

ISSN 2073-7599 (print)

ISSN 2618-6748 (online)

# Сельскохозяйственные машины и технологии

## AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Том 16 N 3 2022

Vol. 16 N 3 2022

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL



3 2022





НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций  
(РОСКОМНАДЗОР)  
Свидетельство ПИ № ФС77-68608  
от 3 февраля 2017 г.

Журнал включен в перечень изданий,  
рекомендованных ВАК РФ для публика-  
ции трудов соискателей ученых степе-  
ней кандидата и доктора наук

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,  
Л.А. Горелова,  
С.В. Гришуткина,  
Р.М. Нурбагандова

Перевод – Светлана Сорокина

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

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

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2022

Отпечатано в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ  
Формат 205 x 290 мм  
Подписано в печать 15.09.2022  
Тираж 500 экз.

# Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

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

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Андрей Юрьевич Измайлов**

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Яков Петрович Лобачевский** (ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА)

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, первый заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=369308](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=369308)

**Дорохов Алексей Семенович**

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

**Михаил Никитичевич Ерохин**

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

**Юрий Анатольевич Иванов**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства, г. Подольск, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=672993](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, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=365637](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=365637)

**Антонин Махалек**

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

**Владимир Дