ; б – as a function of coefficient k , at different values of coefficient μ

За время оборота поперечного сечения продольная скорость пласта вначале увеличивается от 0 (начальное положение) до максимума при обороте пласта на 90°, а затем вновь уменьшается до 0 (конечное положение) [12, 13]. Такое изменение скорости соответству-

ет общей схеме протекания естественных процессов, описанных академиком В.П. Горячкиным [14, 15].

Время t , за которое происходит изменение скорости продольного перемещения пласта, соответствует времени, за которое деформатор (корпус плуга) проходит расстояние, равное половине длины оборачиваемого пласта $L_0/2$. Из этого следует:

$$t = L_0 / 2 \cdot V_{\text{АГР}} \quad (3)$$

при $V_0 = 0$, V_{max} определяется из соотношения:

$$V_{\text{max}} = (2 \cdot \Delta L \cdot V_{\text{АДТ}}) / L_0 \quad (4)$$

С учетом обусловленных закономерностей формулу по определению продольного ускорения (2) можно преобразовать следующим образом:

$$a_{\text{ПР}} = \frac{V_{\text{max}} - V_0}{t} = \frac{V_{\text{max}}}{t} = \frac{2 \cdot \Delta L \cdot V_{\text{АГР}}}{t \cdot L_0} = 4 \cdot \Delta L \cdot \left(\frac{V_{\text{АГР}}}{L_0} \right)^2 \quad (5)$$

Ускорение пласта вначале имеет положительное значение (от 0 до 90°), а затем отрицательное (от 90 до 180°). Величина продольного ускорения прямо пропорционально квадрату скорости деформатора

$V_{\text{АГР}}$ и значению продольного перемещения ΔL .

Таким образом, проведенный анализ позволил установить зависимости (1), (4), (5) для определения величины продольного перемещения ΔL , а также скорость V_{max} и ускорение $a_{\text{ПР}}$ поперечного сечения пласта при осуществлении оборота в свою борозду в зависимости от кинематических параметров $a, b, S, L_0, V_{\text{АГР}}$. Следует предполагать, что при взаимодействии с отвалом продольное перемещение пласта за счет сил трения должно возрасти.

Выводы. Получены зависимости, характеризующие продольное перемещение почвенного пласта при его обороте во время обработки почвы. Проведена оценка величины продольного перемещения пласта ΔL , которое прямо пропорционально его толщине и зависит от коэффициентов устойчивости k и закрутки μ . Определены скорость V_{max} и ускорение $a_{\text{ПР}}$ поперечного сечения пласта при осуществлении оборота в свою борозду в зависимости от кинематических параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гареев И.Ф., Хабибуллин Р.Ф., Мударисов С.Г. Современные технологии обработки почвы: комплексный анализ эффективности и условий применения // *Российский электронный научный журнал*. 2025. N1 (55). С. 134-143. DOI: 10.31563/2308-9644-2025-55-1-134-143.
2. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агронимические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // *Кормопроизводство*. 2022. N3. С. 41-47. DOI: 10.25685/krm.2022.3.2022.007.
3. Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Методологические аспекты стандартизации машинных технологий производства продукции растениеводства // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N1 (34). С. 61-67. EDN: WDXYHY.
4. Трубилин Е.И., Масловский В.И., Дробот В.А. и др. Многомашинные агрегаты для основной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2017. N12. С. 10-15. EDN: ZXYGID.
5. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Личман Г.И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
6. Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023. Vol. 109. 37-44. DOI: 10.1016/j.jterra.2023.06.001.
7. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С., Квас С.А. Развитие технологий полосной энергоресурсосберегающей обработки почвы // *Технический сервис машин*. 2018. Т. 132. С. 232-237. EDN: VLSWCQ.
8. Божко И.В., Пархоменко Г.Г., Громаков А.В. и др. Разработка комбинированного рабочего органа для послойной безотвальной обработки почвы // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N8. С. 3-6. DOI: 10.17816/0321-4443-66172.
9. Белоусов С.В., Рыков В.Б., Камбулов С.И., Туровский Б.В. Разрушение слоя почвы рабочими органами плоскорезающего типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N1. С. 61-68. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-61-68.
10. Mudarisov S., Farkhutdinov I., Khamaletdinov R. et al. Evaluation of the significance of the contact model particle parameters in the modelling of wet soils by the discrete element method. *Soil & Tillage Research*. 2022. Vol. 215. 105228. DOI: 10.1016/j.still.2021.105228.
11. Лобачевский Я.П., Шаров В.В., Алдошин Н.В. и др. Теоретические аспекты оборота пласта в габаритах собственной борозды // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N4. С. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-4-9.
12. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Система машин как фактор научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. N4. С. 67-72. DOI: 10.31857/S250026272404012.
13. Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Аминов Р.И. Моделирование технологического процесса обработки почвы MDE и CFD-методами // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N3 (32). С. 147-155. EDN: DDZGFU.
14. Миронова А.В. Технологические и физико-механические свойства задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N1. С. 63-68. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-63-68.
15. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Корявин С.М. Моделирование работы винтового г-образного ножа почвообрабатывающей фрезы // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. N7. С. 13-19. EDN: ZDNIHX.

REFERENCES

- Gareev I.F., Khabibullin R.F., Mudarisov S.G.. Modern soil cultivation technologies: comprehensive analysis of efficiency and conditions of application. *Russian Electronic Scientific Journal*. 2025. N1(55). 134-143 (In Russian). DOI: 10.31563/2308-9644-2025-55-1-134-143
- Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lylin N.A. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Kormoproizvodstvo*. 2022. N3. 41-47 (In Russian). DOI: 10.25685/krm.2022.3.2022.007.
- Beilis V.M., Tsench Yu.S. Methodological aspects of standardization of machine technologies for crop production. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2019. N1 (34). 61-67 (In Russian). EDN: WDXYHY.
- Trubilin E.I., Maslovsky V.I., Drobot V.A. Multi-machine units for basic soil cultivation. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017. N12. 10-15 (In Russian). EDN: ZXYGID.
- Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Lichman G.I. Technical systems for digital soil quality control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020, Vol. 14. N1. 16-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
- Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023. Vol. 109. 37-44 (In English). DOI: 10.1016/j.jterra.2023.06.001.
- Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Tsench Ju.S., Kvas S.A. Improved technology for stripe energy resource-saving soil processing. *Machinery Technical Service*. 2018. Vol. 132. 232-237 (In Russian). EDN: VLSWCQ.
- Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Gromakov A.V. et al. Development of combined working organ for graded sub-surface tillage. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016. N8. 3-6 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-66172.
- Belousov S.V., Rykov V.B., Kambulov S.I., Turovsky B.V. Soil Layer destruction by flat-cutting working bodies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 61-68 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-61-68.
- Mudarisov S., Farkhutdinov I., Khamaletdinov R. et al. Evaluation of the significance of the contact model particle parameters in the modelling of wet soils by the discrete element method. *Soil & Tillage Research*. 2022. Vol. 215. 105228 (In English). DOI: 10.1016/j.still.2021.105228.
- Lobachevsky Ya.P., Sharov V.V., Aldoshin N.V. et al. Theoretical aspects of soil layer turnover within the boundaries of its own furrow. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 4-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-4-9.
- Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P. The machine system as a factor of scientific and technological progress in agro-industrial complex. *Russian Agricultural Sciences*. 2024. N4. 67-72 (In Russian). DOI: 10.31857/S250026272404012.
- Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Aminov R.I. Modeling of technological process of tillage MDE and CFD methods. *Innovations in agriculture*. 2019. N3 (32). 147-155 (In Russian). EDN: DDZGFU.
- Mironova A.V. Technological and physico-mechanical properties of blackened soils. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022 Vol. 16. N1. 63-68 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-63-68.
- Dranyaev S.B., Chatkin M.N., Koryavin S.M. Modeling the operation of a screw L-shaped knife of a tiller. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017. N7. 13-19 (In Russian). EDN: ZDNIHX.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – написание текста статьи;

Лобачевский Я.П. – руководство исследованием, концептуализация, создание окончательной версии (доработка) и редактирование рукописи;

Шаров В.В. – методология статьи, проведение исследования; Алдошин Н.В. – администрирование проекта, создание черновика рукописи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – writing the manuscript text;

Lobachevsky Ya.P. – research supervision, conceptualization, preparation of the final manuscript (revision), and editing; Sharov V.V. – methodology of the article, conducting the research; Aldoshin N.V. – project administration, preparation of the manuscript draft.

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

27.06.2025

25.08.2025

EDN: BRFXTY

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-43-50



Научная статья

УДК 631.343



Оптимизация параметров освещения в процессе съемки модуля оптической идентификации

Андрей Дмитриевич Чиликин,
аспирант, научный сотрудник,
e-mail: gwinnyandrei@yandex.ru;

Дмитрий Олегович Хорт,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: dmitrihort@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Гиперспектральный анализ представляет собой неинвазивный метод, способствующий снижению потерь и повышению качества плодов за счет эффективной идентификации дефектов при сортировке. Ключевым условием получения достоверных данных является стабильное и равномерное освещение, обеспечиваемое специализированными источниками с контролируемым спектром. Интеграция таких систем в автоматизированные линии снижает влияние человеческого фактора, повышает производительность и способствует устойчивому развитию аграрного сектора. (*Цель исследования*) Обосновать параметры гиперспектрометра и источника света в системе освещения. (*Материалы и методы*) Использовали модуль оптической идентификации, представляющий собой систему из шаговых двигателей, реечных и винтовых передач с подшипниками, стол с резиновыми валиками, скорость которых регулируется с помощью трехфазного двигателя, запитанного через частотный преобразователь. Подвеска стенда может перемещаться горизонтально и вертикально с заданной скоростью. Для сбора и обработки информации во время сканирования использовались программы *SpecGrabber* и *CubeCreator*, благодаря чему в дальнейшем полученные снимки возможно было анализировать в программе *Gelion*. (*Результаты и обсуждение*) Выбран гиперспектрометр в модуле идентификации. Определены основные источники света в системе освещения. (*Выводы*) Мощность светового потока, полученная в результате расчетов и равная 934 ватта на квадратный метр, соответствует чувствительности *CMOS*-детектора от 100-1500 ватт на квадратный метр, Это значит, что камера сможет фиксировать гиперспектральные данные при заданных экспозиции и освещенности. Для системы освещения в модуле необходимо установить четыре галогеновые лампы, что соответствует уровню освещенности 3010 люксов. При данном уровне освещенности были получены достоверные графики спектра здоровой и пораженной болезнью областей, а также низкий показатель экспозиции кадра спектрометра 2,1 миллисекунды, что повлияло на время сканирование, которое оказалось менее, чем 2 секунды.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, гиперспектрометр, спектральный анализ, система освещения, источники света, галогенные лампы, спектральная калибровка, сортировка фруктов.

■ **Для цитирования:** Чиликин А.Д., Хорт Д.О. Оптимизация параметров освещения в процессе съемки модуля оптической идентификации // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 43-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-43-50. EDN: BRFXTY.

Scientific article

Optimization of Lighting Parameters for Imaging with the Optical Identification Module

Andrey D. Chilikin,
Ph.D. student (Eng.), researcher,
e-mail: gwinnyandrei@yandex.ru;

Dmitry O. Hort,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;
e-mail: dmitrihort@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Hyperspectral analysis is a non-invasive method that reduces losses and improves fruit quality by accurately identifying defects during sorting. A key requirement for obtaining reliable data is stable, uniform illumination provided by specialized light sources with a controlled spectrum. The integration of such systems into automated production lines minimizes human error, increases productivity, and supports the sustainable development of the agricultural sector. (*Research purpose*) The study aims to substantiate the selection of parameters for the hyperspectrometer and the light source within the illumination system.

(*Materials and methods*) The optical identification module used in this study consists of stepper motors, rack-and-pinion and screw drives with bearings, and a platform with rubber rollers, the speed of which is regulated by a three-phase motor powered through a frequency converter. The stand suspension can move both horizontally and vertically at a preset speed. SpecGrabber and CubeCreator software was used to collect and process data during scanning, enabling subsequent image analysis using Gelion software. (*Results and discussion*) A hyperspectrometer was selected for the identification module, and the main light sources for the illumination system were determined. (*Conclusions*) The calculated luminous flux is 934 watts per square meter, which falls within the sensitivity range of 100–1500 watts per square meter for the Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) detector. This confirms that the camera can capture hyperspectral data under the specified exposure and illumination conditions. It was determined that four halogen lamps should be installed in the illumination module, providing an illuminance level of 3010 lux. At this lighting level, reliable spectral graphs were obtained for both healthy and diseased fruit areas. Additionally, the short exposure time of 2.1 milliseconds per spectrometer frame resulted in a total scanning time of less than 2 seconds.

Keywords: hyperspectral imaging, hyperspectrometer, spectral analysis, illumination system, light sources, halogen lamps, spectral calibration, fruit sorting

■ **For citation:** Chilikin A.D., Hort D.O. Optimization of lighting parameters for imaging with the optical identification module. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 43-50 (In English). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-43-50. EDN: BRFXTY.

Процесс сортирования фруктов по качественным характеристикам представляет собой один из наиболее значимых этапов послеуборочной обработки продукции. Перед отправкой на хранение или реализацию плоды и овощи подвергаются обязательной сортировке, что позволяет своевременно устранить дефектные экземпляры, выявить несоответствующие стандартам фрукты по размеру, а также обнаружить повреждения, вызванные фитопатологическими заболеваниями или механическим воздействием. Внешние дефекты, такие как вмятины, ожоги и деформации, существенно ухудшают товарный вид продукции и негативно влияют на сроки хранения [1]. Одной из приоритетных задач в данном процессе является разработка методов точного распознавания различных видов повреждений, полученных плодами в процессе сбора и транспортировки [2]. Дополнительно необходимо учитывать физическую и биологическую изменчивость плодов, что усложняет процесс их классификации.

Анализ практического опыта отечественной промышленности и зарубежных исследований свидетельствует о высокой эффективности применения оптико-электронных систем управления, а также технического зрения, работающего в диапазоне видимого и ближнего инфракрасного излучения. В целях повышения точности контроля качества плодов все чаще используются технологии гиперспектрального и мультиспектрального анализа, позволяющие детально оценивать их состояние (Курбанов Р.К., и др. Планировщик параметров аэрофотосъемки с мультиспектральной камерой. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024665531, 02.07.2024. Заявка № 2024664098 от 18.06.2024). Для обеспечения корректной работы систем технического зрения, функционирующих в

видимом диапазоне спектра, критически важно организовать эффективную систему освещения [3]. Достигнуть равномерного освещения без появления теней и бликов возможно при использовании источников света с постоянным разнонаправленным потоком, а также импульсных световых источников, синхронизированных с видеокамерами в соответствии с частотой видеопотока [4]. Это позволяет значительно повысить качество получаемых изображений и, как следствие, точность определения характеристик плодов.

Цель исследования: обосновать параметры гиперспектрального модуля и источника света в системе освещения.

Материалы и методы. Для получения гиперспектральных изображений, используемых для классификации и выявления заболеваний и механических повреждений яблок, создан специализированный модуль оптической идентификации (*рис. 1*).

Оптическая система включает в себя гиперспектральную камеру 2, блок управления (ноутбук), платформу (стол) с резиновыми роликами 3 и систему перемещения камеры. Гиперспектральная камера обеспечивает высокую детализацию сканируемого объекта. Он излучает свет с различными длинами волн в инфракрасной области спектра и обладает такими спектроскопическими характеристиками, как отражательная способность и флуоресценция [5].

Как только свет отражается от поверхности объекта, он визуализируется. В зависимости от своего химического состава сканируемый объект по-разному отражает свет, создавая уникальную спектральную характеристику [6]. Затем эта характеристика сравнивается с эталонными данными из базы данных, хранящейся на блоке управления (ноутбуке).

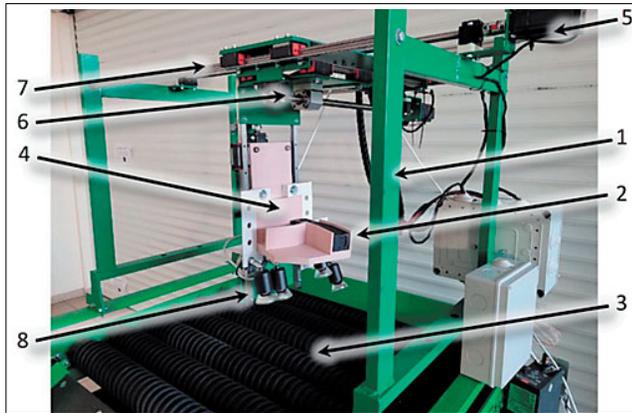


Рис. 1. Система для получения гиперспектральных изображений яблок. 1 – стальной профиль; 2 – гиперспектральная камера; 3 – платформа с резиновыми валиками; 4 – система подвеса камеры; 5, 6 – шаговые электродвигатели; 7 – платформа с каретками; 8 – система освещения

Fig. 1. System for obtaining hyperspectral images of apples: 1 – steel profile; 2 – hyperspectral camera; 3 – platform with rubber rollers; 4 – camera suspension system; 5, 6 – stepper motors; 7 – platform with carriages; 8 – lighting system

Гиперспектральная камера закреплена на подвеске 4, которая может перемещаться с помощью шаговых электродвигателей 5 по направляющим 6 и речным зубчатым передачам 7 вверх-вниз вертикально, вдоль и поперек горизонтально, покрывая всю рабочую поверхность. Шаговые двигатели питаются от сети переменного тока и жестко закреплены на раме 1 сортировочного устройства. Возможность перемещения камеры 2 в горизонтальном и вертикальном направлениях позволяет осуществлять полное сканирование объектов с разных сторон [7]. Система освещения 8 расположена над рабочей поверхностью и необходима для уменьшения экспозиции камеры, а как следствие – сокращение продолжительности сканирования объектов. Благодаря подвижной установке гиперспектральной камеры и системы освещения с микроконтроллером повышаются качество обнаружения микро- и макроповреждений тканей яблок, а также точность классификации объектов при сортировке [8].

Программное обеспечение *SpecGrabber*, разработанное компанией *BaySpec* для управления гиперспектральными камерами серии *OCI™*, обеспечивает захват, обработку и анализ гиперспектральных изображений в реальном времени. Программа позволяет настраивать параметры съемки, такие как экспозиция, скорость сканирования и диапазон длин волн, а также калибровать сенсор для повышения точности получаемых данных. *SpecGrabber* обеспечивает сбор и обработку изображений с высоким пространственным и спектральным разрешением, позволяя синхронизировать процесс съем-

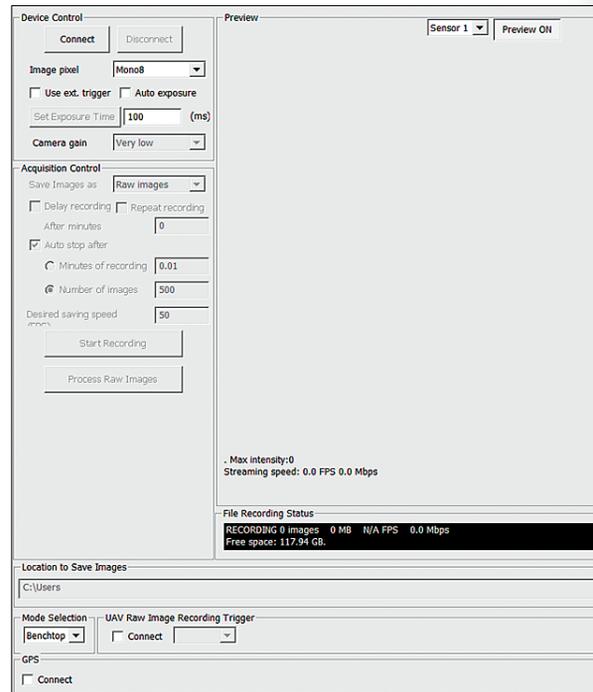


Рис. 2. Главное окно программы *SpecGrabber*
Fig. 2. Main window of the *SpecGrabber* program

ки с внешними устройствами, например, источниками освещения или транспортировочными механизмами. Гиперспектральные кубы данных формируются автоматически и впоследствии используются для спектрального анализа (рис. 2) [9].

Предварительную обработку raw-данных с целью их сборки в гиперкубы производили в программе *BaySpec CubeCreator 2100*. Это программное обеспечение на базе *Microsoft Windows* для обработки необработанных изображений, записанных камерами *BaySpec* в гиперспектральные кубы (рис. 3). Программа позволяет пользователю отображать и проверять белый эталон, темный фон и необработанные изображения. Кроме того, пользователь может использовать программу для просмотра гиперспектральных кубов и полосовых изображений. Это программное обеспечение предназначено для работы под управлением операционных систем *Windows 10* и *Windows 7* [10].

Анализ и обработка гиперспектральных данных, включая разметку зон интереса, просмотр и экспорт спектральных характеристик, а также поканальный спектральный анализ, выполнялись в специализированной программе *Gelion* (рис. 4).

Программа *Gelion* предназначена для обработки данных проксимального зондирования и фенотипирования растений. Она позволяет загружать изображения в различных форматах, включая *ENVI *.hdr*, **.jpg*, **.png* и **.tif*, отображать их в главном окне, а также выполнять масштабирование и вращение изображений. Пользователи могут выделять на изображении различные области интереса, такие

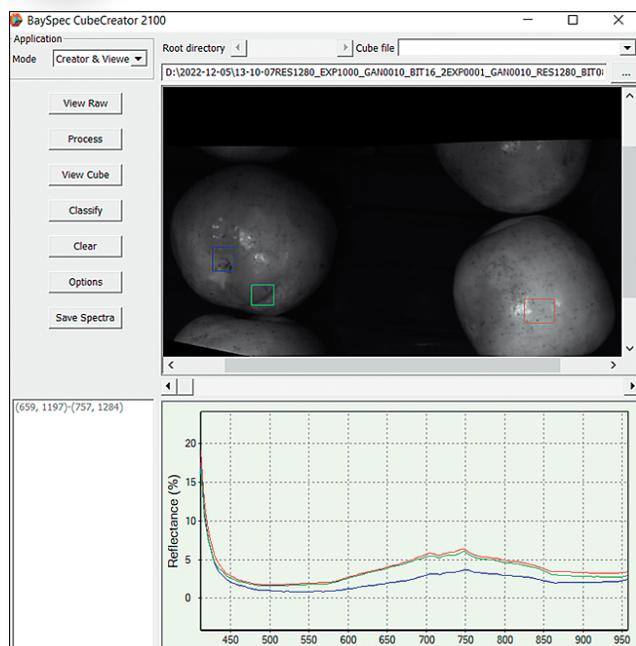


Рис. 3. Формирование гиперкуба с использованием программного обеспечения CubeCreator 2100

Fig. 3. Formation of a hypercube using CubeCreator 2100 software

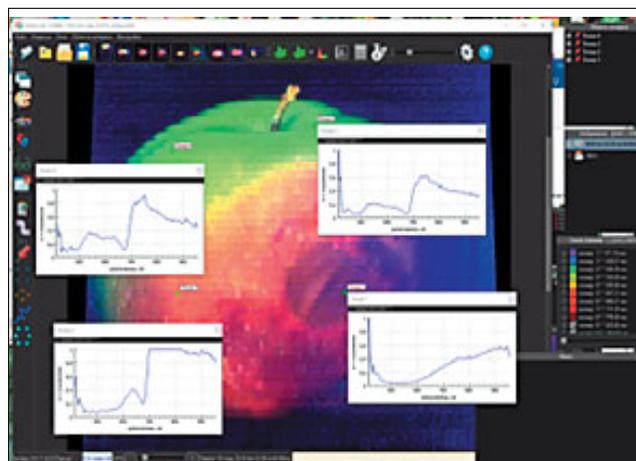


Рис. 4. Гиперкуб биологического объекта в программе Gelion

Fig. 4. Hypercube of a biological object in Gelion software

как точки, прямоугольники, эллипсы, полилинии и полигоны, и отображать спектральные профили этих областей в отдельных окнах просмотра.

Программа предоставляет возможность расчета различных спектральных индексов, как предустановленных, так и заданных пользователем, построения гистограмм этих индексов для всего изображения или выбранных областей. Кроме того, Gelion позволяет создавать тепловые карты спектральных индексов с использованием более 10 различных цветовых шкал, устанавливать пороговые значения для отображения и создавать маски изображений на основе этих индексов [11].

Результаты и обсуждение. Для достижения требуемого уровня линейного сканирования необходимо определить количество энергии, проходящей через определенную площадь поверхности биологического объекта в определенный промежуток времени [12]:

$$D_i = J \cdot t, \quad (1)$$

где J – интенсивность линейного сканирования, Вт/м; t – время облучения, с.

Для определения силы фототока линейного сканирования необходимо определить площадь i -го сечения биологического объекта с упрощенной характеристикой для тела неправильной формы [13]:

$$V_T \approx k_1 \sum_{i=1}^n R_K = \frac{k_2}{2} \sum_{i=1}^n D_K, \quad (2)$$

где R_K, D_K – радиальные и диаметральные размеры биологического объекта, м; k_1 и k_2 – коэффициенты неравномерности радиального и диаметрального размера биологического объекта.

Сила фототока линейного сканирования по объему биологического объекта:

$$V_T \approx k_3 \sum_{i=1}^n D_K, \quad (3)$$

где k_3 – коэффициент неравномерности размера объекта, связанный с распределением формы и сканируемого объема; n – число источников линейного сканирования, шт.

Площадь поверхности яблока:

$$S = 4\pi R^2 = 4\pi \cdot (0,04)^2 \approx 0,0201 \text{ м}^2.$$

Для более точного расчета коэффициенты неравномерности k_1, k_2, k_3 следует оценить на основе реальных данных о форме и размерах яблок. В литературе и исследованиях по сортировке плодов можно найти типичные значения этих коэффициентов [14].

Коэффициент неравномерности радиального размера. В зависимости от сорта форма яблок может варьироваться от идеально сферической до сплюсненной или удлинненной. Обычные яблоки имеют колебания радиуса до 10-15%. Принимаем $k_1 \approx 1,1$.

Коэффициент неравномерности диаметрального размера. Если яблоко не идеально сферично, его диаметр вдоль разных осей может различаться. В среднем отклонение от среднего диаметра может достигать 8-12%. Принимаем $k_2 \approx 1,08$.

Коэффициент неравномерности, связанный с распределением формы плода и сканируемого объема. Сканер воспринимает яблоко как совокупность поперечных сечений разного размера. Так как некоторые части яблока могут иметь больший или меньший вклад в общий объем, коэффициент учитывает это. Принимаем $k_3 \approx 1,05$.

Сила фототока линейного сканирования по объему биологического объекта:

$$V_T \approx 1,1 \cdot 0,04 + \frac{1,08}{2} \cdot (2 \cdot 0,04) = 0,086 \text{ м}^3.$$

$$V_T \approx k_2 \cdot 0,086 = 0,093 \text{ м}^3.$$

Время облучения

$$t_{\text{скан}} = L_{\text{зрен}} / V_{\text{скан}} \quad (4)$$

где $L_{\text{зрен}}$ – поле зрения камеры, м; $V_{\text{скан}}$ – скорость сканирования, м/с;

$$t_{\text{скан}} = 0,15 : 0,0558 = 2,69 \text{ с.}$$

В системе используются внешние источники освещения, например, LED-панели или галогенные лампы, их мощность и распределение света могут быть указаны в паспорте прибора. Тогда интенсивность можно приблизительно оценить по формуле:

$$J = P / L \text{ Вт/м,} \quad (5)$$

где P – мощность светового потока, Вт; L – ширина освещенной полосы, м.

В системе используются четыре лампы JCDR-35/GU5.3 мощностью по 35 Вт:

$$P_{\text{общ}} = 4 \cdot 35 = 140 \text{ Вт.}$$

Ширина освещенной полосы должна соответствовать полю зрения камеры, так как освещение охватывает сканируемую область. Согласно предыдущим расчетам: $L = 0,15$ м.

Интенсивность линейного сканирования:

$$J = 140 / 0,15 = 933,3 \text{ Вт/м.}$$

Количество энергии, проходящей через единицу площади поверхности яблока

$$D_i = 933,3 \cdot 0,0021 = 1,96 \text{ Дж/м}^2.$$

Энергия, проходящая через всю поверхность яблока во время экспозиции камеры:

$$D_{\text{общ}} = D_i \cdot S = 1,96 \cdot 0,021 = 0,0394 \text{ Дж.} \quad (6)$$

Основным инструментом для проведения оптической съемки биологических объектов (плоды яблоки, клубни картофеля) выбран сканирующий гиперспектрометр OCI-F Ultra-Compact Hyperspectral Imager (рис. 5) производства компании BaySpec, Inc.

Для оценки соответствия необходимо сравнить полученное значение энергии с чувствительностью детектора гиперспектральной камеры.

Параметры камеры OCI-F. Спектральный диапазон 600–1000 нм, тип сенсора CMOS чувствительностью от 100–1500 Вт/м² в зависимости от длины волны; оптимальная освещенность сцены от 5000 до 20000 лк; экспозиция настраиваемая от 0,1 до 100 мс.



Рис. 5. Гиперспектрометр OCI-F Ultra-Compact Hyperspectral Imager

Fig. 5. OCI-F Ultra-Compact Hyperspectral Imager

Проверка достаточности энергии для камеры. Для сравнения переведем энергию в мощность на единицу площади:

$$P = \frac{D_{\text{общ}}}{t \cdot S} = \frac{0,0394}{0,0021 \cdot 0,0201} = 934 \text{ Вт/м}^2. \quad (7)$$

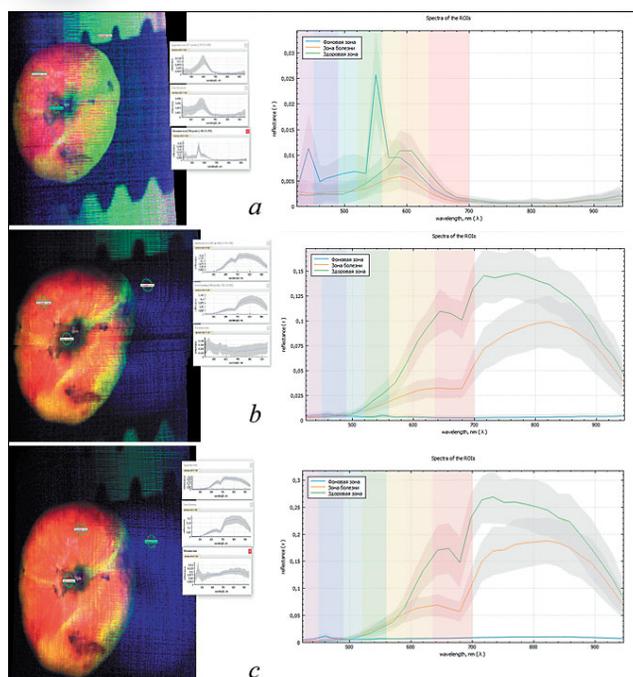
Этот уровень соответствует чувствительности сенсора камеры OCI-F, так как он находится в диапазоне обнаружения. Расчет энергии показывает, что для работы данной камеры света от галогенных ламп достаточно.

На сортировочной установке проведена серия тестированных сканирований с целью получения гиперспектральных снимков при различных условиях освещения яблок: начиная с естественного (без галогенных ламп) и с освещением от одной до четырех галогенных ламп: соответственно 200; 520; 1150; 2890 и 3010 люкс. Были использованы вольфрамовые галогенные лампы Camelion GU10 мощностью по 35 Вт. Результаты сканирования плодов яблони представлены на рисунке 6.

Полученные снимки отличаются качеством изображения и количествами полученных пикселей. Экспозиция кадра гиперспектрометра, которая автоматически варьировалась от 100 до 2,1 мс, выбиралась в зависимости от количества ламп, что значительно влияло на скорость сканирования. Без системы освещения видно, что кадр имеет множество дефектов, был получен не с первого сканирования и за время более 30 с, что характерно для высокой экспозиции кадра (100 мс).

Графики в областях интереса ROI (Region Of Interest), которыми являлись здоровая зона, зона болезни и фон, в варианте *a*, без ламп, не отражают действительные графики, которые характерны для здоровых и болезненных областей яблока [15]. Спектры ненормированные и имеют большой разброс, что видно по прозрачной серой зоне вокруг усредненного спектра.

Аналогичная ситуация в вариантах *b* и *c*, которые были получены не с первых попыток и сканирование заняло до 30 с при экспозиции от 40 до



60 мс. Графики в здоровой области интереса приближены к спектрограммам здорового яблока [16], но все еще с большим разбросом. При сканировании с тремя галогенными лампами (вариант *d*) изображение яблока четкое, без помех и артефактов. Графики практически усредненные, нормированы по максимальному значению. Время сканирования до 5 с и экспозицией 11 мс.

В варианте с использованием всех четырех галогенных ламп (*e*), на спектрограмме виден ряд локальных экстремумов, соответствующих поглощению излучения на определенной длине волны веществом объекта контроля. Известно, что хлорофилл, содержащийся в ткани яблока, имеет максимум поглощения на длине волны 680 нм. Спектрограммы усреднены и нормированы по максимальному значению, что видно по практическому отсутствию серых зон. Время сканирования составило до 2 с при экспозиции 2,1 мс. Изображение выстроено четко с явной областью заболевания в виде солнечного ожога.

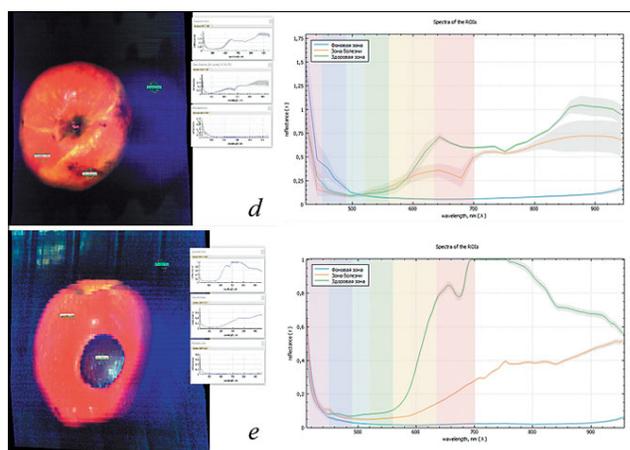


Рис. 6. Результаты сканирования плодов яблоки с различными условиями освещения: *a* – естественно освещение, галогенные лампы отключены, 200 Лк; *b* – включена одна галогенная лампа в системе освещения, 520 Лк; *c* – включены две галогенные лампы, 1150 Лк; *d* – включены три галогенные лампы, 2890 Лк; *e* – включены все галогенные лампы, 3010 Лк

Fig. 6. Results of scanning apple fruits under different lighting conditions: a – natural lighting without halogen lamps; b – one halogen lamp, 520 lx; c – two halogen lamps, 1150 lx; d – three halogen lamps, 2890 lx; e – four halogen lamps, 3010 lx

Выводы. Мощность светового потока, полученная в результате расчетов, равная 934 Вт/м^2 , соответствует чувствительности CMOS-детектора от 100 до 1500 Вт/м^2 . Это означает, что камера сможет фиксировать гиперспектральные данные при заданных экспозиции и освещенности.

В программном обеспечении *Gelion* было установлено, что для системы освещения в модуле необходимо установить четыре галогеновые лампы, что соответствует уровню освещенности 3010 Лк. При данном уровне освещенности получены достоверные графики спектра здоровой и пораженной болезнью областей, а также низкий показатель экспозиции кадра спектрометра 2,1 мс, что повлияло на время сканирование, которое оказалось менее 2 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. 86-96. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95.
2. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. и др. Электрический и механический плодосъемники // *Сельский механизатор*. 2023. №5. С. 15. DOI: 10.47336/0131-7393-2023-5-15-21.
3. Бланк В.А., Скиданов Р.В., Досколович Л.Л. Исследование спектральной линзы для формирования вегетационного индекса NDVI 0,705 // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. №3. С. 20-27. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-20-27.
4. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Разработка типажей сельскохозяйственных технологий для системы машин // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62. С. 136-148. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-136-148.
5. Balabanov P.V., Zhirkova A.A., Chugunov M.V. et al. Detection of defects on apples using hyperspectral reflection visualization combining both vegetation index analysis and neural network. *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1515. 9. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/3/032064.



6. Zhirkova A.A. optoelectronic quality control of apples using methods of multidimensional statistical analysis in the frames of lean manufacturing approach. *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies*. 2022. Vol. 67. 243-246. DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976708.
7. Drozdov D., Kolomeychenko M., Borisov Y. Supervisory mutual augmentation of spectral sensing and machine learning for non-invasive detection of apple fruit damages. *Horticulturae*. 2023. Vol. 8. 2-13. DOI: 10.3390/horticulturae8121111.
8. Шурыгин Б.М., Смирнов И.Г., Чиликин А.Д. и др. Взаимное дополнение спектрального зондирования и машинного обучения для неинвазивного обнаружения повреждений плодов яблони. *Horticulturae*. 2022. Т. 8. С. 4-12. DOI: 10.3390/horticulturae8121111.
9. Wu A., Zhu Z., Ren T. Detection of apple defect using laser-induced light backscattering imaging and convolutional neural network. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. Vol. 81, 4-6. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.106454
10. Fan S., Li J., Zhang Y. et al. On line detection of defective apples using computer vision system combined with deep learning methods. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 286. 7-12. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110102.
11. Huang Y., Lu R., Chen K. Detection of internal defect of apples by a multichannel Vis/NIR spectroscopic system. *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 161. 7-14. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2019.111065.
12. Tang Z., Chen Z., Li G., Hu Y. Multicolor nitrogen dots for rapid detection of thiram and chlorpyrifos in fruit and vegetable samples. *Analytica Chimica Acta*. 2020. Vol. 1136. 72-81. DOI: 10.1016/j.aca.2020.08.038.
13. Фирсов Н.А., Подлипов В.В., Ивлиев Н.А. и др. Нейросетевая классификация гиперспектральных изображений растительности с формированием обучающей выборки на основе адаптивного вегетационного индекса // *Компьютерная оптика*. 2021. Т. 45 (6). С. 887-896. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1038.
14. Vanoli M., Van Beers R., Sadar N. Time- and spatially-resolved spectroscopy to determine the bulk optical properties of Braeburn apples after ripening in shelf life. *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 168. 5-7. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2020.111233.
15. Ali Shah S., Zeb A., Waqar S. Towards fruit maturity estimation using NIR spectroscopy. *Infrared Physics & Technology*. 2020. Vol. 111. 4-7. DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103479.
16. Балабанов П.В., Жиркова А.А., Дивин А.Г. Получение спектрограмм для участков поверхности объектов контроля (яблок), включающих неповрежденную и поврежденную зоны, а также для поверхности конвейера, на котором транспортируются объекты контроля // *Национальная ассоциация ученых*. 2021. N36-2 (63). С. 17-19. EDN: RVHEDR.

REFERENCES

1. Kurbanov R.K., Tsench Yu.S., Zakharova N.I. The main trends in the development of aerial photography technology of agricultural lands. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 86-96. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95.
2. Ahalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V. et al. Electric and mechanical fruit pickers. *Selskiy Mehanizator*. 2023. N5. 15-21 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2023-5-15-21.
3. Blank V.A., Skidanov R.V., Doskolovich L.L. Investigation of a spectral lens for the formation of a normalized difference vegetation index NDVI0.705. *Journal of Optical Technology*. 2022. Vol. 89. N3. 20-27. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-20-27.
4. Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P. Development of types of agricultural technologies for the machine system. *Machinery Technical Service of*. 2024. Vol. 62. N4. 136-148. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-136-148.
5. Balabanov P.V., Zhirkova A.A., Chugunov M.V. et al. Detection of defects on apples using hyperspectral reflection visualization combining both vegetation index analysis and neural network. *Journal of Physics: IOP*. 2020. Vol. 1515 9 (In English). DOI: 10.1088/1742-6596/1515/3/032064.
6. Zhirkova A.A. Optoelectronic quality control of apples using methods of multidimensional statistical analysis in the frames of lean manufacturing approach. *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies*. 2022. Vol. 67. 243-246 (In English). DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976708.
7. Drozdov D. Supervisory Mutual augmentation of spectral sensing and machine learning for non-invasive detection of apple fruit damages. *Horticulturae*. 2023. Vol. 8. 2-13 (In English). DOI: 10.3390/horticulturae8121111.
8. Shurygin B.M., Smirnov I.G., Chilikin A.D. et al. Complementarity of spectral sensing and machine learning for noninvasive detection of damage to apple trees. *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. 4-12 DOI: 10.3390/horticulturae8121111.
9. Wu A., Zhu Z., Ren T. Detection of apple defect using laser-induced light backscattering imaging and convolutional neural network. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. Vol. 81. 4-6 (In English). DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.106454.
10. Fan S., Li J., Zhang Y., Tian X., Huang W. On line detection of defective apples using computer vision system combined with deep learning methods. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 286. 7-12 (In English). DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110102.
11. Huang Y., Lu R., Chen K. Detection of internal defect of apples by a multichannel Vis/NIR spectroscopic system. *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 161. 7-14 (In English). DOI: 10.1016/j.postharvbio.2019.111065.

12. Tang Z., Chen Z., Li G., Hu Y Multicolor nitrogen dots for rapid detection of thiram and chlorpyrifos in fruit and vegetable samples. *Analytica Chemical Acta*. 2020. Vol. 1136. 72-81 (In English). DOI: 10.1016/j.aca.2020.08.038.
13. Firsov N.A., Podlipnov V.V., Ivliev N.A. et al. Neural network-aided classification of hyperspectral vegetation images with a training sample generated using an adaptive vegetation index. *Computer Optics*. 2021. Vol. 45. №6. 887-896. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1038.
14. Vanoli M., Van Beers R., Sadar N. Time- and spatially-resolved spectroscopy to determine the bulk optical properties of Braeburn apples after ripening in shelf life. *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 168. 5-7 (In English). DOI: 10.1016/j.postharvbio.2020.111233.
15. Ali Shah S., Zeb A., Waqar S. Towards fruit maturity estimation using NIR spectroscopy. *Infrared Physics & Technology*. 2020. Vol. 111. 4-7 (In English). DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103479.
16. Balabanov P.V., Divin A.G., Zhirkova A.A. Obtaining spectrograms for the surface areas of the control objects (apples), including intact and damaged zones, as well as for the surface of the conveyor on which the control objects are transported. *National Association of Scientists*. 2021. N36-2 (63). 17-19 (In Russian). EDN: RVHEDR.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Чиликин А.Д. – подготовка текста, анализ литературных данных, подготовка и проведение эксперимента, обработка экспериментальных данных;
Хорт Д.О. – научное руководство, анализ и доработка текста.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Chilikin A.D. – text preparation, literature review, experiment design and execution, processing of experimental data;
Hort D.O. – scientific supervision, analysis and revision of the text.
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

27.06.2025
05.08.2025

EDN: GYGLJX

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-51-58



Научная статья

УДК 004.896



Нелинейное управление двухосевой платформой

Рихам Саад^{1,3},

инженер, аспирант, e-mail: rihamasad126@gmail.com;

Авс Ахмад^{1,2},младший научный сотрудник, старший преподаватель,
e-mail: aws.ahmad318@gmail.com;Мохаммад Исса⁴,

магистрант, e-mail: engineer.93engineer@gmail.com;

Хани Халил^{1,3},

инженер, магистрант, e-mail: hani.khalil@yandex.com;

Игорь Геннадьевич Смирнов¹,доктор технических наук, доцент,
член-корреспондент Российской академии наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация;³Московский государственный технологический университет Станкин, Москва, Российская Федерация;⁴Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что задачи повышения точности управления роботизированными платформами весьма актуальны, особенно при наличии механических нелинейностей. Одну из наиболее распространенных проблем представляет люфт, который приводит к отклонению платформы от прямолинейной траектории во время движения. Это негативно сказывается на общей стабильности и точности системы управления. (*Цель исследования*) Разработка системы управления двухосевой платформой с двумя степенями подвижности, которая эффективно учитывает и компенсирует влияние механического люфта. Для достижения этого была создана система, способная поддерживать стабильность движения платформы при минимизации последствий люфта. (*Материалы и методы*) В ходе исследований разработана математическая модель системы управления, в которой люфт представлен в виде гистерезиса. Были исследованы различные методы компенсации люфта. В качестве управляющих алгоритмов применены линейные контроллеры, такие как ПИД-регулятор и регулятор фазы сдвига, а также алгоритмы управления на основе нечеткой логики (*Fuzzy Logic Controller*). Модель системы и алгоритмы управления исследовались с помощью программного пакета *MATLAB* и библиотеки *Simulink*. (*Результаты и обсуждение*) Проведенное моделирование продемонстрировало, что разработанные методы управления эффективно компенсируют механический люфт, обеспечивая более стабильное и точное движение платформы. Этот результат подтвержден как в идеальных, так и в реальных условиях эксплуатации системы. (*Выводы*) Разработанная система управления позволяет существенно улучшить точность и устойчивость платформы, что открывает новые возможности для ее применения в различных робототехнических системах.

Ключевые слова: двухосевая платформа, люфт, трение, зубчатые колеса, нелинейное управление, алгоритмы управления на основе нечеткой логики.

■ **Для цитирования:** Саад Р., Ахмад А., Исса М., Халил Х., Смирнов И.Г. Нелинейное управление двухосевой платформой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 51-58. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-51-58. EDN: GYGLJX.

Scientific article

Nonlinear Control of Dual-Axis Platform

Riham Saad^{1,3},

Ph.D. student(Eng.), engineer,

e-mail: rihamasad126@gmail.com;

Aws Ahmad^{1,2},

junior researcher, senior lecturer,

e-mail: engineer.93engineer@gmail.com;

Mohammad Issa⁴,

master's student;

Hani Khalil^{1,3},

engineer, master's student,

e-mail: hani.khalil@yandex.com;

Igor G. Smirnov¹,

Dr.Sc.(Eng.), associate professor,

corresponding member of the Russian Academy
of Sciences, chief researcher,

e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;²Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation;³Moscow State Technological University STANKIN, Moscow, Russian Federation;⁴Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. Improving control accuracy in robotic platforms remains a highly relevant challenge, particularly in the presence of mechanical nonlinearities. One of the most common issues is backlash, which causes deviations from a straight trajectory during motion, and adversely affects the overall stability and precision of the control system. (*Research purpose*) The objective of this study is to develop a control system for a dual-axis platform with two degrees of mobility that effectively recognizes and compensates for the mechanical backlash effects. To achieve this, a system was designed to ensure stable platform motion while minimizing the impact of backlash on trajectory accuracy. (*Materials and methods*) A mathematical model of the control system was developed, representing backlash as a hysteresis effect. Several backlash compensation methods were investigated. The implemented control algorithms included linear controllers such as the Proportional–Integral–Derivative (PID) controller and a phase-shift controller, as well as nonlinear algorithms based on fuzzy logic (Fuzzy Logic Controller). The system model and control algorithms were simulated using MATLAB and the Simulink library. (*Results and discussion*) Simulation results demonstrate that the proposed control methods effectively compensate for mechanical backlash, ensuring more stable and accurate platform motion. The effectiveness of these methods was confirmed under both idealized and real-world operating conditions. (*Conclusions*) The developed control system significantly improves platform accuracy and stability, broadening its applicability across a wide range of robotic applications.

Keywords: dual-axis platform, backlash, friction, gears, gear wheels, nonlinear control, fuzzy logic control algorithms.

■ **For citation:** Saad R., Ahmad A., Issa M., Khalil H., Smirnov I.G. Nonlinear control of dual-axis platform. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 51-58 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-51-58. EDN: GYGLJX.

Двухосевые платформы находят широкое применение во многих промышленных системах: робототехнических установках, системах слежения, космических аппаратах, а также в сельскохозяйственных машинах, которые в последнее время претерпели значительное развитие [1]. В частности, это относится к сельскохозяйственным машинам и оборудованию, производимым во ФНАЦ ВИМ [2]. Эти области применения предъявляют высокие требования к точности механического проектирования.

Однако в реальных условиях невозможно избежать некоторых нелинейных явлений, в частности механического люфта. Люфт может возникать по целому ряду причин: ошибки в конструкции механических узлов, воздействие высоких нагрузок, а также износ зубчатых передач [3, 4], все это приводит к образованию зазоров между зубчатыми элементами, известных как механический люфт.

Современные роботизированные устройства, применяемые в сельском хозяйстве, такие как роботы для сбора урожая [5] и специализированные роботы для сбора яблок [6], требуют высокой точности как в перемещении, так и в системе управления. Это, в свою очередь, требует внедрения методов компенсации люфта для обеспечения стабильной и надежной работы.

Цель исследования. Разработка системы управления двухосевой платформой с двумя степенями подвижности, которая эффективно учитывает и компенсирует влияние механического люфта.

Материалы и методы. Люфты, возникающие между зубчатыми колесами и другими системами трансмиссии, считаются наиболее опасным нелинейным явлением, поскольку иногда это приводит к потере передаваемого движения [7, 8]. Теорети-

чески величина люфта должна быть равна нулю, что, однако, на практике не достигается. Зазор между зубьями необходим для защиты зубчатых колес от давления и деформации, но превышение значения этого зазора до критического приводит к нежелательным последствиям и возникновению нелинейностей в системе. Как правило, люфт влияет на производительность систем, особенно когда требуется высокая точность в случае управления положением и скоростью (Khalil H.K. *Nonlinear Control*. 2015. Pearson). Появление нелинейностей в системе приводит к задержке времени отклика и нестабильным предельным циклам [9].

Компенсация люфта составляет серьезную задачу для многих систем. Предложены различные решения, в которых реализованы механические подходы [10, 11] и методы контроля [12]. В данном исследовании представлена разработка и реализация алгоритма линейного и нелинейного управления двухосевой платформой с нагрузкой до 50 кг.

Платформа состоит из двух механических частей. Первая часть может вращаться вокруг вертикальной оси (ось направления) под углом, называемым азимутальным, или углом направления, от 0 до 180°. На этой оси закреплен абсолютный энкодер. Ось направления, в свою очередь, содержит вращающуюся деталь, которая может перемещаться вокруг горизонтальной оси (ось возвышения) под углом, называемым углом возвышения, в пределах углового сектора от –10 до 90°, также на этой оси закреплен абсолютный энкодер.

Оси платформы независимы, управление может осуществляться в ручном либо автоматическом режиме. Зубчатые колеса передают момент осям высоты и направления с помощью редукторов с передаточным отношением N_e и N_d . Платформа приво-

дится в движение с помощью двигателей постоянного тока, на оси каждого закреплен инкрементный энкодер.

Механический люфт. Зубчатое колесо, непосредственно соединенное с двигателем, называется ведущим, а непосредственно соединенное с нагрузкой – ведомым. Ведущее зубчатое колесо передает движение на ведомое. Длина зазора между ведомым колесом и ведущим кодируется в формате $2D$. Когда происходит контакт между противоположными поверхностями зубчатых колес, движение передается точно между поверхностями зубчатых колес.

Модель обратной связи. В случае, когда зубчатые колеса не контактируют, передача движения происходит с задержкой. Следовательно, крутящий момент равен нулю. За границами этого случая крутящий момент линеен. Люфт моделируется с запаздыванием. Зазор моделируется как гистерезис между входом (положение ведущего зубчатого колеса) и выходом (положение ведомого колеса). В общем случае механический люфт асимметричен, т.е. мертвая зона передаваемого крутящего момента асимметрична.

Возможные причины механического люфта показаны на *рисунке 1*.

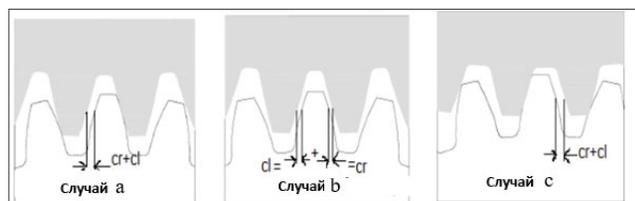


Рис. 1. Причины механического люфта: cr – отклонение профиля ведущего колеса; cl – отклонение профиля ведомого колеса

Fig. 1. Causes of mechanical backlash: cr – deviation in the profile of the driving gear; cl – deviation in the profile of the driven gear

Отклонения обоих колес направлены в одну сторону, т.е. происходит их сложение ($cr + cl$). Результатом становится значительный люфт между зубьями из-за усиленного суммарного отклонения (*рис. 1, a*). Отклонения имеют противоположное направление: $cl = -cr$. Они взаимно компенсируют друг друга, в результате чего люфт практически отсутствует.

В некоторых случаях возможно даже плотное прилегание зубьев без зазора (*рис. 1, b*). По направлению отклонений ($cr + cl$) это аналогично случаю *a*, но отличается их распределением или положением. Это также приводит к появлению люфта, однако его форма и распределение могут быть иными (*рис. 1, c*).

Математическое описание люфта. Функцию, описывающую механический люфт, в нелинейной

теории управления (Khalil H.K. Nonlinear Control. 2015. Pearson) используют для анализа амплитуды (a) и частоты колебаний (ω). Это зависит от нахождения функции преобразования между входом (обычно синусоидальным сигналом) и первой гармоникой входного сигнала на выходе (люфт).

Для моделирования механического люфта в данной работе используется аппроксимация в виде гистерезисной петли с наклоном, как это принято в [6]. Такой подход позволяет адекватно отразить поведение системы при изменении направления движения, моделируя как симметричный, так и асимметричный люфт.

Функция люфта задается следующим уравнением:

$$N(a) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \arcsin \left(1 - \frac{2D}{a} \right) + \left(1 - \frac{2D}{a} \right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2D}{a} \right)^2} \right] - j \frac{4D}{\pi} \left[1 - \frac{D}{a} \right]. \quad (1)$$

На *рисунке 2* показано, как люфт влияет на выходной сигнал в ответ на синусоидальный вход, в соответствии с вышеуказанным выражением.

Основная идея заключается в достижении контура управления, показанного на *рисунке 2*.

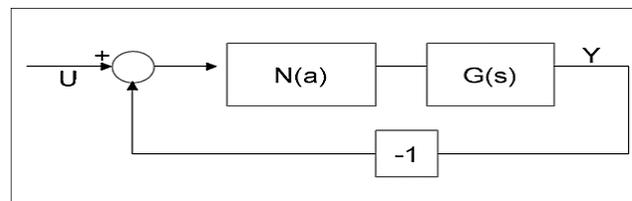


Рис. 2. Контур управления

Fig. 2. Control loop

Условием появления колебаний в системе является выполнение следующего равенства:

$$G(s) = -\frac{1}{N(a)_d},$$

где $G(s)$ – передаточная функция разомкнутой системы; $N(a)$ – описательная функция, моделирующая влияние нелинейности.

Исследование основано на построении диаграммы Найквиста для функций $G(s)$ и $1/N(a)$, а также на определении точек их пересечения. Эти точки указывают на возможность возникновения автоколебаний, которые могут привести к потере устойчивости системы. Для устранения таких колебаний и обеспечения устойчивости рекомендуется использовать специальные алгоритмы управления, направленные на исключение точек пересечения между $G(s)$ и $1/N(a)$ как указано в источнике [9].

Метод компенсации люфта. Компенсацию люфта осуществляют либо механическими методами [13, 14], либо методами контроля [15, 16].

Механические методы зависят от точности механической конструкции, использования опреде-

ленных типов зубчатых колес и материалов. Методы управления заключаются в разработке и реализации алгоритмов управления с целью минимизации эффекта люфта.

Методы контроля – основная часть данного научного исследования. Один из предлагаемых методов – гибридное управление, которое играет важную роль в таких механических системах, поскольку оно обеспечивает возможность применения более одного метода управления вокруг конкретной рабочей точки.

В соответствии с целевым применением, такие методы сводят к минимуму влияние люфта с помощью двух подходов управления:

- *действия внутри зоны люфта.* Этот подход основан на стремлении сократить время, в течение которого система находится в пределах люфта, насколько это возможно;

- *слабое управление в пределах люфта.* Подразумевает использование двух контроллеров, где первый обеспечивает устойчивость системы в зоне люфта, а второй – отвечает за достижение требуемой производительности системы после выхода из зоны люфта.

Методы управления включают в себя два способа: применение линейного или нелинейного регулятора или достижение обратного люфта.

Линейный контроллер применяется для минимизации эффекта люфта. В этом случае исследование будет проводиться путем применения линейных регуляторов после добавления модели люфта в систему, а затем работы над тем, чтобы система как можно быстрее пересекла зону люфта, с контролем величины люфта в каждый момент времени и подачей сигнала пропорционально этому значению.

Обратный люфт эффективен, если люфт находится на «системном входе». Этот способ основан на смещении входного сигнала на максимальную величину люфта $2D$, когда выходной сигнал меняет направление движения.

Обратный люфт достигается применением линейного и нелинейного контроллера в качестве адаптивного управления с использованием нечеткой логики [11].

Моделирование системы

Ось направления передачи в идеальном случае. Исходя из уравнений двигателя постоянного тока, механических показателей вала, показателей двигателя, передаточного числа редуктора и с учетом технических характеристик, можно составить передаточную функцию. Передаточную функцию положения оси направления в идеальном случае можно описать уравнением:

$$\frac{\theta_d}{U(P)} = \frac{k_i}{N_d(1 + \frac{L}{R}P) \left(1 + \frac{R \cdot J_{total-d}}{k_i \cdot k_v + f_{total-d} \cdot R}\right) P} = \quad (2)$$

$$= \frac{k}{N_d(1 + \tau_{ed}P)(1 + \tau_{md}P)P} = \frac{3.85}{(1 + 0.0171P)P} \text{rad.volt}^{-1}, \text{ рад/В.}$$

Функция передачи положения оси оценки в идеальном случае. Поскольку ось оценки имеет тот же механизм движения, что и ось направления, функцию передачи положения оси оценки в идеальном случае можно описать уравнением:

$$\frac{\theta_e}{U(P)} = \frac{k}{N_e(1 + \tau_{ed}P)(1 + \tau_{md}P)P} = \frac{0,06801}{(1 + 0,015P)P} \text{rad.volt}^{-1}, \text{ рад/В.} \quad (3)$$

Нелинейная модель платформы с двумя осями. На *рисунке 3* показаны двигатель и нагрузка, а также проиллюстрированы инерционные моменты и влияние крутящих моментов [4].

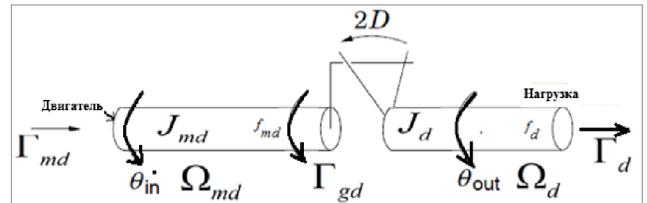


Рис. 3. Влияние крутящих моментов двигателя и нагрузки
Fig. 3. Influence of motor torques and load

При этом

$$J_{md}\dot{\Omega}_{md} = f_{md}\Omega_{md} - \Gamma_{gd} + \Gamma_{md}, J_d\dot{\Omega}_d = -f_d\Omega_d - \Gamma_{gd} + \Gamma_d$$

$$\Omega = \Omega_{md} - \Omega_d, \Omega_d = \dot{\theta}_{out}, \Omega_{md} = \dot{\theta}_{in}$$

$$\Gamma_{gd} = m(\theta_{out} - \theta_{in}) \text{ (при контакте)}, \Gamma_{gd} = 0 \text{ (люфт).}$$

Вектор положения $x = [\theta_{out}, \theta_{in}, \Omega_d, \Omega_{md}]^T$, следовательно, можно найти матрицы положения:

$$x' = Ax + Bu + H\Gamma_g; u = \Gamma_{md} = cx = \theta_{out}$$

В случае передачи движения

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{m}{J_d} & -\frac{m}{J_d} & 0 & -\frac{f_d}{J_d} \\ -\frac{m}{J_{md}} & \frac{m}{J_{md}} & 0 & -\frac{f_{md}}{J_{md}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_{md}} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_d} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0], D = 0.$$

В случае образования зазора:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{f_d}{J_d} & \frac{f_{md}}{J_{md}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f_{md}}{J_{md}} & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_{md}} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_d} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0], D = 0.$$

Алгоритмы управления

Управление положением системы с высокой точностью и максимально быстрым откликом требует исследования и анализа скорости в системе без обратной связи и отклика положения замкнутой системы в идеальном случае и с учетом нелинейностей, влияющих на работу системы. После анализа характеристик системы можно выбрать регуляторы для достижения требуемых управляющих характеристик. Функция передачи скорости для оси направления задается уравнением:

$$\frac{\Omega_d}{u} = \frac{3.85}{1 + 0.0171p} \tag{4}$$

Период выборки. Частота дискретизации должна быть больше частоты среза передаточной функции системы примерно в 6-24 раза. Для системы первого порядка период выборки должен удовлетворять условию:

$$\tau/4 \leq T_s \leq \tau,$$

где τ – желаемое время отклика системы.

PID-регулятор. Для выбора соответствующего алгоритма управления необходимо провести анализ влияния каждого регулятора на систему с учетом и без учета нелинейностей. Разностное уравнение ПИД-регулятора задается выражением:

$$C(Z) = K_p + K_i T_s \frac{Z}{Z-1} + \frac{K_D}{T_s} \frac{Z-1}{Z} \tag{5}$$

где K_p – пропорциональный коэффициент, способствующий уменьшению времени отклика системы; K_i – интегральный коэффициент, который устраняет статическую ошибку; K_D – дифференциальный коэффициент, играющий важную роль в улучшении временной характеристики системы и повышении стабильности за счет уменьшения перерегулирования в переходном процессе. Результаты применения ПИД-регулятора к линейной и нелинейной моделям представлены в *таблице 1*.

Регулятор сдвига фазы. Передаточная функция регулятора фазы сдвига:

$$C(s) = K \frac{1 + T_1 S}{1 + T_2 S} \tag{6}$$

Предполагая, что T_s является периодом дискретизации, разностное уравнение регулятора фазы сдвига задается выражением:

$$C(Z) = \frac{K}{T_2} \left[\left(1 - \frac{T_1}{C} \right) \left(\frac{1}{1 - e^{\frac{T_s}{T_2}} Z^{-1}} \right) + T_1 \right] \tag{7}$$

Для ступенчатого входного сигнала была проанализирована временная характеристика оси направления положения при добавлении регулятора сдвига фазы как к идеальной (линейной), так и к неидеальной (нелинейной) модели. Значения коэффициентов были подобраны с целью устранения нежелательных скачков системы, обеспечения устойчивого отклика и минимизации перерегулирования. Результаты представлены в *таблице 2*.

Регулятор сдвига фазы улучшает производительность системы лучше, чем традиционный ПИД-регулятор, особенно когда в модель системы добавляются нелинейности.

Нелинейный алгоритм. Механический люфт возникает в системах, где нагрузка не находится в прямом контакте с приводом. Затруднение управления возникает в случае реверсивного движения, которое может быть вызвано одной из следующих причин:

- нарушение нагрузки;
- контроль положения;
- изменение направления движения пользователем.

Во всех названных случаях груз становится неуправляемым (его движение неконтролируемое за счет действия момента инерции). При этом в системе возникают осцилляции в результате соударения между соприкасающимися поверхностями (в том случае, если механизм передачи осуществляется через механические детали, например, зубчатые колеса). Следовательно, закон управления должен быть рассчитан на максимально быстрое прохождение зоны люфта и максимальное снижение влияния этих столкновений [12].

На *рисунке 4* показано, что нелинейный контур управления добавлен в систему.

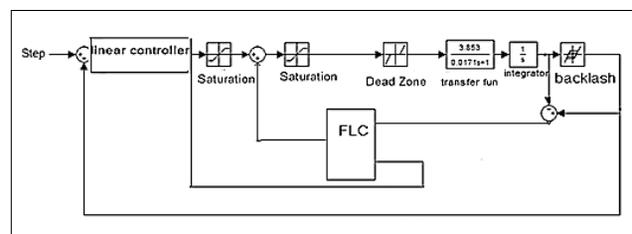


Рис. 4. Система управления с нечеткой логикой
Fig. 4. Control system with fuzzy logic

Таблица 1		Table 1	
РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМ RESULTS OF PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE (PID) CONTROLLER APPLICATION TO LINEAR AND NONLINEAR SYSTEMS			
Ось направления	Время отклика, мс	Ошибка состояния покоя	PID параметры
Переходной процесс замкнутой системы без учета нелинейностей	87	0	$k_p=5,6; k_i=0,009; k_d=1,5$
Переходной процесс замкнутой системы с учетом нелинейностей	78	0	$k_p=17,3; k_i=0,002; k_d=0,09$

Таблица 2		Table 2	
РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОНТРОЛЛЕРА С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ RESULTS OF THE PHASE-SHIFT CONTROLLER APPLICATION			
Ось направления	Время стабильности, мс	Ошибка состояния покоя	Параметры сдвига фазы
Переходной процесс замкнутой системы без учета нелинейностей	90	0	$K=6,2; T_1=0,0171; T_2=0,009$
Переходной процесс замкнутой системы с учетом нелинейностей	60	0	$K=7,5; T_1=0,0171; T_2=0,00$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование механического люфта. Как упоминалось ранее, механический люфт моделируется как зазор. Чтобы найти ширину этого зазора, вручную перемещали платформу в обоих направлениях в пределах определенного углового сектора. Считывали угловое положение нагрузки и угловое положение двигателя. Разница между двумя показаниями выражалась в ширине люфта:

$$2D = |\theta_1^\circ - \theta_2^\circ|,$$

где θ_1° – угловое положение нагрузки; θ_2° – угловое положение двигателя, транслирующееся на ось.

Таблица 3			Table 3		
Нахождение величины зазора CALCULATION OF MECHANICAL BACKLASH WIDTH					
Ширина зазора $2D = \theta_1^\circ - \theta_2^\circ $	θ_2°	θ_1°			
0,2676	-29,1511	-28,8835			
0,2913	33,4760	33,1847			
0,2917	-32,1141	-31,8224			
0,3382	32,8747	32,5365			
0,2865	-36,0695	-35,7830			
0,2736	32,4256	32,1520			
0,2830	-34,406	-34,1230			
Средняя величина зазора	0,2907				

Отклик ПИД-регулятора. ПИД-регулятор применялся к системе с использованием метода Циглера – Николса для достижения наилучшего отклика и улучшения времени стабильности, эффект интегратора был удален, чтобы максимально ускорить систему. Значения практического коэффициента были следующими: $k_p = 133$; $k_i = 0,000$; $k_d = 1,07$.

В таблице 4 и на рисунке 5 приведены экспериментальные результаты для управления положением направления и показана спецификация этих откликов.

Таблица 4				Table 4			
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ EXPERIMENTAL RESULTS WITH PID CONTROLLER							
Относительный угол	Состояние стабильности, мс	Значение зазора	Ошибка состояния покоя				
20°	750	0,145°	0,158				
40°	820	0,034°	0,234				

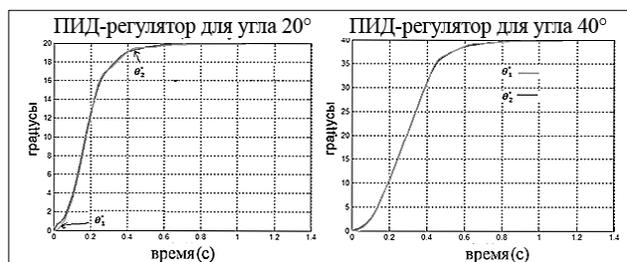


Рис. 5. Поведение ПИД-регулятора при смещении на 20/40 градусов

Fig. 5. Response of the PID controller to a 20/40-degree offset

Отклик регулятора сдвига фазы. Экспериментальные результаты для фазового управления смещением направления положения и спецификация этих откликов приведены в таблице 5 и на рисунке 6.

Таблица 5				Table 5			
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА РЕГУЛЯТОРА СДВИГА ФАЗ EXPERIMENTAL RESULTS OF THE PHASE SHIFT CONTROLLER							
Относительный угол	Состояние стабильности, мс	Значение зазора	Ошибка состояния покоя				
20°	400	0,00086°	0,06				
40°	500	0,0253°	0,007				

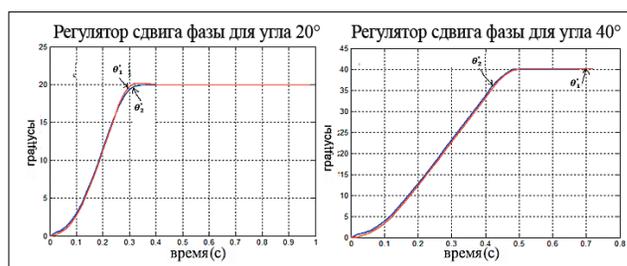


Рис. 6. Поведение регулятора сдвига фаз при смещении угла на 20/40 градусов

Fig. 6. Response of the phase-shift controller to a 20/40-degree angular offset

Выводы. Основной целью данной работы являлась разработка системы управления двухосевой платформой с двумя степенями свободы. Решалась проблема нелинейностей в системе, возникающих в результате механического люфта и способных вызвать отклонение от прямолинейной траектории при движении роботизированной платформы.

Исследовано поведения осей платформы и разработана математическая модель, поведение которой анализировалось в идеальных и неидеальных условиях. В качестве люфта в математической модели представлен гистерезис, были исследованы методы компенсации люфта. После добавления к идеальной математической модели гистерезиса в качестве регулятора для каждой из осей реализованы алгоритмы управления на основе линейного контроллера (ПИД-регулятора и регулятора фазы сдвига). Реализация и анализ поведения математической модели представлены в программном пакете *MATLAB* с помощью библиотеки Simulink. Алгоритм управления построен на основе управления с нечеткой логикой (*Fuzzy Logic Controller, FLC*).

Разработана система управления двухосевой

платформой с двумя степенями свободы. Исследованы механический люфт, его причины и последствия для систем. Предложена математическая модель системы управления. Отслеживание люфта происходит с помощью инкрементного энкодера на валу двигателя и абсолютного энкодера на конечной оси (выход редуктора). Исследованы и разработаны алгоритмы управления системы с учетом нелинейностей, определяющих механический люфт. Проведен анализ и продемонстрировано сравнение производительности алгоритмов управления на основе ПИД-регулятора и регулятора сдвига фаз. Сделан вывод о том, что регулятор сдвига фазы улучшает производительность системы лучше, чем традиционный ПИД-регулятор, особенно когда в модель системы добавляются нелинейные явления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки Agritechnika 2019 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. №6. 28-40. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
- Шутенко А.В., Хорт Д.О. Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи // *Инженерные технологии и системы*. 2024. 34(1). 88-100. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.088-100
- Smith J., Brown L. Advances in precision gear design: A review. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. 234(10). 1234-1245. DOI: 10.1177/0954406220901234.
- Karba B. Developing a software for proper assembly of planetary gearbox components with low backlash. *Master's thesis. Gaziantep University*. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.16503.55209.
- Filippov R., Khort D. Multifunctional robotic device with intelligent positioning system. *E3S Web*. 2024. 493. 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202449301003.
- Kutyrev A.I., Khort D.O., Smirnov I.G. et al. Robotic device for identifying and picking apples. *Proceedings of IEEE Technology*. 2022. 415-420. DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238646.
- Lin W., Qian C. Linear openness and feedback stabilization of nonlinear control systems. *Discrete and Continuous Dynamical Systems*. 2018. 11(6). 1105–1120. DOI: 10.3934/dcdss.2018063.
- Serkies P., Szabat, K. Model predictive control of the two-mass drive system with backlash and friction. *ISA Transactions*. 2019. 93. 1-12. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.02.005.
- Zhang Y., Wang Y. Backlash compensation in servo systems using adaptive control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 66(5). 3983-3992. DOI: 10.1109/TIE.2018.2856205.
- Vered Y., Elliott S. J. Robust internal model control approach for position control of systems with sandwiched backlash. *ISA Transactions*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2307.06030.
- Wang L., Chen X. Adaptive fuzzy control for nonlinear systems with backlash-like hysteresis. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018. 26(3). 1312-1323. DOI: 10.1109/TFUZZ.2017.2737021.
- Lima T.A., Madeira D. de S., Viana V.V., Oliveira R.C.L.F. Static output feedback stabilization for uncertain relative degree nonlinear systems with input saturation. *Systems & Control Letters*. 2022. 168. DOI: 10.1016/j.sysconle.2022.105359.
- Zhang Y., Li X. Discrete-time adaptive fuzzy finite-time tracking control for nonlinear systems with uncertainties. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2023.
- Li X., Zhang H. Position control of PMDC motors with backlash compensation using adaptive control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 66(12). 9462-9471. DOI: 10.1109/TIE.2018.2886789.
- Zuo Q., Wang B., Chen J., Dong H. Model predictive control of aero-mechanical actuators with consideration of gear backlash and friction compensation. *Electronics*. 2024. 13(20). 4021. DOI: 10.3390/electronics13204021.
- Smith, J., Brown, L. (2020). Advances in precision gear design: A review. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. 234(10). 1234-1245. DOI: 10.1177/0954406220901234.

REFERENCES

- Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A.S. et al. Modern technologies and equipment for agriculture – trends from the Agritechnika 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machines*. 2020. №6. 28-40 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
- Shutenko, A. V., & Khort, D. O. (2024). Determination of the geometric parameters of a water jet depending on the type of nozzle and jet operation mode. *Engineering*

- Technologies and Systems*. 34(1). 88-100 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.088-100.
3. Smith J., Brown L. Advances in precision gear design: A review. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. 234(10). 1234-1245 (In English). DOI: 10.1177/0954406220901234.
 4. Karba B. Developing a software for proper assembly of planetary gearbox components with low backlash. *Master's thesis. Gaziantep University*. 2021 (In English). DOI: 10.13140/RG.2.2.16503.55209.
 5. Filippov R., Khort D. Multifunctional robotic device with intelligent positioning system. *E3S Web*. 2024. 493. 01003 (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202449301003
 6. Kuttyrev A.I., Khort D.O., Smirnov I.G. et al. Robotic device for identifying and picking apples. *Proceedings of IEEE Technology*. 2022. 415-420 (In English). DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238646.
 7. Lin W., Qian C. Linear openness and feedback stabilization of nonlinear control systems. *Discrete and Continuous Dynamical Systems*. 2018. 11(6). 1105-1120 (In English). DOI: 10.3934/dcdss.2018063.
 8. Serkies P., Szabat, K. Model predictive control of the two-mass drive system with backlash and friction. *ISA Transactions*. 2019. 93. 1-12 (In English). DOI: 10.1016/j.isatra.2019.02.005.
 9. Zhang Y., Wang Y. Backlash compensation in servo systems using adaptive control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 66(5). 3983-3992 (In English). DOI: 10.1109/TIE.2018.2856205.
 10. Vered Y., Elliott S. J. Robust internal model control approach for position control of systems with sandwiched backlash. *ISA Transactions*. 2023 (In English). DOI: 10.48550/arXiv.2307.06030.
 11. Wang L., Chen X. Adaptive fuzzy control for nonlinear systems with backlash-like hysteresis. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018. 26(3). 1312-1323 (In English). DOI: 10.1109/TFUZZ.2017.2737021.
 12. Lima T.A., Madeira D. de S., Viana V.V., Oliveira R.C.L.F. Static output feedback stabilization for uncertain relative degree nonlinear systems with input saturation. *Systems & Control Letters*. 2022. 168 (In English). DOI: 10.1016/j.sysconle.2022.105359.
 13. Zhang Y., Li X. Discrete-time adaptive fuzzy finite-time tracking control for nonlinear systems with uncertainties. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* (In English). 2023.
 14. Li X., Zhang H. Position control of PMDC motors with backlash compensation using adaptive control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 66(12). 9462-9471 (In English). DOI: 10.1109/TIE.2018.2886789.
 15. Zuo Q., Wang B., Chen J., Dong H. Model predictive control of aero-mechanical actuators with consideration of gear backlash and friction compensation. *Electronics*. 2024. 13(20). 4021 (In English). DOI: 10.3390/electronics13204021.
 16. Smith, J., Brown, L. (2020). Advances in precision gear design: A review. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. 234(10). 1234-1245 (In English). DOI: 10.1177/0954406220901234.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Саад Р. – работа с текстом, создание окончательной версии рукописи;
 Ахмад А. – обсуждение и оформление материалов статьи, подготовка иллюстраций;
 Исса М. – проведение теоретических расчетов;
 Халил Х. – анализ литературных источников по проблеме, формулировка выводов;
 Смирнов И.Г. – научное руководство, формулирование основных целей и задач исследования,
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Saad R. – text editing and preparation of the final version of the manuscript;
 Ahmad A. – discussion and structuring of article materials, preparation of illustrations
 Issa M. – theoretical calculations;
 Khalil H. – literature review, formulation of conclusions;
 Smirnov I.G. – scientific supervision, formulation of the main research goals and objectives.
 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

26.05.2025
 01.07.2025

EDN: HLRDVV
DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-59-65



Научная статья
УДК 631.95+631.17



Оценка негативного влияния технологических процессов в растениеводстве на окружающую среду

Нозим Исмоилович Джабборов,
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: nozimjon-59@mail.ru;

Александр Владимирович Добринов,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: a.v.dobrinov@yandex.ru;

Владимир Иванович Шамонин,
кандидат технических наук,
ведущий специалист,
e-mail: shamonin-75@mail.ru

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

Реферат. Основной причиной усиления антропогенного воздействия на окружающую среду является интенсификация производства, вызванная значительным вложением материальных ресурсов и средств для увеличения объемов и повышения экономической эффективности продукции растениеводства. Анализ, оценка, прогнозирование и управление антропогенным воздействием интенсивных машинных технологий на окружающую среду становятся приоритетными задачами научных исследований. (*Цель исследования*) Разработка математической модели для комплексной оценки степени негативного влияния технологических процессов на окружающую среду. (*Материалы и методы*) Исследования выполнялись на основе анализа научных публикаций и нормативных документов по оценке негативного воздействия технологических процессов интенсивных агротехнологий. Основными показателями экологической оценки технологических процессов на агроэкосистему определены: содержание пестицидов в почве, доза внесения и неравномерность распределения в почве удобрений, содержание эрозионно-опасных почвенных частиц. (*Результаты и обсуждение*) В качестве обобщенного критерия оценки степени негативного влияния предложен вероятностный коэффициент, который стремится к единице. Получена математическая модель, на основании которой произведены расчеты по определению возможного негативного воздействия технологических процессов в растениеводстве на окружающую среду. (*Выводы*) Результаты исследования показали, что при отсутствии значимого негативного влияния технологических процессов на окружающую среду значение вероятностного критерия меньше или равно единице. При наличии негативного влияния процессов на окружающую среду значение коэффициента больше единицы, в этом случае необходимо минимизировать негативные антропогенные последствия на природную среду.

Ключевые слова: окружающая среда, антропогенное воздействие, растениеводство, технологический процесс, экологическая оценка.

■ **Для цитирования:** Джабборов Н.И., Добринов А.В., Шамонин В.И. Оценка негативного влияния технологических процессов в растениеводстве на окружающую среду // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 59-65. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-59-65. EDN: HLRDVV.

Scientific article

Assessment of the Negative Environmental Impact of Technological Processes in Crop Production

Nozim I. Dzhabborov,
Dr.Sc.(Eng.), leading researcher,
e-mail: nozimjon-59@mail.ru;

Aleksandr V. Dobrinov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: a.v.dobrinov@yandex.ru

Vladimir I. Shamonin,
Ph.D.(Eng.), leading specialist,
e-mail: shamonin-75@mail.ru

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The primary factor contributing to the increase in anthropogenic impact on the environment is the intensification of agricultural production, driven by substantial investments of material resources and financial capital aimed at increasing output and enhancing the economic efficiency of crop production. As a result, the analysis, assessment, forecasting, and management of the anthropogenic impact of intensive mechanized technologies are becoming priority areas of scientific research. (*Research purpose*) This study aims to develop a mathematical model for the comprehensive assessment of the negative environmental impact caused by technological processes in agriculture. (*Materials and methods*) The research is based on the analysis of scientific publications and regulatory documents concerning the environmental impact assessments of technological processes in intensive agricultural systems. Key indicators used for evaluating the environmental impact in agroecosystems include soil pesticide concentration, fertilizer application rate and distribution uniformity, as well as the presence of erosion-prone soil particles. (*Results and discussion*) A generalized criterion, the probabilistic coefficient η_{TP} , which tends toward unity, was proposed to assess the degree of negative environmental impact. A mathematical model was developed to calculate the potential environmental impact of technological processes in crop production. (*Conclusions*) The results indicate that if the technological processes cause no significant negative impact on the environment, the value of the coefficient is less than or equal to one. If exceeds one, it signals a negative environmental effect and the need for mitigation measures to minimize anthropogenic pressure on the natural environment.

Keywords: environment, anthropogenic impact, crop production, technological process, environmental assessment

■ **For citation:** Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., Shamonin V.I. Assessment of the negative environmental impact of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 59-65 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-59-65. EDN: HLRDVV.

Одной из основных причин усиления антропогенного воздействия на окружающую среду за последнее десятилетие является интенсификация производства, вызванная значительным вложением материальных ресурсов и средств для увеличения объемов и повышения экономической эффективности производимой продукции растениеводства. Несмотря на существующие требования экологической безопасности и качества продукции, предъявляемые к современным технологиям в отрасли растениеводства, их неблагоприятное влияние на агроэкосистему представляется реальным [1, 2].

Вред, наносимый природе при внедрении современных агротехнологий, невозможно полностью устранить, однако способы его снижения существуют и они должны быть экономически эффективными. Принимаемые решения должны исходить из того, чтобы не были превышены пределы вредного воздействия на агроэкосистему. В противном случае возникает экологический риск техногенного характера от воздействия агротехнологий с нарушением установленных норм.

Уровень организации производства продукции на сельскохозяйственном предприятии оказывает прямое влияние на величину экологических рисков, так как учитывает объемы и качество веществ и материалов, используемых в технологическом процессе. Управление природоохранной деятельностью приобретает статус приоритетной и острой проблемы, поскольку сложно одновременно сохранять темп экономического роста и минимизировать воздействия на среду. Возрастание антропогенных нагрузок, как угроза воспроизводству природных ресурсов и негативных последствий для населения, обеспечение продовольственной безопасности и не-

зависимости, снижение технологических рисков в АПК являются важнейшими вызовами, изложенными в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Анализ, оценка, прогнозирование и управление антропогенным воздействием интенсивных машинных технологий на основе изучения тенденций в области экологизации системы природопользования, перспектив хозяйственного и научно-технического развития становятся приоритетными задачами научных исследований.

Все процессы в растениеводстве являются составными частями любой технологии производства продукции. Влияние каждого из них на окружающую среду может быть оценено по ряду показателей, например, качеству и срокам выполнения работ, составу технических средств, надежности, безопасности и т.д. Анализ изученных литературных источников о влиянии технологических процессов на агроэкосистему выявил наиболее существенные показатели в сфере обеспечения безопасности агротехнологий. Среди существенных факторов рассматриваются: содержание пестицидов в почве, доза внесения и неравномерность распределения в почве удобрений, содержание эрозионно-опасных почвенных частиц.

Использование пестицидов при возделывании сельскохозяйственных культур влечет за собой риск загрязнения почвы, нарушение баланса биоценозов внутри экосистем, в частности почвенных микроорганизмов, которые обеспечивают рост, развитие и экологическую адаптацию растений к стрессовым условиям [3].

Превышение содержания пестицидов в почве после использования средств защиты растений (СЗР)

оценивается на основе сопоставления их предельно допустимой концентрации (ПДК) с фактическим содержанием в почве (в мг/кг). Поскольку количественный метод определения пестицидов достаточно трудоемкий, некоторые исследователи предлагают использовать косвенный подход на основе определения величины сносов на почву с помощью седиментационных проб [4].

Неблагоприятное действие различных видов применяемых удобрений на различные компоненты агроценозов проявляется, прежде всего, в загрязнении самих почв, поверхностных и грунтовых вод, нарушении баланса питательных веществ, что приводит к ухудшению агрохимических свойств, фитосанитарного состояния сельскохозяйственных угодий, развитию заболеваний, снижению продуктивности возделываемых культур, соответственно, качества готовой продукции [5].

Высокие дозы минеральных удобрений порождают негативные явления в жизнедеятельности почвенной биоты, нарушаются процессы трансформации органического вещества, как одного из основных показателей поддержания почвенного плодородия. При этом повышается доля болезнетворных агентов (патогенов) в структуре микробного ценоза. Появляется опасность образования микотоксинов в почве и продуктах питания [6, 7].

При выполнении технологического процесса внесения удобрений одним из важных показателей является неравномерность их распределения в почвенном слое, которая зависит от конструктивных характеристик рабочих органов, режимов работы дозирующей системы машины, аэродинамических и физических свойств и массы гранул [8, 9]. Так, высота установки и частота вращения рабочего органа, правильное размещение и наклон лопаток к горизонтальной плоскости оказывают значительное влияние на рабочую ширину распределения и качество внесения удобрений на поверхность поля [10, 11]. В целом следует отметить, что в большинстве своем приемы и дозы внесения, степень неравномерности распределения удобрений могут как повысить, так и снизить объем производимой сельскохозяйственной продукции [12, 13].

В процессе культивации верхнего слоя поля, обеспечивающей рыхление, частичное перемешивание и крошение, возникает потенциальная опасность эрозии почв [14]. При процессах как водной, так и ветровой эрозии происходит потеря части плодородной почвы и урожая, а также ухудшается экологическое состояние окружающей среды за счет дисбаланса питательных веществ, что вызывает в итоге ускоренную деградацию земель [15, 16].

В общем допустимый уровень водной и ветровой эрозии сельскохозяйственных земель рассчитывается путем сравнения фактических показате-

лей интенсивности эрозионных процессов, выраженных в потере почвенной массы (в т/га) за конкретный период, с минимально возможной величиной среднегодового смыва почвы [17, 18]. Одним из ключевых факторов оздоровления почвы может стать биологизация земледелия, приближение к естественно-природным приемам выращивания растений, что подразумевает чередование культур, внесение органики, внедрение сидеральных паров, заделка соломы, использование многолетних трав, зернобобовых культур. В таких системах продуктивно используются микроорганизмы, участвующие в синтезе гумусовых соединений, осуществляется инокуляция пожнивных остатков полезной микрофлорой, что позволяет контролировать патогенные микроорганизмы. Все это создает возможность сохранить плодородие почвы, предотвратить ее деградацию, а также обеспечить экологическую безопасность землепользования [19, 20].

По перечню факторов, характеризующих влияние на окружающую среду, и их численным показателям можно рассчитать безопасность или, наоборот, вредное воздействие машинной технологии. Для дальнейшего решения этой задачи по имеющимся методикам определяются численные значения параметров технологических процессов, разрабатывается многофакторная математическая модель и по ней проводится экологическая оценка негативного влияния производства сельскохозяйственной продукции.

Цель исследования: разработать математическую модель для комплексной оценки степени негативного влияния технологических процессов в растениеводстве на окружающую среду.

Материалы и методы. При проведении настоящего исследования были использованы аналитические методы. Систематизированы актуальные результаты научных работ, которые отражают решения проблем антропогенного воздействия на окружающую среду, в частности интенсивных агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур. Использовались нормативные документы по оценке негативного воздействия современных технологических процессов.

В ходе исследования, исходя из анализа литературных источников, дано обоснование наиболее существенных показателей экологической оценки технологических процессов; определен ключевой критерий оценки, отражающий степень негативного влияния процесса на окружающую среду; разработана математическая модель комплексной оценки.

Результаты и обсуждение. В общем виде перечень таких факторов, как содержание пестицидов в почве, доза внесения и неравномерность распределения в почве удобрений, а также содержание эрозионно-опасных почвенных частиц, в значитель-

ной степени оказывающих влияние на окружающую среду и являющихся последствием выполнения соответствующего технологического процесса H_{oc}^{TP} , можно представить зависимостью:

$$H_{oc}^{TP} = f(X_p, NPK, K_{NPK}, D_s), \quad (1)$$

где X_p – содержание в почве пестицидов, мг/кг; NPK – доза внесения удобрений (азот-фосфор-калий), кг/га; K_{NPK} – неравномерность распределения в почве удобрений, %; D_s – разрушение почвенного слоя рабочими органами машин (включая изменение содержания эрозионно-опасных частиц), %.

Критерием оценки степени негативного влияния технологического процесса на окружающую среду предлагается принять вероятностный коэффициент $\psi_{тр}$, который должен удовлетворять условию $\psi_{тр} \rightarrow 1$.

На *рисунке* представлена общая схема для определения критерия минимума негативного влияния технологических процессов на окружающую среду, оцениваемого по вероятностному коэффициенту $\psi_{тр}$ с другими зависящими от него показателями.

Главный критерий	Обобщенные показатели	Контролируемые (управляемые) воздействия
<ul style="list-style-type: none"> • Минимальное негативное воздействие технологического процесса на окружающую среду ($\psi_{тр} \rightarrow 1$) 	<ul style="list-style-type: none"> • Содержание пестицидов в почве (X_p) • Доза внесения удобрений (NPK) • Неравномерность распределения удобрений (K_{NPK}) • Разрушение почвенного слоя рабочими органами машин (D_s) 	<ul style="list-style-type: none"> • Внесение различных удобрений • Обработка растений пестицидами • Предпосевная обработка почвы • Эрозия почвы (водная, ветровая)

Рис. Схема определения критерия минимума негативного влияния технологических процессов на окружающую среду

Fig. Diagram for determining the criterion of minimum negative impact of technological processes on the environment

Вероятностный коэффициент $\psi_{тр}$, учитывающий уровень негативного влияния технологических процессов на окружающую среду, вычисляется по выражению:

$$\psi_{тр} = \frac{1}{4} \cdot (\psi_{X_p} + \psi_{NPK} + \psi_{K_{NPK}} + \psi_{D_s}), \quad (2)$$

где ψ_{X_p} – вероятностный коэффициент, учитывающий уровень содержания в почве пестицидов (ГОСТ Р 53217–2008); ψ_{NPK} – вероятностный коэффициент, учитывающий уровень обеспечения удобрениями (<https://universityagro.ru>); $\psi_{K_{NPK}}$ – вероятностный коэффициент, учитывающий степень неравномерности распределения в почве (на поверхности) удобрений (ГОСТ 33686–2015; Кулешов М.С. Технология и штанговая машина для вне-

сения твердых минеральных удобрений: автореф. ... канд. техн. наук. 2016); ψ_{D_s} – вероятностный коэффициент, учитывающий степень разрушения почвенного слоя рабочими органами машин (включая изменение содержания эрозионно опасных частиц (<https://universityagro.ru>; ГОСТ 33736–2016).

Вероятностный коэффициент, учитывающий уровень содержания в почве пестицидов:

$$\psi_{X_p} = (X_p)^{cp} / (X_p)^b, \quad (3)$$

где $(X_p)^{cp}$ – среднее значение содержания пестицидов в почве, мг/кг; $(X_p)^b$ – базовое (допустимое) содержание пестицидов в почве, мг/кг.

Вероятностный коэффициент, учитывающий уровень обеспечения удобрениями:

$$\psi_{NPK} = \left[(NPK)^{cp} / (NPK)^b \right], \quad (4)$$

где $(NPK)^{cp}$ – среднее значение дозы внесения удобрений, кг/га; $(NPK)^b$ – базовое (нормативное) значение дозы внесения удобрений, кг/га.

Вероятностный коэффициент, учитывающий степень неравномерности распределения в почве (на поверхности) удобрений:

$$\psi_{K_{NPK}} = \left[(K_{NPK})^{cp} / (K_{NPK})^b \right], \quad (5)$$

где $(K_{NPK})^{cp}$ – среднее значение неравномерности распределения в почве удобрений, %; $(K_{NPK})^b$ – допустимое значение неравномерности распределения в почве (на поверхности) удобрений, %.

Вероятностный коэффициент, учитывающий степень разрушения почвенного слоя рабочими органами машин – ψ_{D_s} определяем из соотношения:

$$\psi_{D_s} = \left[(D_s)^{cp} / (D_s)^b \right], \quad (6)$$

где $(D_s)^{cp}$ – среднее значение содержание эрозионно-опасных частиц (фракции почвы размером менее 1 мм), %; $(D_s)^b$ – базовое (допустимое) содержание эрозионно-опасных частиц, %.

Предложенная математическая модель, по сравнению существующими методиками расчета отдельных показателей, описывает наиболее весомые показатели оценки негативного влияния технологических процессов в растениеводстве в комплексе.

С использованием выражений (1)–(6) были произведены расчеты по определению возможного негативного воздействия технологических процессов в растениеводстве на окружающую среду.

В *таблице* по результатам расчета приведены допустимые и средние значения показателей и критерия $\psi_{тр}$ оценки степени негативного влияния технологических процессов на окружающую среду.

$$\begin{aligned} \psi_{тр} &= \frac{1}{4} \cdot (\psi_{X_p} + \psi_{NPK} + \psi_{K_{NPK}} + \psi_{D_s}) = \\ &= \frac{1}{4} \cdot (1,4 + 1,04 + 1,5 + 1,3) = 1,31. \end{aligned}$$

Результаты расчетов показывают, что при отсутствии какого-либо значимого негативного влияния



Таблица		Table		
ПОКАЗАТЕЛИ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОЦЕНКИ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ				
INDICATORS AND PROBABILISTIC COEFFICIENTS FOR ASSESSING THE NEGATIVE IMPACT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES ON THE ENVIRONMENT				
Значение показателя	X_p , мг/кг	NPK , кг/га	K_{NPK} , %	D_s , %
Допустимое	0,5	250	10	50
Среднее	0,7	260	15	65
Коэффициент ψ_{Xp}	1,40	-	-	-
Коэффициент ψ_{NPK}	-	1,04	-	-
Коэффициент ψ_{KNPK}	-	-	1,50	-
Коэффициент ψ_{D_s}	-	-	-	1,30
Коэффициент ψ_{tr}	1,31			

технологических процессов на окружающую среду значение критерия $\psi_{tr} \leq 1$, при наличии негативного влияния $\psi_{tr} > 1$. Во втором случае требуется разработать мероприятия по снижению антропогенного воздействия технологий на окружающую среду, учитывая уровень рентабельности производства продукции, соответствующий рыночной ситуации. Вместе с тем, перечень показателей оценки должен уточняться для конкретных условий производства сельскохозяйственной продукции.

Одним из вариантов обеспечения экологической безопасности применяемых агротехнологий является почвозащитное земледелие, соответствующее

правилам производства органической продукции с использованием органических удобрений без применения химических средств защиты растений от вредителей и болезней с минимальным негативным воздействием на окружающую среду [21].

Выводы. По результатам аналитического обзора научных публикаций обоснованы наиболее значимые показатели негативного влияния технологических процессов при производстве продукции растениеводства на окружающую среду: содержание пестицидов в почве, доза внесения и неравномерность распределения в почве удобрений, содержание эрозивно-опасных почвенных частиц.

Разработана математическая модель комплексной оценки технологических процессов, расчеты по которой позволяют судить о степени их негативного воздействия на окружающую среду.

Рассмотрен пример расчета на основе фактических и допустимых значений показателей оценки с использованием предложенной математической модели, показывающий, что при значении критерия $\psi_{tr} \leq 1$ не происходит превышения установленных норм безопасности, т.е. отсутствует какое-либо значимое негативное воздействие технологических процессов на окружающую среду. При $\psi_{tr} > 1$ существует риск техногенного характера от воздействия агротехнологий, в этом случае необходимо минимизировать негативные антропогенные последствия на природную среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джаббаров Н.И., Максимов Д.А., Добринов А.В. Научные принципы формирования машинных технологий производства продукции растениеводства // *Агро-ЭкоИнженерия*. 2022. N1(110). С. 102-120. DOI: 10.24412/2713-2641-2022-1110-102-120.
2. Федоренко В.Ф. О концептуальных принципах развития природоподобных технологий, предотвращения деградации сельскохозяйственных земель и повышения плодородия почв // *АгроЭкоИнженерия*. 2024. N2(119). С. 4-18. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-4-17.
3. Arora S., Arora S., Divya S. et al. Pesticides use and its effect on soil bacterial and fungal populations, microbial biomass carbon and enzymatic activity. *Current Science*. 2019. Vol. 116. Is. 4. 643-649. DOI: 10.18520/cs/v116/i4/643-649.
4. Березняк И.В., Фёдорова Н.Е., Михеева Е.Н. Гигиеническая значимость определения пестицидов в седиментационных пробах // *Здравоохранение Российской Федерации*. 2019. Т. 63. N3. С. 152-158. DOI: 10.18821/0044-197X-2019-63-3-152-158.
5. Гречишкина Ю.И., Есаулко А.Н., Горбатко Л.С. и др. Экологические аспекты применения удобрений в современном земледелии // *Вестник АПК Ставрополя*. 2012. N 3(7). 112-114. EDN: PCQTUR.
6. Лешкенов А.М., Занилов А.Х., Крылова М.Ф. Влияние биологической активности почвы на содержание органического вещества на фоне возрастающих доз минеральных удобрений // *Земледелие*. 2022. N7. С. 11-15. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-7-11-15.
7. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2020. N3. С. 3-13. DOI: 10.31857/S0002188120060125.
8. Ценч Ю.С., Ахалая Б.Х., Миронова А.В. Почвообрабатывающий посевной агрегат для восстановления эрозивно опасных земельных угодий // *Техника и оборудование для села*. 2022. N12 (306). С. 16-20. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-12-16-20.
9. Смелик В.А., Давудзай М.А. Исследование рабочего процесса машины для локального внесения ферментированных органических удобрений // *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2023. N1. (42). С. 97-103.6. DOI: 10.35523/2307-5872-2023-42-1-97-103.
10. Овчинников В.А., Жалнин Н.А., Комолов А.Д. и др. Повышение равномерности внесения минеральных и известковых удобрений // *Инженерные технологии и системы*. 2024. Т. 34. N1. С. 115-127. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.115-127.
11. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Митрофанов С.В. и др.

- Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений // *Техника и оборудование для села*. 2021. N12. С. 18-24. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-12-18-24.
12. Личман Г.И., Личман А.А. Оценка влияния качества внесения удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N5. С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-5-16-21.
 13. Джабборов Н.И., Добринов А.В. Агроэкологические аспекты моделирования и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // *АгроЭкоИнженерия*. 2024. N3(120). С. 91-109. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-3120-91-109.
 14. Медовик А.Н., Власенко В.П., Твердохлебов С.А., Цымбал А.А. Техногенная деградация почвы и орудие для оптимизации ее агрофизических свойств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N4. С. 27-29. EDN: OCPSPGJ.
 15. Белюченко И.С. Деградация почв и роль лесополос в мелиорации земель // *Научный журнал КубГАУ*. 2015. N109 (05). С. 814-835. DOI: ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/79.pdf.
 16. Артамонов А.В., Пашкин С.В., Григорьев В.С. и др. Сверхкритические водные технологии для решения экологических и энергетических задач АПК // *Вестник БГАУ*. 2018. N3(47). С. 7-12. DOI: 10.31563/1684-7628-2018-47-3-7-12.
 17. Кузыченко Ю.А. Обобщенный показатель деградации почвы как фактор формирования системы ее обработки // *Достижения науки и техники АПК*. 2012. N7. С. 12-14. EDN: PBGUOX.
 18. 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.
 19. Тихонович И.А., Завалин А.А. Перспективы использования азотофиксирующих и фитостимулирующих микроорганизмов для повышения эффективности агропромышленного комплекса и улучшения агроэкологической ситуации в РФ // *Плодородие*. 2016. N5(92). С. 28-31. EDN: WWRVYN.
 20. Мухамадиев Р.Х., Ибатуллина Р.П. Решение проблемы почвоутомления на примере ООО «Агрокомплекс «АК БАРС» // *Вестник Казанского ГАУ*. 2017. N4(46). С. 26-31. DOI: 10.12737/article_5a5f04cdba149.19278817.
 21. Джабборов Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В., Савельев А.П. Моделирование и оценка уровня плодородия почвы // *Инженерные технологии и системы*. 2024. Т. 34. N3. С. 407-423. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202403.407-423.

REFERENCES

1. Dzhaborov N.I., Maksimov D.A., Dobrinov A.V. Science concepts for designing machine technologies of crop production. *AgroEcoEngineering*. 2022. N1(110). 102-120 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2022-1110-102-120.
2. Fedorenko V.F. On conceptual principles of developing nature-like technologies, preventing agricultural land degradation and improving soil fertility. *AgroEcoEngineering*. 2024. N2(119): 4-18 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2024- 2119-4-17.
3. Arora S., Arora S., Divya S. et al. A. Pesticides use and its effect on soil bacterial and fungal populations, microbial biomass carbon and enzymatic activity. *Current Science*. 2019. Vol. 116. Iss. 4. 643-649 (In English). DOI: 10.18520/cs/v116/i4/643-649.
4. Bereznyak I.V., Fedorova N.E., Mikheeva E.N. Hygienic significance of the determination of pesticides in sedimentation tests. *Health Care of the Russian Federation*. 2019. Vol. 63. N3. 152-158. DOI: 10.18821/0044-197X-2019-63-3-152-158.
5. Grechishkina Yu.I., Esaulko A.N., Gorbatko L.S. et al. Ecological aspects of fertilizer application in modern farming. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2012. N3(7). 112-114 (In Russian). EDN: PCQTUR.
6. Leshkenov A.M., Zanilov A.H., Krylova M.F. Influence of soil biological activity on the content of organic matter against the background of increasing mineral fertilizers doses. *Zemledelie*. 2022. N7. 11-15 (In Russian). DOI: 10.24412/0044-3913-2022-7-11-15.
7. Sychev V.G., Shafran S.A., Vinogradova S.B. Soil fertility of Russia and ways of its regulation. *Agricultural Chemistry*. 2020. N3. 3-13 (In Russian). DOI: 10.31857/S0002188120060125.
8. Tsench Yu.S., Akhalaya B.Kh., Mironova A.V. Soil-cultivating and sowing unit for the restoration of erosion-hazardous land. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N12 (306). 16-20 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-12-16-20.
9. Smelik V.A., Davudzai M.A. Study of the working process of a machine for local application of fermented organic fertilizers. *Agrarian Journal of Upper Volga Region*. 2023. N1 (42). 97-103 (In Russian). EDN: ZZLKRC.
10. Ovchinnikov V.A., Zhalnin N.A., Komolov A.D. et al. Increasing the uniformity of application of mineral and lime fertilizers. *Engineering Technologies and Systems*. 2024. N34(1). 115-127 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.115-127.
11. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V. et al. Trends in the development of machines fitted with centrifugal working bodies for surface application of solid mineral fertilizers. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N12. 18-24 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-12-18-24.
12. Lichman G.I., Lichman A.A. Assessment of influence of

- fertilization quality on crop yield. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N5. 16-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-5-16-21.
13. Dzhaborov N.I., Dobrinov A.V. Agroecological aspects of crop yield modeling and forecasting. *AgroEcoEngineering*. 2024. N3(120). 91-109. (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2024-3120-91-109.
14. Medovik A.N., Vlasenko V.P., Tverdokhlebov S.A., Tsymbal A.A. Technogenic degradation of soil and a tool for optimizing its agrophysical properties. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2011. N4. 27-29 (In Russian). EDN: OCPSTGJ.
15. Belyuchenko I.S. Soil degradation and the role of forest belts in land melioration. *Scientific Journal of KubSAU*. 2015. N109. 814-835 DOI: ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/79.pdf.
16. Artamonov A., Fedotov A., Pashkin S. et al. Supercritical water technologies for solving environmental and energy problems of agro-industrial complex. *Vestnik BSAU*. 2018. N3. 7-12 (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2018-47-3-7-12.
17. Kuzychenko Yu.A. Composite index of soil degradation as a factor of formation its processing system. *Achievements of Science and Technology in Agro-industrial complex*. 2012. N7. 12-14 (In Russian). EDN: PBGUOX.
18. 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.
19. Tikhonovich I.A., Zavalin A.A. Application potential of nitrogen-fixing and phytostimulating microorganisms for increasing the efficiency of the agroindustrial complex and improving the agroecological situation in Russian Federation. *Plodorodie*. 2016. N5 (92). 28-31 (In Russian). EDN: WWRVYN.
20. Mukhamadiev R.Kh., Ibatullina R.P. Solving the problem of soil fatigue on the example of LLC «Agrocomplex «AK BARS». *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2017. N4(46). 26-31 (In Russian). DOI: 10.12737/article_5a5f04cdba1149.19278817.
21. Jabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V., Savelyev A.P. Modeling and assessment of soil fertility level. *Engineering Technologies and Systems*. 2024. N34(3). 407-423 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.034.202403.407-423.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Джабборов Н.И. – концептуализация, научное руководство, разработка обобщенного критерия оценки степени негативного влияния технологического процесса на окружающую среду;

Добринов А.В. – методология, проведение исследований, оценка достоверности полученных результатов, формулирование общих выводов;

Шамонин В.И. – обзор и анализ направлений исследований по оценке негативного влияния технологических процессов на агроэкосистему.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Dzhaborov N.I. – conceptualization, scientific supervision, development of a generalized criterion for assessing the degree of a technological process's negative impact on the environment;

Dobrinov A.V. – methodology, research implementation, validation of the obtained results, formulating general conclusions;

Shamonin V.I. – review and analysis of research directions related to the assessment of the negative impact of technological processes on the agroecosystem.

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

30.06.2025
14.08.2025



Эволюция проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин

Дмитрий Владимирович Попов,
ведущий инженер,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Денис Александрович Миронов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;

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

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. В статье представлен системный и многоаспектный анализ историко-инженерной эволюции проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин в период от зарождения земледелия до современных высокотехнологичных решений. (*Цель исследования*) Раскрыты закономерности развития конструктивных подходов, начиная с ремесленного изготовления простейших земледельческих орудий на основе эмпирического опыта, до формирования научно обоснованных методов расчета и проектирования, основанных на достижениях механики, материаловедения и агрофизики. (*Материалы и методы*) Показано, что внедрение новых материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками, а также переход к применению инженерных расчетов и виртуального моделирования (CAD/CAE/CAM) стали основой для перехода от универсальных к адаптивным и интеллектуальным конструкциям. (*Результаты и обсуждение*) Подчеркнута роль цифровизации в обеспечении надежности, энергоэффективности и экологической устойчивости современных рабочих органов для почвообрабатывающих машин. Анализ выявил различия советской инженерной школы и зарубежного опыта в подходах к проектированию. Подчеркнута роль научных школ и исследовательских институтов в формировании теории резания почвы и расчетов тягового сопротивления. Достижения в области упрочнения рабочих органов включают методы термической и вибрационной обработки, наплавки и покрытия на основе твердых сплавов. Эти технологии рассматриваются как неотъемлемая часть инженерного развития конструкции, а не как отдельное направление. Отражены современные тренды в проектировании: применение технологии цифровых двойников, параметрической геометрии, технологий точного земледелия и искусственного интеллекта. Также затронуты вопросы экологизации, устойчивого земледелия и климатической адаптации конструкций. (*Выводы*) Сделан вывод о необходимости междисциплинарного подхода в проектировании, объединяющего агрономию, машиностроение, материаловедение и цифровые технологии.

Ключевые слова: почвообрабатывающие машины, проектирование, рабочие органы, инженерный анализ, CAD/CAE, цифровой двойник, стандартизация, интеллектуальные системы, история техники.

■ **Для цитирования:** Попов Д.В., Миронов Д.А., Ценч Ю.С. Эволюция проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. №3. С. 66-73. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-66-73. EDN: IQPDGE.

Scientific article

Evolution in the Design of Working Tools for Tillage Machines

Dmitry V. Popov,
leader engineer,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;
Denis A. Mironov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: nano.otdel@mail.ru;

Yulia S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor, corresponding member
of the Russian Academy of Sciences, chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper presents a systematic, multidimensional analysis of the historical and engineering evolution in the design of working tools for tillage machines, covering the period from the origins of agriculture to contemporary high-tech solutions.

(Research purpose) The study identifies developmental patterns in design approaches, tracing the transition from artisanal production of basic agricultural implements, based on empirical knowledge, to the emergence of scientifically grounded methods of calculation and design, built on the advances in mechanics, materials science, and agrophysics. *(Materials and methods)* The research demonstrates that the introduction of new materials with improved performance characteristics, combined with the shift toward engineering calculations and virtual modeling (CAD/CAE/CAM), laid the foundation for the transition from universal to adaptive and smart design solutions. *(Results and discussion)* The study highlights the role of digitalization in improving the reliability, energy efficiency, and environmental sustainability of modern tillage machine components. It identifies key differences between the Soviet engineering school and international design methodologies. The paper underscores the contribution of scientific schools and research institutes to the development of soil-cutting theory and draft resistance calculations. Progress in the hardening of working tools is illustrated through the use of thermal and vibrational treatments, surfacing techniques, and coatings based on hard alloys. These technologies are presented not as isolated processes, but as integral components of the broader evolution in engineering design. Contemporary design trends are examined, including the application of digital twin technology, parametric geometry, precision agriculture technologies, and artificial intelligence. The study also addresses issues related to environmental sustainability, climate-adaptive engineering solutions, and sustainable agricultural practices. *(Conclusions)* The study concludes that an interdisciplinary approach is essential for the effective design of tillage implements, integrating agronomy, mechanical engineering, materials science, and digital technologies.

Keywords: tillage machines, design, working tools, engineering analysis, CAD/CAE, digital twin, standardization, intelligent systems, history of technology

■ **For citation:** Popov D.V., Mironov D.A., Tsench Yu.S. Evolution in the design of working tools for tillage machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 66-73 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-66-73. EDN: IQPDGE.

Почвообрабатывающие машины функционируют в условиях интенсивного механического воздействия, при котором рабочие органы испытывают значительные переменные нагрузки. Эти нагрузки оказывают существенное влияние на долговечность и эксплуатационную надежность узлов. Поскольку технологические параметры рабочих органов определяют агротехнические показатели обработки почвы, задача повышения их ресурса и обеспечения устойчивой работоспособности приобретает приоритетное значение. В этой связи ключевой научной проблемой является обоснование эффективности методов упрочнения, основанное на комплексном анализе и совершенствовании технологий повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Исследования в области развития технических способов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин способствуют решению вопросов повышения ресурса, прочности и эффективности рабочих органов сельскохозяйственных машин и могут привести к значительному увеличению урожайности [1] и снижению затрат [2].

Однако эволюция проектирования рабочих органов для обработки почвы включает множество аспектов, помимо прочности и износостойкости. В развитии конструкции этих орудий прослеживаются переход от эмпирических методов к научному анализу, постоянное совершенствование материалов и форм, а также интеграция рабочих органов в состав сложных машинно-технологических комплексов. Анализ исторических этапов развития

в области проектирования рабочих органов позволяет выявить ключевые достижения и закономерности, что имеет практическое значение для дальнейшего совершенствования сельскохозяйственной техники.

Цель исследования – проследить этапы развития проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Материалы и методы. В работе использовался хронологический метод исследований. Изучались научно-технические и информационные источники, в которых отражены вопросы проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин. На основе анализа и обобщения рассмотренных материалов формировались выводы.

Результаты и обсуждение. История сельскохозяйственной техники насчитывает тысячелетия. Эволюция орудий для обработки земли оказала значительное влияние на развитие земледелия и общества. От простейших ручных сошников и мотыг до современных автоматизированных агрегатов прослеживается постепенный переход от ремесленных навыков к инженерным методам проектирования.

Ранний этап развития (до XVII века)

В цивилизациях Древнего Востока (Двуречье, Египет, Китай) применялись простейшие земледельческие орудия – ручные мотыги и примитивные сошники, позже появились первые плуги. Изначально плуги изготавливались из дерева, а ключевые части укреплялись камнем или металлическими наконечниками по мере развития металлургии.

В период античности и Средневековья конструкция плуга постепенно совершенствовалась: например, в Европе к VIII–IX вв. получил распространение тяжелый колесный плуг с железным лемехом и деревянным отвалом, существенно улучшивший обработку плотных почв. Вплоть до XVII столетия проектирование рабочих орудий оставалось в основном эмпирическим процессом: знания передавались от мастера к мастеру, а усовершенствования внедрялись преимущественно методом проб и ошибок, без систематического научного подхода или теоретического осмысления.

Формирование основ инженерного проектирования (XVIII–XIX вв.)

Период XVIII–XIX веков ознаменовался переходом от ремесленного подхода к научно обоснованному проектированию рабочих органов почвообрабатывающих машин. Этот процесс был обусловлен промышленным прогрессом, развитием технических наук и потребностями интенсификации сельского хозяйства [3].

Промышленная революция, начавшаяся в Европе в середине XVIII в., способствовала внедрению в аграрное производство новых материалов и технологий. Развитие металлургии позволило отказаться от деревянных и чугунных орудий в пользу стальных, что существенно повысило надежность и производительность сельскохозяйственных машин.

Ключевым событием стало изобретение в 1837 г. американским кузнецом Джоном Диром первого коммерчески успешного стального плуга (рис. 1). Его конструкция включала полированный отвал из высококачественной стали, который обеспечивал эффективную работу в условиях тяжелых и липких почв прерий Среднего Запада США. Плуг сам очищался от налипающей земли, что стало техническим прорывом своего времени [4].



Рис. 1. Стальной плуг John Deere
Fig. 1. John Deere steel plow

Во второй половине XIX столетия в проектировании сельскохозяйственных машин стали применяться элементы научного анализа. Конструкторы начали учитывать физико-механические свойства почв, характеристики тягового усилия, оптимальные углы установки рабочих органов и другие параметры, определяющие эффективность обработки. В трудах немецких, французских и российских специалистов рассматривались задачи расчета сопротивления почве, форм отвалов и геометрии лемехов, предлагались методы определения наилучшей формы плужного отвала, обеспечивающей оборот пласта с минимальными энергозатратами.

Во второй половине XIX в. начали формироваться специализированные машиностроительные предприятия и проектные бюро, сельскохозяйственные орудия выпускались уже промышленными партиями. Это привело к стандартизации деталей и переходу от кустарного изготовления к серийному производству машин. Примером может служить британская компания *Ransomes, Sims & Jefferies*, которая с 1870-х годов выпускала различные модели плугов и борон, проектируемых на основе инженерных расчетов. Их каталоги включали чертежи, технические параметры и рекомендации по применению в зависимости от типа почвы, что свидетельствует о возросшем уровне систематизации знаний [5].

Развитие полиграфии и рост интереса к аграрной технике способствовали появлению специализированных технических журналов и справочников. В них публиковались методики расчетов, результаты испытаний, чертежи и схемы новых машин. Это стимулировало формирование инженерной культуры и развитие научных школ в области агроинженерии. В России подобные публикации начали появляться в изданиях Императорского вольного экономического общества, а также в трудах Московского и Санкт-Петербургского политехнических институтов, где закладывались основы отечественной аграрной механики.

Советский и зарубежный опыт проектирования (XX век)

XX столетие стало периодом масштабного развития теории и практики проектирования сельскохозяйственных машин. В это время формируются научные школы, создаются отраслевые НИИ и конструкторские бюро, разрабатываются новые методы расчета и испытания рабочих органов, внедряются элементы автоматизации проектирования (рис. 2). Развитие идет параллельно в СССР и за рубежом, с собственными особенностями подходов, но при общей тенденции к научному, системному проектированию.

В Советском Союзе процесс индустриализации 1920–1930-х годов вызвал стремительную механи-

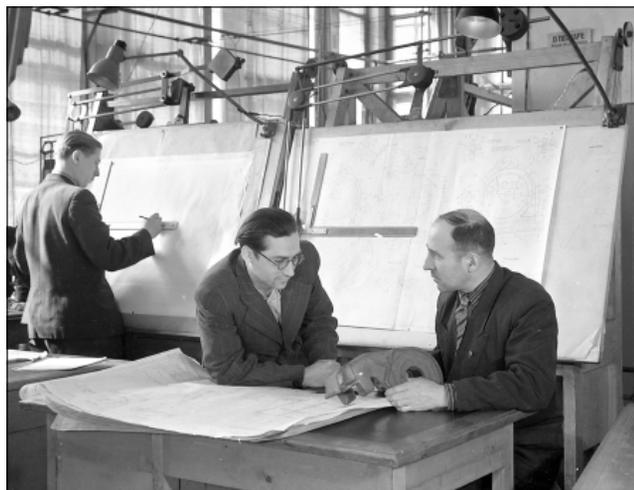


Рис. 2. Конструкторское бюро
Fig. 2. Design bureau

зацию сельского хозяйства, что потребовало массового выпуска почвообрабатывающей техники. Были созданы отраслевые научно-исследовательские институты ВИСХОМ (рис. 3), ВНИИПТИМЭСХ, ВНИИТИМЭСХ и др., конструкторские бюро и машиностроительные заводы. Работы по проектированию рабочих органов велись в рамках пятилетних планов и основывались на результатах агрофизических исследований. Внедрялись методы аналитического и графического расчета параметров рабочих органов, учитывались особенности почв различных зон СССР.



Рис. 3. Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения имени В.П. Горячкина (ВИСХОМ)
Fig. 3. All-Union Scientific Research Institute of Agricultural Machinery (VISHOM)

Особое внимание уделялось следующим направлениям: оптимизация формы лемеха и отвала для различных типов пахоты; разработка противоэрозийных рабочих органов; расчет глубины обработки и тягового сопротивления в зависимости от типа почвы; стандартизация конструкций для широкого применения в колхозах и совхозах.

В 1950-1970-х годах широкое распространение получил плуг ПЛН-3-35 (рис. 4), разработанный в рамках ГОСТов и типовых методик расчета. Его конструкция была адаптирована для средней полосы России и обеспечивала надежную работу при агрегатировании с тракторами класса 1,4. Проектирование таких машин базировалось на расчетах тягового сопротивления, энергоемкости обработки и долговечности рабочих органов [6].



Рис. 4. ПЛН-3-35
Fig. 4. PLN-3-35 plow

В странах Западной Европы и США проектирование сельскохозяйственной техники активно развивалось на базе частных компаний и университетов. Крупнейшие производители – *John Deere, Massey Ferguson, Case IH, Kverneland* создавали мощные инженерные отделы и использовали экспериментально-аналитические методы разработки. Характерными чертами зарубежного подхода были: тесная связь с фермерской практикой; выпуск машин для конкретных агроклиматических условий; интенсивные испытания в полевых условиях; применение модульного проектирования и унификации узлов; активное внедрение гидравлических и пневматических приводов в рабочих органах.

Примером инновационного подхода является плуг с отвальной поверхностью переменного профиля, разработанный в 1970-х годах норвежской компанией *Kverneland*. Он позволял менять геометрию обработки в зависимости от условий почвы и глубины.

Во второй половине XX в. активно развивались научные исследования взаимодействия рабочих органов с почвой. В СССР была создана теория резания почвы (работы Н.Н. Дубровина, С.П. Дьякова) [7], велись расчеты энергозатрат и усилий при обработке грунта [8]. Зарубежные специалисты, такие как Эдвард Фини (*Edward Finney, США*), вели исследования по оптимизации углов атаки и формы режущих кромок. Несмотря на идеологическую изоляцию времен «холодной войны», обмен инженерной информацией происходил через международные выставки, научные конференции и публикации в специализированных изданиях (например, *Journal of Agricultural Engineering Research*) [9].

Современные подходы к проектированию рабочих органов

В XXI веке проектирование рабочих органов почвообрабатывающих машин перешло на качественно новый уровень благодаря развитию цифровых технологий, совершенствованию материалов и глобализации научно-технического обмена. Современные конструкторские практики опираются на принципы системной инженерии, моделирования, энергоэффективности и адаптивности к разнообразным агроусловиям.

Одним из главных достижений современной инженерии стало широкое применение программных комплексов (рис. 5) для автоматизированного проектирования (CAD), анализа (CAE) и производства (CAM). Это позволяет: создавать трехмерные модели рабочих органов с высокой степенью детализации; проводить численное моделирование процессов взаимодействия с почвой (методы конечно-элементного анализа – FEM); оптимизировать геометрию деталей на основе симуляций нагрузки, износа и сопротивления.

Примером может служить моделирование процессов резания почвы с использованием ANSYS, SolidWorks Simulation, Autodesk Inventor, позволяющее до начала изготовления предсказать распределение напряжений в лемехе или отвале.

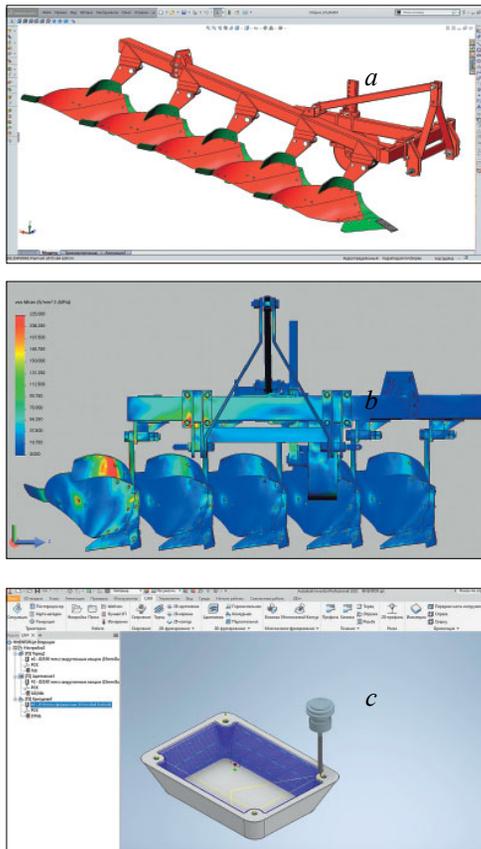


Рис. 5. Модель в CAD (a), CAE (b) и CAM (c) программе
Fig. 5. Model created using CAD (a), CAE (b) and CAM (c) software

В настоящее время рабочие органы изготавливаются из высокопрочных сталей и композитов. Применяются современные технологии упрочнения: лазерная наплавка и плазменная наплавка износостойких слоев; термомеханическая обработка для повышения твердости и вязкости; покрытия на основе нитридов и карбидов, увеличивающие срок службы в 2-3 раза по сравнению с традиционными методами; использование армированных сплавов и керамических вставок в зонах интенсивного износа. Также метод карбо-вибродугового упрочнения позволяет значительно увеличить ресурс рабочих органов за счет формирования износостойкого поверхностного слоя [10, 11].

Особое внимание уделяется повышению ремонтпригодности рабочих органов. Современные конструкции предусматривают модульную замену наиболее изнашиваемых элементов (лемехов, ножей, наконечников).

Компьютерное моделирование агрофизических процессов сейчас стало неотъемлемой частью проектирования рабочих органов. Используются как инженерные модели разрушения грунта (в том числе нелинейные модели, учитывающие анизотропию почвы), так и дискретные модели (метод дискретных элементов – DEM) для имитации взаимодействия рабочих органов с частицами почвы (рис. 6). Кроме того, применяются агроэкологические модели, учитывающие процессы эрозии, влажностный режим и уплотнение почвы при обработке. На основе таких моделей обосновываются оптимальные формы и параметры рабочих органов – геометрия режущих кромок, углы атаки, конфигурация рабочих поверхностей под различные технологии обработки (сплошная вспашка, щелевая, ленточная и т.д.).

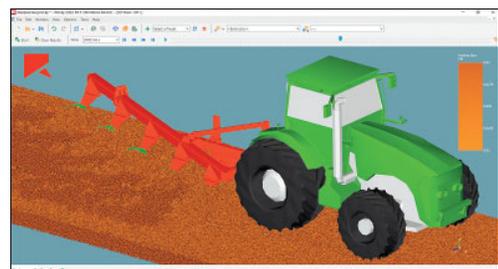


Рис. 6. Модель в программе DEM
Fig. 6. Model created using DEM (Discrete Element Method) software

Один из передовых трендов в проектировании почвообрабатывающих машин – использование технологии цифрового двойника рабочего органа. Технология цифрового двойника представляет собой создание виртуальной модели орудия, синхронизированную с реальными данными, поступающими с датчиков в ходе эксплуатации. Такой подход позволяет: адаптировать в режиме реального времени параметры работы орудия (глубину, угол атаки, ско-

рость) под изменяющиеся условия; прогнозировать износ деталей и предсказывать момент наступления отказа; осуществлять индивидуальную настройку сельхозмашины под особенности конкретного поля. Ведущие мировые производители (*CLAAS, John Deere, KUHN* и др.) интегрируют рабочие органы в состав интеллектуальных систем земледелия: с помощью сенсорных комплексов техника «видит» состояние почвы и автоматически регулирует глубину обработки, давление на почву, угол атаки и другие параметры в режиме реального времени [12].

В последние годы при проектировании все большее значение, наряду с производительностью, имеют экологические аспекты: снижение степени уплотнения почвы при проходе техники; предотвращение водной и ветровой эрозии на обработанных полях; сохранение биологической активности и структуры верхнего плодородного слоя. Соответственно, разрабатываются более «щадящие» рабочие органы: плоскорезы, чизельные рыхлители, дисковые орудия с регулируемым углом атаки, которые минимизируют переворачивание пласта. Подобные решения соответствуют концепциям нулевой обработки почвы и консервационного земледелия [13], требующим принципиально нового подхода к конструкции орудий [14].

Перспективы развития проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин

Проектирование рабочих органов почвообрабатывающих машин в ближайшие десятилетия будет развиваться под влиянием глобальных технологических, экологических и аграрных трендов. На первый план выходят задачи цифровизации, индивидуализации, устойчивости и интеграции в агроэкосистемы. Перспективные направления охватывают как методы проектирования, так и функциональные качества самих рабочих органов.

Ожидается, что алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения будут все шире использоваться при проектировании. Они позволят: автоматически оптимизировать конструкцию орудий на основе анализа большого объема компьютерных симуляций и накопленных эмпирических данных; прогнозировать поведение машины и качество обработки в различных агрофизических условиях; распознавать состояние почвы в процессе работы и мгновенно подстраивать параметры рабочего органа. Искусственный интеллект в перспективе станет не просто инструментом анализа, но одним из соавторов проектных решений, предлагая нетривиальные конструкторские решения на основе обобщения больших данных.

Набирает силу подход, при котором форма рабочих органов конструируется по аналогии с природными структурами, устойчивыми к нагрузкам и износу. К примеру, разрабатываются плужные поверх-

ности, имитирующие форму когтей животных или корней растений, способные эффективно рыхлить грунт. Такой бионический дизайн позволяет: снизить сопротивление почвы при врезании орудия; улучшить крошение и перемешивание почвы без увеличения энергозатрат; повысить износостойкость детали при минимальном расходе материала. Одновременно развивается параметрический (алгоритмический) дизайн – методика, при которой геометрия рабочего органа задается уравнениями с настраиваемыми параметрами. В результате инженер может быстро генерировать множество вариантов конструкции и адаптировать форму под конкретные условия поля или требования агротехнологии.

Будущее принадлежит интеллектуальным рабочим органам, оснащенным сенсорами и активными приводами с изменяемыми характеристиками. Такие орудия смогут автоматически регулировать глубину и режим обработки на ходу, избегать чрезмерного уплотнения почвы за счет контроля нагрузки, передавать данные о процессе обработки в цифровую модель поля в режиме реального времени. Ведутся разработки по внедрению в рабочие органы электромеханических приводов, инерциальных датчиков, сенсоров влажности и плотности почвы, а также технологий дифференцированного внесения (*VRT – Variable Rate Technology*). «Умные» рабочие органы станут элементами системы точного земледелия, позволяя реализовать адаптивное управление процессом обработки почвы прямо во время выполнения полевых работ.

В условиях нарастающих климатических проблем (засухи, деградация почв, экстремальные осадки) усиливаются тренды на без: минимальные и щадящие обработки почвы вместо глубокого вспашки; создание многофункциональных рабочих органов (например, совмещающих рыхление почвы с одновременным внесением удобрений); разработку специализированных машин для органического и точного земледелия. В этом контексте рабочие органы будут проектироваться с учетом минимального вмешательства в структуру почвы и сохранения гумусового слоя [15]. Устойчивость к климатическим стрессам и бережное отношение к почвенным ресурсам станут обязательными критериями эффективности новой агротехники.

Инженерное проектирование все более полно переходит в цифровую среду, формируя интегрированные платформы, объединяющие: средства 3D-моделирования изделий; агрономические базы данных и геоинформационные системы; системы моделирования жизненного цикла изделия (*PLM-платформы*); современные производственные технологии (аддитивное производство, цифровое литье и т.д.) [16]. Такие единые цифровые экосистемы позволят проектировать рабочие органы, адаптиро-

ванные под потребности конкретного пользователя, конкретное поле и даже конкретный сезон эксплуатации в рамках концепции индивидуализированного машиностроения. Ожидается, что в будущем конструктор будет работать не с отдельными программами, а в едином информационном пространстве, где проект автоматически учитывает агротехнические требования, материалы, технологию изготовления и условия эксплуатации.

Выводы. Проведен хронологический анализ этапов развития проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин. Рассмотрены современные тренды в проектировании.

Советская инженерная школа внесла значительный вклад в теоретическое и прикладное развитие проектирования, особенно в части стандартизации,

эргономики и ресурсосбережения. Зарубежные производители, в свою очередь, активно внедряли практико-ориентированные методы и инновационные материалы, обеспечивая высокий уровень индивидуализации техники.

Современный этап характеризуется синтезом этих направлений. Применение цифрового моделирования, искусственного интеллекта, бионического дизайна и новых материалов открывает возможности создания более эффективных, адаптивных и экологически устойчивых рабочих органов. Перспективы проектирования рабочих органов почвообрабатывающих машин напрямую связаны с развитием «умного» земледелия, что требует междисциплинарного подхода, объединяющего инженерию, агрономию, информатику и экологию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Слинко Д.Б., Денисов В.А., Добрин Д.А. и др. Повышение эффективности технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин электродуговой наплавкой износостойкими валиками // *Технический сервис машин*. 2020. N1 (138). С. 176-185. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-176-185.
- Ожегов Н.М., Добринов А.В., Ружьев В.А. Исследования методов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин и разработка автоматической установки для нанесения на них упрочняющих покрытий // *Современные наукоёмкие технологии*. 2017. N3. С. 28-31. EDN: YIZVJR.
- Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В., Рябова Н.Ю. Страницы истории агроинженерного образования России в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // *Известия ТСХА*. 2021. N4 С.149-169. DOI: 10.26897/0021-342X-2021-4-149-169.
- John Deere [Электронный ресурс]. *Encyclopædia Britannica*. 2025. URL: <https://www.britannica.com/biography/John-Deere> (дата обращения: 19.05.2025).
- Васильева И.Л. Историческая эволюция проектирования // *Вестник Полесского государственного университета. Серия общественных и гуманитарных наук*. 2014. N1. С. 50-55. EDN: THPJFJ.
- Шипунова О.Д., Березовская И.П., Денисков А.В. Эволюция принципов проектирования взаимодействий в профессиональной среде // *Вестник науки Сибири*. 2018. N2(29). С. 34-47. EDN: XVQUUH.
- Кочергин А.С., Псюкало С.П. Восстановление и упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных орудий // *Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации*. 2021. N 5. С. 31-34. EDN: FSKRNM.
- Ценч Ю.С., Миронов Д.А., Попов Д.В. Развитие методов упрочнения почвообрабатывающих рабочих органов // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62. N4. С. 154-164. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-154-164.
- Шапарина О.Н., Карасева А.О. История развития машиностроения Подмосковья в школьных учебниках и пособиях // *Посткризисный мир и модернизация современной науки: концепции, проблемы, решения; сб. VII Междунар. науч.-практ. конф.* 2021. С. 139-144. EDN: LMNZHZ.
- Титов Н.В., Петриков И.А., Кондрахин Н.А. Применение метода карбовибродугового упрочнения для повышения ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Агротехника и энергообеспечение*. 2015. N1(5). С. 130-137. EDN: XCBGPH.
- Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N1. С. 41-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
- Сидоров С.А., Лискин И.В., Миронов Д.А. и др. Повышение работоспособности стрелчатых лап культиваторов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N4 (37). С. 44-50. EDN: TCORQW.
- Лялякин В.П., Огородник И.А. Из истории развития сервиса машин // *Технический сервис машин*. 2019. N2 (135). С. 198-207. EDN: ZYQZLF.
- Козырев А. Ю., Ключков А. Я. История развития систем проектирования // *Технические науки: традиции и инновации: матер. I Междунар. науч. конф. Челябинск: Два комсомольца*, 2012. С. 64-66. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/6/1575/>.
- Дубровин В.А., Левчук Н.С. Перспективы дифференциации основной обработки почвы // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2001. N2. С. 32-34. EDN: ECNYSL.
- Ценч Ю.С., Миронов Д.А., Пыжов В.В. Развитие методов восстановления деталей тракторных двигателей // *Технический сервис машин*. 2025. Т. 63. N1. С. 102-110. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.

REFERENCES

1. Slinko D.B., Denisov V.A., Dobrin D.A. et al. Improving the efficiency of hardening of tillage machine working bodies by arc surfacing using wear-resistant rollers. *Machinery Technical Service*. 2020. N1 (138). 176-185 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-176-185.
2. Ozhegov N.M., Dobrinov A.V., Ruzhev V.A. Investigations of methods of strengthening the working organs of tillage machines and the development of an automatic plant for applying hardening coatings on them. *Modern High Technologies*. 2017. N3. 28-31 (In Russian). EDN: YIZVJR.
3. Zaitseva N.L., Aldoshin N.V., Ryabova N.Yu. Development stages of domestic agroengineering education in Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2021. N4.149-169 (In Russian). DOI: 10.26897/0021-342X-2021-4-149-169.
4. John Deere [Electronic resource]. *Encyclopædia Britannica*. 2025. URL: <https://www.britannica.com/biography/John-Deere> (date of reference: 05/19/2025).
5. Vasilyeva I.L. The historical evolution of design. Bulletin of Polesky State University. Series in social sciences and humanities. 2014. N1. 50-55 (In Russian). EDN: THPJFJ.
6. Shipunova O.D., Berezovskaya I.P., Deniskov A.V. Evolution of principles of interaction design in professional environment. *Siberian Journal of Science*. 2018. N2(29). 34-47 (In Russian). EDN: XVQUUH.
7. Kochergin A.S., Psyukalo S.P. Restoration and strengthening of working organs of agricultural implements. *Young science of the agrarian Don: traditions, experience, innovations*. 2021. N5. 31-34 (In Russian). EDN: FSKRNM.
8. Popov D.V., Mironov D.A., Tsench Yu.S. Development of methods for strengthening soil-cultivating working bodies. *Machinery Technical Service*. 2024. Vol. 62. N4. 154-164 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-154-164
9. Shaparina O.N., Karaseva A.O. The history of the development of mechanical engineering in the Moscow region in school textbooks and manuals. *The post-crisis world and the modernization of modern science: concepts, problems, solutions*. 2021. C. 139-144 (In Russian). EDN: LMNZHZ.
10. Titov N.V., Petrikov I.A., Kondrakhin N.A. Application of vibroarc hardening for increasing resource of tillers's working organs. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2015. N1(5). 130-137 (In Russian). EDN: XCBGPH.
11. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing the operating lifetime of wearable working bodies of agricultural machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
12. Sidorov S.A., Liskin I.V., Mironov D.A. et al. Improving the workability of the lancet paws of a cultivator. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2019. N4 (37). 44-50 (In Russian). EDN: TCORQW.
13. Lyalyakin V.P., Ogorodnik I.A. From the history of the development of service machines. *Machinery Technical Service*. 2019. N2 (135). 198-207 (In Russian). EDN: ZYQZLF.
14. Kozyrev A.Yu., Klochkov A.Ya. History of design systems development. *Technical sciences: traditions and innovations*. 2012. C. 64-66 (In Russian). URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/6/1575/>.
15. Dubrovin V.A., Levchuk N.S. Prospects of differentiation of basic tillage. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2001. N2. 32-34 (In Russian). EDN: ECNYSL.
16. Tsench Yu.S., Mironov D.A., Pyzhov V.V. Development of methods for restoring tractor engine parts. *Machinery Technical Service*. 2025. Vol. 63. N3. 102-110 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Попов Д.В. – сбор и анализ материалов по теме исследования, подготовка статьи;

Миронов Д.А. – обработка данных;

Ценч Ю.С. – научное руководство, формирование задач исследования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Popov D.V. – collection and analysis of materials on the research topic, preparation of an article;

Mironov D.A. – data processing;

Tsench Yu.S. – scientific guidance, formation of research tasks

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

03.06.2025

31.07.2025



Становление инфраструктуры химизации отечественного сельского хозяйства

Иван Вадимович Сидоров,
преподаватель колледжа,
младший научный сотрудник,
e-mail: nit123@yandex.ru

Гжельский государственный университет, Московская обл., Российская Федерация

Реферат. Важным аспектом изучения развития химизации отечественного сельского хозяйства является ретроспективный анализ основных инфраструктурных составляющих ее научно-технического обеспечения, поскольку широкое внедрение химических средств и методов основано на скоординированной деятельности множества разнородных организаций. (*Цель исследования*) Провести историко-ретроспективный анализ становления инфраструктуры химизации сельского хозяйства России. (*Материалы и методы*) Изучили монографии, нормативно-правовые акты, оригинальные и обзорные научные публикации с использованием хронологического, генетического и описательного методов. (*Результаты и обсуждение*) Первоначально инфраструктура химизации сельского хозяйства России была представлена высшими учебными заведениями, где формировались научные основы агрохимии и защиты растений. Затем стали создаваться специализированные исследовательские учреждения. Важным передаточным звеном между наукой и практикой также стала агрохимическая служба, созданная в 1964 г. Появившись как сеть контрольно-консультативных лабораторий, в 1979 г. она реформируется в мощную производственную структуру, вновь разобщенную в результате протекавших в стране дезинтеграционных процессов. Показана материнская роль системы «Союзсельхозтехники» по отношению к системе агрохимического обслуживания. Особая модель управления химизацией, сложившаяся в рамках советского государства, обеспечила активное формирование необходимой инфраструктуры. Органы отраслевого управления и научно-технической политики выступали исполнителями решений высшего партийного руководства и его консультантами. (*Выводы*) Взаимодействие различных инфраструктурных составляющих системы химизации обеспечило становление научных школ, формирование мощной теоретической платформы и производственного задела, позволивших агропромышленному комплексу нашей страны добиваться впечатляющих показателей в советский период истории и заложить запас прочности на последующие годы.

Ключевые слова: химизация сельского хозяйства, аграрное образование, научно-исследовательские учреждения, агрохимическая служба, органы управления, научно-техническая политика.

■ **Для цитирования:** Сидоров И.В. Становление инфраструктуры химизации отечественного сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 74-84. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-74-84. EDN: JEJEJD.

Scientific article

Development of the Infrastructure for Agricultural Chemicalization in Russia

Ivan V. Sidorov,
college lecturer, junior researcher,
e-mail: nit123@yandex.ru

Gzhel State University, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. An important aspect of studying the development of agricultural chemicalization in Russia is the retrospective analysis of the key infrastructural components supporting its scientific and technical development, since the widespread application of chemical agents and methods has always depended on the coordinated activities of numerous diverse organizations. (*Research purpose*) To conduct a historical and retrospective analysis of the formation and evolution of the infrastructure supporting agricultural chemicalization in Russia. (*Materials and methods*) Monographs, regulatory documents, and both research and review scientific publications were analyzed using chronological, genetic, and descriptive methods. (*Results and discussion*) The initial infrastructure of agricultural chemicalization in Russia was shaped by higher education institutions, where the scientific foundations of agrochemistry and plant protection were developed. Over time, specialized research institutes were founded further strengthening the scientific base. A major intermediary between science and practice was the Agrochemical Service, created in

1964. Initially organized as a network of control and consulting laboratories, it evolved into a powerful production system by 1979 but was later fragmented due to nationwide disintegration processes. The Soyuzselkhoztehnika system played a pivotal role in supporting and coordinating the agrochemical service network. A unique management model of chemicalization emerged within the Soviet state framework, enabling the systematic infrastructure development. Industry-specific administrative bodies and institutions responsible for science and technology policy functioned both as executors of Party leadership decisions and as their advisors. (*Conclusions*) The coordinated interaction among various infrastructural components of the agricultural chemicalization system facilitated the development of scientific schools, the establishment of a solid theoretical framework, and the creation of significant production capacities. These achievements enabled the Soviet agro-industrial complex to reach impressive results during the Soviet period and laid a strong foundation for its sustainable performance in the following decades.

Keywords: agricultural chemicalization, agrarian education, research institutions, agrochemical service, administrative bodies, science and technology policy.

For citation: Sidorov I.V. Development of the infrastructure for agricultural chemization in Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 74-84 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-74-84. EDN: JEJEJD.

Широкое внедрение химических средств и методов интенсификации сельского хозяйства на научной основе невозможно без слаженной работы множества различных организаций (высшей школы, науки и управления, производственных и обеспечивающих коллективов). Это предопределяет актуальность комплексных историко-аналитических исследований совместного становления и развития основных инфраструктурных составляющих научно-технического обеспечения химизации сельского хозяйства [1].

Цель исследования – провести историко-ретроспективный анализ становления инфраструктуры химизации сельского хозяйства России.

Материалы и методы. При подготовке статьи использовались монографии, нормативно-правовые акты, оригинальные и обзорные научные публикации. Обработка полученных данных проведена с применением историко-научных методов: хронологического, генетического и описательного.

Результаты и обсуждение. Постановка проблемы химизации сельского хозяйства России связана с усилиями представителей научно-педагогической общественности (А.Н. Энгельгардт, Д.И. Менделеев, Д.Н. Прянишников и др.). По этой причине главную роль в развитии теории и практики применения химических средств в сельском хозяйстве в дореволюционные годы выполняли высшие учебные заведения. Поскольку агрохимия обрела самостоятельный статус лишь в середине XIX в., истоки идеи химизации следует соотносить с деятельностью профессорского корпуса и кафедр земледельческого профиля, официально утвержденных в России с 1804 г. В российских университетах особые кафедры агрохимии были введены лишь уставом 1863 г., с правом замены кафедрами сельского хозяйства, периодически то появляясь, то исчезая в их структуре. Столь же непостоянно

присутствовала в университетских программах как дисциплина и сама агрохимия. Вопросы защиты растений, в том числе химической, относились главным образом к энтомологии и ботанике.

Существует коллизия по вопросу о первой в послереволюционной России кафедре агрохимии в сельскохозяйственном вузе. Традиционно в этом качестве называют подразделение Тимирязевской академии (1928 г.) [2]. Однако известно, что такая кафедра была организована в Кубанском сельскохозяйственном институте еще в 1922 г. Вероятно, здесь нет противоречия: если краснодарская кафедра была первой хронологически, то московская стала первой официально полноправной. Затем подобные кафедры начали создавать уже во многих сельскохозяйственных вузах.

Специализация по технологии и товароведению минеральных удобрений впервые в России возникла в Московском институте народного хозяйства им. К. Маркса (ныне Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова) в 1919 г. благодаря усилиям Я.В. Самойлова и Э.В. Брицке (он же организовал первую в СССР кафедру технологии минеральных удобрений в Московском высшем техническом училище).

В сфере защиты растений следует отметить создание Н.Н. Богдановым-Катьковым в Петрограде сначала Высших курсов (1920 г.) и в 1922 г. на их базе Института прикладной зоологии и фитопатологии (ИЗИФ). С периодической сменой названий этот институт проработал до 1958 г.

В 1930-1931 гг. высшая школа становится на путь создания большого количества специализированных учебных заведений. Наиболее яркой иллюстрацией данной реформы стало разделение Тимирязевской академии на ряд институтов, в частности, Московский институт агрохимии и почвоведения (МИАП). В его состав был включен одноименный

факультет Тимирязевской академии и отделение почвоведения Московского государственного университета. Подобные узкоспециализированные институты были сформированы в Киеве и Перми, однако просуществовали недолго.

Развитие агрохимического образования и исследований, несмотря на ряд дискуссий, продолжалось и в классических университетах. Однако дважды (в начале 1930-х годов и после сессии ВАСХНИЛ 1948 г.) их агрохимические кафедры попадали под сокращение.

Параллельно происходит становление системы подготовки специалистов по защите растений с активным освоением химического метода. В 1930 г. в Тимирязевской академии возник первый в СССР факультет защиты растений. Годом позже (1931 г.) на базе рабфака Ленинградского института по борьбе с вредителями и болезнями в сельском хозяйстве (ЛИНБОВ) и ряда других учебных заведений во Владимире организовано особое учебное заведение аналогичной направленности – «учкомбов» (учебный комбинат по борьбе с вредителями сельского хозяйства). В нем предполагалось сочетание всех уровней специального образования (вуз–техникум–рабфак). Подобное учебное заведение (Волжский Учкомбов) работало также в Ульяновске.

К 1939 г. большая часть специалистов с высшим образованием, ответственных за планирование и применение различных химических средств в сельском хозяйстве СССР, была подготовлена в послевоенное время. Раннесоветский корпус профессионалов отличался не только достаточной молодостью, но и многочисленностью.

В послевоенные годы важную роль в развитии агрохимических и химико-защитных работ сыграло постановление Центрального Комитета КПСС и Совета Министров СССР от 9 января 1963 г. № 63 «О мерах по дальнейшему развитию биологической науки и укреплению ее связи с практикой». Принятие этого постановления с указанием важных задач по химизации способствовало созданию факультетов агрохимии и почвоведения в ряде вузов страны, отделения агрохимии на биолого-почвенном факультете МГУ и увеличению плана приема на обучение специалистов по защите растений.

К периоду правления Л.И. Брежнева относится появление в 1973 г. первого в мировой университетской истории факультета почвоведения в Московском университете. Специальность «Агрохимия и почвоведение» была единой для классических университетов и сельскохозяйственных вузов.

С началом во второй половине 1970-х годов интенсивной химизации сельского хозяйства обострился кадровый вопрос, особенно на фоне общего оттока людей из села. Параллельно были претензии к качеству подготовки специалистов. Однако

развал СССР привел к радикальным изменениям вместо планомерной модернизации высшей школы. На сегодняшний день защита растений утратила статус самостоятельного направления подготовки. Агрохимии удалось этого избежать, но ответственные за ее преподавание факультеты и кафедры нередко стали переименовываться в агроэкологические. Причиной тому стал как запрос общества на экологичность земледелия, так и растущее с конца 1980-х годов негативное отношение к достижениям химии [3].

Результаты исторического анализа позволяют сделать вывод о необходимости готовить в вузах специалистов комплексной химизации, хорошо подготовленных технически. Поэтому представляется, что новый тип востребованного агротехнолога возникнет на основе именно агроинженерного образования. Форматы такой подготовки сегодня активно разрабатываются не только в учебных, но и научных заведениях, примером чему является деятельность ФНАЦ ВИМ [4]. Необходимо также учесть опыт подготовки технологов сельскохозяйственного производства по некогда существовавшей специальности 311200.

По мере становления в СССР специализированных научных институтов они перенимают у высшей школы роль основы научно-технического потенциала. Родоначальником агрохимических исследований в нашей стране можно считать Научный институт по удобрениям (НИУ), созданный в 1919 г. на основе дореволюционного Общественного комитета по делам удобрений [5]. Примечательно, что с момента основания в НИУ проводились исследования по механизации процесса внесения удобрений. Ответственным за это направление был выпускник Московского сельхозинститута, видный механизатор профессор Н.В. Сладков (1876-1938).

По мере дальнейшего развития химизации возникла необходимость специализации обслуживающих ее научных центров. Поэтому в 1931 г. агрохимическая тематика была выведена из НИУ в отдельную структуру – Всесоюзный научно-исследовательский институт удобрений и агропочвоведения (ВИУА) [6]. В послевоенные годы институт получил наименование Всесоюзного НИИ удобрений и агропочвоведения, с 2003 г. – это Всероссийский НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова (ВНИИА). Институт внес свой вклад и в развитие соответствующего направления механизации: работала тематическая лаборатория, проводилось агротехническое обоснование требуемых конструкций.

С созданием ВИУАА начинается история организации сети специализированных сельскохозяйственных НИИ по вопросам химизации (см. *таблицу*). Их наибольшее количество было создано в 1976-1991 гг. для научного сопровождения развернутых в стра-

Таблица		Table
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ НАУЧНЫЕ ЦЕНТРЫ ПО ВОПРОСАМ ХИМИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА SPECIALIZED SCIENTIFIC CENTERS FOR AGRICULTURAL CHEMICALIZATION		
Год основания	Название организации, этап химизации	Статус на 2025 г.
<i>Формирующий этап (1924-1948)</i>		
1931	Всесоюзный институт удобрений и агропочвоведения, затем Всероссийский НИИ удобрений и агропочвоведения, с 1965 г. имени Д.Н. Прянишникова (ВИУА), г. Москва	В 2003 г. объединен с ЦИНАО во ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова
<i>Стабилизационный этап (1963-1976)</i>		
1965	Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт по технологии и экономике хранения и использования в сельском хозяйстве минеральных удобрений и химических средств защиты растений (ВНИИПсельхозхим), г. Рязань	В 1976 г. разделен на ВНИИМС и ВНИПИагрохим
1969	Центральный научно-исследовательский институт агрохимического обслуживания сельского хозяйства (ЦИНАО), г. Москва	В 2003 г. объединен с ВИУА
	Сибирский научно-исследовательский институт химизации сельского хозяйства (СибНИИЗиХ), Новосибирская обл., р.п. Краснообск	В 2015 г. присоединен к Сибирскому ФНЦ агробиотехнологий
<i>Интенсивный этап (1976-1991)</i>		
1976	Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт по организации, экономике и технологии материально-технического снабжения сельского хозяйства (ВНИИМС), г. Рязань	В 2001 г. объединены, с 2018 г. – Институт технического обеспечения сельского хозяйства, филиал ФНАЦ ВИМ
	Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт по технологии и экономике хранения, транспортировки и механизации внесения в почву минеральных удобрений (ВНИПИагрохим), г. Рязань	
1977	Запорожский научно-исследовательский конструкторско-технологический институт по машинам для подготовки и внесения в почву минеральных удобрений (НИКТИМсельхозмаш)	После распада СССР остался за пределами России и утратил прежнее значение
1980	Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт химизации сельского хозяйства (ВНИПТИХИМ), Московская обл., пос. Немчиновка	В 2003 г. присоединен к НИИ сельского хозяйства Центральных районов Нечерноземной зоны (ныне ФИЦ «Немчиновка», Сколково)
1982	Научно-исследовательский конструкторский и проектно-технологический институт жидких удобрений (НИКПТИЖ), г. Клин	С 2006 г. – Клинский филиал ФНАЦ ВИМ
1985	Всесоюзный научно-исследовательский конструкторский и проектно-технологический институт химической мелиорации почв (ВНИПТИМ), г. Пушкин	В 1999 г. присоединен к Агрофизическому НИИ
<i>Децентрализованный этап (с 1991 по настоящее время)</i>		
1993	Всероссийский научно-исследовательский институт информатизации агрономии и экологии (ВНИИ Агроэкоинформ), Московская обл.	Ликвидирован как госучреждение в 2021 г.

не масштабных работ по интенсивной химизации сельского хозяйства. Ряд центров занимался ее «узким местом» – инфраструктурными вопросами, среди которых наибольшую остроту имела проблема потерь при доставке и хранении минеральных удобрений на фоне растущего объема их выпуска.

В 1964 г. возникла потребность научно-методического обеспечения созданной единой агрохимической службы. Эту задачу выполняла организо-

ванная в 1966 г. при ВИУА Центральная контрольная агрохимическая лаборатория (ЦКАЛ), на ее базе в 1969 г. был развернут Центральный НИИ агрохимического обслуживания сельского хозяйства (ЦИНАО) [7]. Деятельность ЦКАЛ и ЦИНАО связана с именами В.М. Клычникова, Л.М. Державина, А.М. Артюшина, В.А. Захаренко, В.Г. Сычева, М.Е. Яковлевой, В.П. Толстоусова, С.Г. Самохвалова, Е.Н. Ефремова, О.А. Шаповал и др.



Рис. 1. Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт химизации сельского хозяйства (ВНИПТИХИМ)

Fig. 1. Building of the All-Russian Research and Design-Technological Institute for Agricultural Chemicalization (VNIPTIKHIM)

Аналогичные процессы происходили на республиканском уровне – в 1979 г. принимается решение о преобразовании Российской республиканской контрольной агрохимической лаборатории во Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт химизации сельского хозяйства – ВНИПТИХИМ, первый в СССР, где комплексно решались фундаментальные и технологические проблемы использования химических средств в земледелии и животноводстве (рис. 1). В числе видных исследователей данного коллектива – А.В. Петербургский, А.В. Постников, П.Д. Попов, Н.В. Войтович, В.Г. Сычев, Б.А. Сушеница, С.А. Шафран, Б.П. Лобода, М.А. Кузьмич, В.Г. Уточкин, О.В. Сдобникова, В.Д. Черевиков, В.К. Тафинцев и др. В 2003 г. независимая история ВНИПТИХИМ завершилась.

Кроме научно-исследовательских функций институт решал информационно-аналитические задачи, что привело к созданию в 1981 г. на его базе Кустового вычислительного центра по химизации сельского хозяйства Российской Федерации. В 1993 г. после ряда переименований он преобразован в самостоятельный институт «Агроэкоинформ».

В 1970 г. в Пушкино была реализована давняя идея основоположника советской научной школы в агрономической химии Д.Н. Прянишникова о создании академического Института агрохимии. С его открытием был восстановлен прежний статус почвоведения и агрохимии, утраченный с передачей в 1961 г. Почвенного института им. В.В. Докучаева в ВАСХНИЛ [8].

Развитие тематики химизации имело место не только в специализированных научных центрах, но и в отраслевых и зональных институтах по сель-

скому хозяйству. На опытных станциях подобные подразделения уже существовали не позднее середины 1920-х годов, и к середине 1930-х годов их наличие уже стало устоявшейся практикой.

Параллельно создавались научные заведения, специализирующиеся на химической защите растений. Осенью 1922 г. по инициативе Г.Д. Угрюмова была учреждена «Газовая лаборатория для изучения и разработки методов применения газов в борьбе с саранчой и сусликами», переименованная в 1924 г. в Научно-исследовательскую лабораторию отравляющих веществ (НИЛОВ), где наряду с изучением пестицидов прорабатывались конструкции аппаратов по применению химикатов. Лаборатория располагалась в исторической местности Москвы – Зарядье и в 1929 г. была включена в состав создаваемый Институт борьбы с вредителями и болезнями растений (с 1930 г. Всесоюзный институт защиты растений – ВИЗР).

По сей день этот институт проводит полный спектр работ по внедрению химических средств защиты растений, в том числе по механизации их применения [9]. С 1966 г. на республиканском уровне этими вопросами занимается также Всероссийский НИИ защиты растений (ВНИИЗР) в Воронежской области.

В 1931-1936 гг. развитием авиаприменения средств защиты растений занималось особое научное учреждение – Всесоюзный НИИ сельскохозяйственной авиации (ВНИИСХА) [10]. Он являлся заключительным звеном в цепи исследований по авиационно-химическим работам и взаимодействовал с большим количеством других исследовательских центров, в т.ч. ВИМ. Вновь самостоятельный научный центр данного направления появился лишь в 1964 г. в Краснодаре; сейчас это Научно-производственная компания «ПАНХ».

Применение наземной техники химизации стало предметом научного осмысления специалистов агроинженерных научных учреждений. Первым был созданный в 1928 г. и ныне не существующий Всесоюзный институт сельскохозяйственной механики, позднее институт сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ, Москва). На протяжении всей его истории химизация занимала важное место в исследованиях. По данной тематике в ВИСХОМ трудились З.С. Насоновская, В.А. Федоров, И.Ф. Сендряков, И.Ф. Снеговский, С.Ф. Прокопенко, А.М. Щербаков, В.Н. Кольберг (Свиридова), Г.П. Потапов, Ю.В. Рыбинский, Р.С. Зеленцов, В.В. Ченцов, М.М. Фирсов, Н.Н. Краховецкий и др. (рис. 2).

Тематика химизации развивалась на протяжении всей 95-летней (с 1930 г.) истории Всесоюзного института механизации сельского хозяйства (ВИМ). С 1990-х годов он является головным научно-методическим центром разработки техники и техноло-



Рис. 2. Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ)
Fig. 2. All-Union Institute of Agricultural Engineering (VISHOM, Moscow)

гий дифференцированного применения агрохимикатов и пестицидов в системе точного земледелия. Сегодня изучаются возможности не только наземной техники для химизации, но и беспилотной авиации. Развитие машинных технологий химизации сельского хозяйства в ВИМ связано с именами А.Н. Карпенко, Г.М. Бузенкова, А.Ю. Измайлова, Я.П. Лобачевского, В.Ф. Федоренко, А.С. Дорохова, К.И. Дебу, Ф.М. Соловья, М.А. Луканова, Н.М. Марченко, Ю.В. Иванова, Б.А. Нефедова, Г.И. Личмана, В.П. Елизарова, В.В. Воропаева, М.А. Литвинова, В.Р. Рогачева, А.Е. Шебалкина, В.В. Михеева, А.В. Михеева, И.Г. Смирнова, Э.Г. Аристова, Л.А. Марченко и др.

Нельзя не отметить вклад научных учреждений, входящих в состав ФНАЦ ВИМ. Традиции учрежденного в 1965 г. в Рязани института ВНИИПсельхозхим сегодня продолжает Институт технического обеспечения сельского хозяйства (ИТОСХ) [11]. От выросшего из экспериментальной лаборатории Научно-исследовательского конструкторского и проектно-технологического института жидких удобрений (НИКПТИЖ) ведет историю Клинский филиал ВИМ. Комплексную разработку региональных проблем химизации проводил Научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства (НИПТИМЭСХ) Северо-Запада – ныне Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) в Санкт-Петербурге [12].

История научных учреждений по разработке технологий производства различных средств химизации также восходит к НИУ. В 1933 г. к нему присоединяется небольшой исследовательский коллектив созданного в 1931 г. Научного института инсектофунгицидов (НИИФ, Москва) (рис. 3).

Объединенное учреждение получает современное название: Научно-исследовательский институт



Рис. 3. Научный институт инсектофунгицидов (здание не сохранилось)
Fig. 3. Former building of the Scientific Research Institute of Insecto-Fungicides (now demolished)

по удобрениям и инсектофунгицидам имени профессора Я.В. Самойлова (НИУИФ). В послевоенные годы окончательно утвердился его химико-технологическая специализация (рис. 4).



Рис. 4. Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам (НИУИФ, арх. А.В. Щусев, объект культурного наследия г. Москвы)
Fig. 4. Research Institute of Fertilizers and Insecto-Fungicides (NIUIF, architect A.V. Shchusev, a cultural heritage site of Moscow)

НИУ-НИУИФ сыграл системообразующую роль, на его основе возникли научные центры, обеспечившие развитие отечественного производства всей необходимой сельскому хозяйству химической продукции: от удобрений до пестицидов, а также сырья для ее изготовления (рис. 5). Примером первого типа служат Государственный институт азотной промышленности (ГИАП), Всесоюзный НИИ химических средств защиты растений (ВНИИХСЗР) и Всесоюзный научно-исследовательский технологический институт гербицидов и регуляторов роста растений (ВНИТИГ). Институтами сырьевой направленности являлись Государственный инсти-

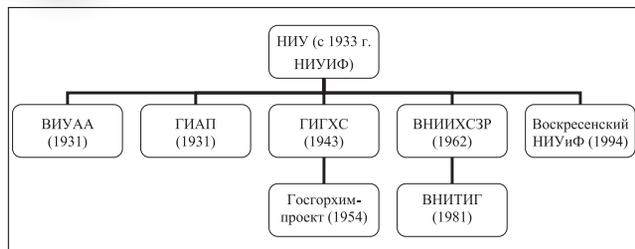


Рис. 5. Научный институт по удобрениям – родоначальник исследований по химизации в СССР (по А.М. Норову)
Fig. 5. Scientific Research Institute of Fertilizers – the pioneer of research on chemicalization in the USSR (according to A.M. Norov)

тут горнохимического сырья (ГИГХС), Государственный союзный институт по проектированию предприятий горнохимической промышленности (Госгорхимпроект) и Воскресенский научно-исследовательский институт по удобрениям и фосфорной кислоте.

Наибольшее количество научных центров по разработке и технологиям производства средств химизации возникло в течение формирующего этапа, в период создания практически с нуля мощной химической промышленности. В настоящее время продолжается тенденция перевода научных учреждений непосредственно на крупнейшие промышленные площадки.



Рис. 6. Основоположник химии пестицидов в СССР Н.Н. Мельников (1908–2000)

Fig. 6. Melnikov, N.N. (1908–2000), the founder of pesticide chemistry in the USSR

В развитие химической защиты растений значительный вклад внес отдел инсектофунгицидов НИУиФ, который в 1962 г. дал начало новому Всесоюзному институту химических средств защиты растений (ВНИИХСЗР). Особое место в его истории занял известный химик-органик, член-корреспондент АН СССР и РАН Н.Н. Мельников [13]. Примечательно, что он имел кандидатскую степень и по сельскохозяйственным наукам (рис. 6).

На рубеже 1970–1980-х годов на базе филиалов столичных научных центров возникают самосто-

ятельные учреждения: в 1979 г. в Киеве Всесоюзный институт проектирования производств химических средств защиты растений (ВИПХСЗР) и в 1981 г. в Уфе Всесоюзный научно-исследовательский технологический институт гербицидов и регуляторов роста растений (ВНИТИГ), продолжающий работу в системе Академии наук Республики Башкортостан.

В конце 1980-х годов на повседневные проблемы сельского хозяйства переориентировался Всесоюзный НИИ фитопатологии (ВНИИФ, Московская обл.) – один из наследников ВИЗР, созданный в 1950-е годы для решения оборонных задач.

Во Всероссийском НИИ зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ) с момента его создания в 1929 г. проводятся исследования по защите от вредителей и санитарной охране зерна и зернопродуктов, в значительной степени обеспечиваемым химическим путем.

Информационно-аналитическое обеспечение исследований, а также проработка экономических аспектов химизации осуществлялись как самими научными центрами, так и специальными учреждениями.

По сей день проблема научно-производственной интеграции в сельском хозяйстве не потеряла своей актуальности [14]. Важнейшим проводником научных рекомендаций является агрохимическая служба. Создать ее предлагал ученик Д.Н. Прянишникова А.В. Петербургский еще в 1932 г., однако реализовать его идею удалось только в 1964 г., когда на фоне неудач аграрной политики была сделана ставка на широкую химизацию.

Содействовать успеху внедрения методов химизации должна была сеть хорошо оснащенных зональных агрохимических лабораторий (ЗАЛ), организованных с учетом передового опыта ГДР и прибалтийских республик [15].

По своему значению создание единой агрохимической службы страны уместно сравнить с метрологической реформой Д.И. Менделеева. В то же время отсутствие у агрохимиков возможностей влиять на качество выполнения работ создавало разрыв между высоким уровнем их рекомендаций и несовершенной практикой применения. Для устранения этого разрыва в 1979 г. проведена реорганизация данной службы – кроме проведения анализов и консультирования хозяйств, ей поручались работы и по внесению агрохимикатов и пестицидов. Было создано Всесоюзное производственно-научное объединение по агрохимическому обслуживанию сельского хозяйства Всесоюзное объединение «Союзсельхозхимия» – мощная производственно-снабженческая организация, руководитель которой одновременно являлся заместителем министра сельского хозяйства СССР (рис. 7).



Рис. 7. В.П. Никонов (1929-1993) первый председатель ВО «Союзсельхозхимия»

Fig. 7. Nikonov V.P. (1929-1993), the first Chairman of the All-Union Association "Soyuzselkhozkhimiya"

Предпосылки к реформе агрохимической службы 1979 г. стали складываться еще с 1970-х годов, когда в областях и республиках стали проводиться эксперименты по объединению контрольно-консультативных и производственно-снабженческих функций в одной структуре. Например, создание в 1974 г. Московского областного производственно-научного агрохимического объединения (Мособлагрохимобъединения), одновременно подчиненного Россельхозтехнике и подмосковным властям. Вполне успешный опыт этого объединения (рис. 8 и 9) стал тиражироваться по всей России. Аналогичные процессы происходили в других союзных республиках (кооперативные агрохимические центры в Молдавии, районные центры химизации на Украине и т.п.).

Однако в идею единой системы «Сельхозхимия» было изначально заложено серьезное противоречие: отсутствие независимости контролирующих органов. Вместе с обострившимся к рубежу 1980–1990-х годов общественному неприятию нерациональной химизации оно привело в 1991 г. к утрате агрохимслужбой производственной функции и её разделению с системой защиты растений. Несмотря на трудности постсоветского периода, большая часть центров и станций сохранила свое изначальное предназначение и подчинение. В 2023 г. агрохимическая служба России воссоздается как единое юридическое лицо, представленное на 2025 г. 7 филиалами и 99 учреждениями [16]. Кроме того, агрономы хозяйств имеют возможность консультироваться с производителями средств химизации.

Первым административным органом, курировавшим направление химизации, являлся созданный в декабре 1917 г. Высший совет народного хозяйства (ВСНХ). Постепенно число руководящих структур, занимавшихся данной тематикой, увеличилось. В 1928 г. по инициативе ряда крупных ученых (в том числе Д.Н. Прянишникова) создается особый правительственный Комитет по химизации народного хозяйства, занимавшийся и сельскохо-

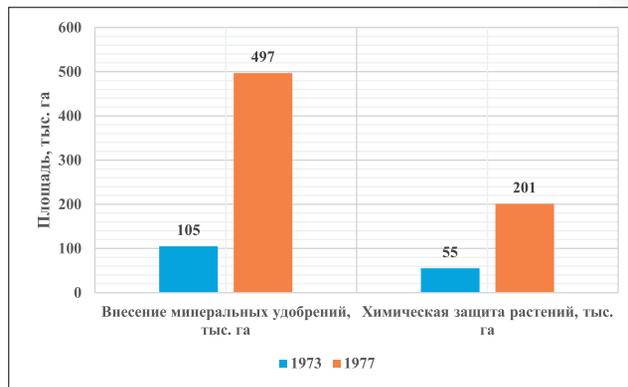


Рис. 8. Рост показателей агрохимического обслуживания в Московской области при введении новой организационной формы в 1970-х годах. Источник: ЦГАМО. Ф. 2703. Оп. 1. Д. 121.

Fig. 8. Expansion of agrochemical services in the Moscow Region following the introduction of a new organizational structure in the 1970s. Source: Central State Archive of the Moscow Region (TsGAMO), F. 2703, Op. 1, D. 121.

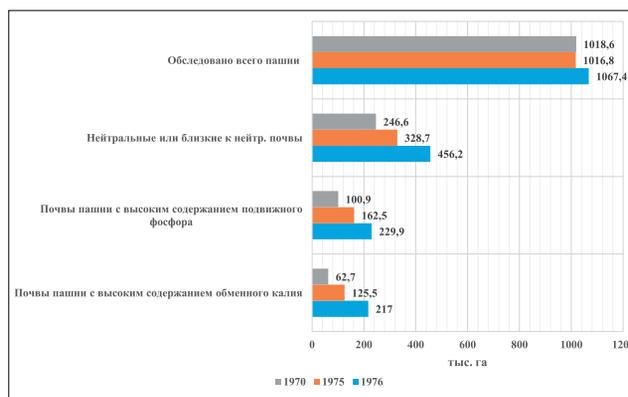


Рис. 9. Улучшение агрохимических характеристик почв Московской области после введения новой формы агрохимического обслуживания в 1970-х годах. Источник: ЦГАМО. Ф. 2703. Оп. 1. Д. 122.

Fig. 9. Improvement in the soil agrochemical properties in the Moscow Region following the introduction of a new form of agrochemical services in the 1970s. Source: Central State Archive of the Moscow Region (TsGAMO), F. 2703, Op. 1, D. 122

зяйственными проблемами [3]. С данным органом власти связано возникновение в нашей стране системы целевых научных выплат, ныне известных как гранты [17]. Однако постепенно этот комитет терял прежнюю значимость и в 1934 г. окончательно был упразднен. Одновременно химизация становилась предметом внимания высшего партийного руководства [18]. Это вызывалось комплексом обстоятельств: индустриализацией, тесной связью с оборонными нуждами, и, наконец, статусом химизации как всесоюзного идеологического проекта [3].

В 1948 г. был учрежден Государственный комитет Совета Министров СССР по внедрению передовой техники в народное хозяйство (Гостехника),

окончательно закрепившийся в системе управления как Государственный комитет СМ СССР по науке и технике (ГКНТ СССР) [19]. Занимаясь проблемами научно-технического прогресса страны, данный орган активно участвовал в развитии химизации.

В рамках управленческих реформ времен руководства страной Н.С. Хрущёва функции материально-технического обеспечения были переданы в 1961 г. из министерства сельского хозяйства в самостоятельное Всесоюзное объединение «Союзсельхозтехника». Оно было уполномочено не только снабжать, но и консультировать колхозы и совхозы по вопросам применения агрохимикатов и пестицидов. Позднее в структуре «Союзсельхозтехники» появились и производственные подразделения по химизации. В июле 1978 г. объединение было преобразовано в Государственный комитет (Госкомсельхозтехнику СССР). При этом сохранялась преемственность руководства – Комитет возглавил многолетний председатель «Союзсельхозтехники» А.А. Ежевский (рис. 10). В 1979 г. Госкомсельхозтехника передает почти все химизаторские функции вместе со значительной долей производственного потенциала в новую систему «Союзсельхозхимии».

В 1980 г. для усиления поддержки сельского хозяйства учреждается специальное Министерство по производству минеральных удобрений (Минудобрений) СССР. Оно просуществовало до 1989 г. и было преобразовано в Государственную агрохимическую ассоциацию, объединившую производство средств химизации со структурами «Союзсельхозхимии».

В 1985 г. предпринимается кардинальная реформа управления сельским хозяйством, связанная с попыткой объединить всю производственную цепочку в рамках единой системы Государственного агропромышленного комитета СССР [20]. Однако



Рис. 10. Первый председатель Госкомсельхозтехники СССР А.А. Ежевский (1915–2017)

Fig. 10. Ezhevsky, A.A. (1915–2017), the first Chairman of the USSR State Committee for Production and Technical Support of Agriculture

в конечном итоге в марте 1991 г. произошел возврат к традиционной министерской схеме.

Структура органов отраслевого управления постсоветской России до начала 2000-х годов была весьма изменчивой. Сегодня все основные организационные аспекты химизации находятся под общим руководством Министерства сельского хозяйства РФ, но разделены по разным структурам.

Выводы

Взаимодействие различных инфраструктурных составляющих химизации обеспечило становление научных школ, формирование мощной теоретической платформы и производственного задела, позволивших агропромышленному комплексу нашей страны добиваться впечатляющих показателей в советский период истории и заложить запас прочности на последующие годы. Достаточно отметить, что современная Россия вслед за СССР входит в число крупнейших производителей минеральных удобрений и является их важнейшим поставщиком на мировой рынок (хотя важнейшая задача увеличения доли внутреннего потребления до сих пор ждет своего решения).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ценч Ю.С. Научнотехнический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №2. С. 4–13. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
2. Налиухин А.Н., Торшин С.П. 95 лет отечественной агрохимии в Тимирязевке // *Агрохимический вестник*. 2023. №5. С. 96–98. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-5-017.
3. Ваганов А.Г. Информационное сопровождение и пропаганда химизации в СССР // *Управление наукой: теория и практика*. 2020. Т. 2. №2. С. 209–230. DOI: 10.19181/sntp.2020.2.2.10.
4. Ценч Ю.С. Подготовка новой генерации молодых исследователей в научных учреждениях // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023. №3. С. 3–8. DOI: 10.31857/S2500262723030018.
5. Торшин С.П., Наумов В.Д., Смолина Г.А. На заре становления учения об агрорудах (к 150-летию со дня рождения Я.В. Самойлова) // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2020. №3. С. 150–155. DOI: 10.26897/0021-342X-2020-3-150-155.
6. Титова В.И. Кочетков Вячеслав Петрович (к 150-летию со дня рождения) // *Плодородие*. 2021. №2. С. 68–70. DOI: 10.25680/S19948603.2021.119.18.
7. Шкуркин С.И., Шафран С.А., Налиухин А.Н. Становление и развитие Географической сети полевых опытов с удобрениями в России (к 80-летию Географической сети полевых опытов с удобрениями) // *Плодо-*

- родие. 2021. N3(120). С. 12-15. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.01.
8. Иванов А.Л., Апарин Б.Ф. Вехи истории (к 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева) // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2022. N112. С. 5-23. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-5-23.
 9. Лысов А.К., Корнилов Т.В. Развитие технологий и средств механизации для защиты растений в Российской Федерации // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N4. С. 100-108. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-100-108.
 10. Долженко В.И., Сухорученко Г.И., Лаптев А.Б. Развитие химического метода защиты растений в России // *Защита и карантин растений*. 2021. N4. С. 3-13. DOI: 10.47528/1026-8634_2021_4_3.
 11. Новиков Н.Н. Вехи истории ИТОСХ – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ // *Техническое обеспечение сельского хозяйства*. 2020. N1. С. 4-12. EDN: TTRNSI.
 12. Попов В.Д., Брюханов А.Ю. История агроинженерной науки в Санкт-Петербурге // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N1. С. 13-20. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-13-20.
 13. Чалов Р.В., Шальнев Ю.Б., Сафандеев В.В. Основоположник химии пестицидов. Памяти Николая Николаевича Мельникова (1908-2000) // *Агрохимия*. 2025. N5. С. 101-104. DOI: 10.31857/S0002188125050132.
 14. Рычков А.В. Научно-производственные объединения и научно-производственные системы в сельском хозяйстве Сибири в 1980-е гг. // *Вестник Томского государственного университета*. 2021. N464. С. 153-158. DOI: 10.17223/15617793/464/18.
 15. Осипов А.И., Комаров А.А., Суханов П.А. Исторические вехи агрохимической службы в России // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2024. N3(77). С. 156-165. DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-156-165.
 16. Бакуменко Л.С. Роль агрохимической службы России в мониторинге состояния плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения // *Международный журнал аграрной науки и образования*. 2025. N1(5). С. 29-33. EDN: RJTLSQ.
 17. Хрущева М.Л. Комитет по химизации народного хозяйства при СНК СССР – к 90-летию первых научных грантов в СССР // *Вопросы истории естествознания и техники*. 2020. Т. 41. N1. С. 69-101. DOI: 10.31857/S020596060008418-1.
 18. Рычков А.В. «Партия наша - это наука»: к вопросу о причинах и последствиях партийного вмешательства в сельскохозяйственную науку в Советском Союзе // *Вестник Томского государственного университета*. 2021. N472. С. 147-152. DOI: 10.17223/15617793/472/18.
 19. Рычков А.В. Вклад Государственного комитета СССР по науке и технике в развитие сельскохозяйственной науки // *Омский научный вестник. Сер.: Общество. История. Современность*. 2020. Т. 5. N1. С. 35-39. DOI: 10.25206/2542-0488-2020-5-1-35-39.
 20. Елизаров С.А. Система местных органов управления сельским хозяйством Белорусской ССР: централизация – децентрализация (1965-1991 гг.) // *Власть*. 2023. Т. 31. N4. С. 236-243. DOI: 10.31171/vlast.v31i4.9748.

REFERENCES

1. Tsench Yu.S. Scientific and technological potential as the main factor for agricultural mechanization development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
2. Naliukhin A.N., Torshin S.P. 95th anniversary of agrochemistry in Timiryazevka (to the 95th anniversary of the founding of the department of agrochemistry of the Timiryazev Academy). *Agrochemical Herald*. 2023. N5. 96-98 (In Russian). DOI: 10.24412/1029-2551-2023-5-017.
3. Vaganov A.G. Information support and promotion of chemistry in the USSR. *Science Management: Theory and Practice*. 2020. Vol. 2. N2. 209-230 (In Russian). DOI: 10.19181/smp.2020.2.2.10.
4. Tsench Yu.S. Creation of young researchers new generation in scientific institutions. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2023. N3. 3-8 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262723030018.
5. Torshin S.P., Naumov V.D., Smolina G.A. Early stages of the formation of teaching about agricultural ores (devoted to the 150 anniversary of Ya.V. Samoilov). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2020. N3. 150-155 (In Russian). DOI: 10.26897/0021-342X-2020-3-150-155.
6. Titova V.I. On the occasion of the 150th anniversary of V.P. Kochetkov. *Plodorodie*. 2021. N2. 68-70 (In Russian). DOI: 10.25680/S19948603.2021.119.18.
7. Shkurkin S.I., Shafran S.A., Naliukhin A.N. Formation and development of geographical network of field experiments with fertilizers in Russia (dedicated to 80th anniversary of Geographical Network of Field Experiments with fertilizers). *Plodorodie*. 2021. N3(120). 12-15 (In Russian). DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.01.
8. Ivanov A.L., Aparin B.F. Milestones of the history (to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute). *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2022. N112. 5-23 (In Russian). DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-5-23.
9. Lysov A.K., Kornilov T.V. Advancements in plant protection technologies and mechanization in the Russian Federation. *Agricultural Machinery and Technologies*. Vol. 18. N4. 100-108 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-100-108.
10. Dolzhenko V.I., Sukhoruchenko G.I., Laptiev A.B. Development of chemical method of plant protection in Russia. *Plant Protection and Quarantine*. 2021. N4. 3-13 (In Russian). DOI: 10.47528/1026-8634_2021_4_3.
11. Novikov N.N. Milestones in the history of ITSA – branch

- of FSAC VIM. *Technical Support of Agriculture*. 2020. N1. 4-12 (In Russian). EDN: TTRNSI.
12. Popov V.D., Bryukhanov A.Yu. History of agroengineering science in Saint Petersburg. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 13-20 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-13-20.
 13. Chalov R.V., Shalnev Yu.B., Safandeev V.V. Founder of pesticide chemistry – in memory of Nikolai Nikolaevich Melnikov (1908-2000). *Agricultural Chemistry*. 2025. N5. 101-104 (In Russian). DOI: 10.31857/S0002188125050132.
 14. Rychkov A.V. Scientific production associations and scientific production systems in the agriculture of Siberia. *Tomsk State University Journal*. 2021. N464. 153-158 (In Russian). DOI: 10.17223/15617793/464/18.
 15. Osipov A.I., Komarov A.A., Sukhanov P.A. Historical milestones of the Agrochemical Service in Russia. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2024. N3(77). 156-165 (In Russian). DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-156-165.
 16. Bakumenko L.S. The role of the Agrochemical Service of Russia in monitoring the soil fertility status of farmlands. *International Journal of Agrarian Science and Education*. 2025. N1(5). 29-33 (In Russian). EDN: RJTLSQ.
 17. Khrushcheva M. The Committee of chemicalization of national economy under the USSR Council of People's Commissars: in commemoration of the 90th anniversary of the first research grants in the USSR. *Studies in the History of Science and Technology*. 2020. Vol. 41. N1. 69-101 (In Russian). DOI: 10.31857/S020596060008418-1.
 18. Rychkov A.V. «Our Party is science»: on the causes and consequences of the Party's interference in agricultural science in the Soviet Union. *Tomsk State University Journal*. 2021. N472. 147-152 (In Russian). DOI: 10.17223/15617793/472/18.
 19. Rychkov A.V. Contribution of the USSR State Committee on Science and Technology to development of agricultural science. *Omsk Scientific Bulletin. Ser.; Society. History. Modernity*. 2020. Vol. 5. N1. 35-39 (In Russian). DOI: 10.25206/2542-0488-2020-5-1-35-39.
 20. Elizarov S.A. The system of local agricultural management bodies of the Byelorussian SSR: centralization-decentralization (1965-1991). *Vlast'*. 2023. Vol. 31. N4. 236-243 (In Russian). DOI: 10.31171/vlast.v31i4.9748.

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.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

27.06.2025
29.08.2025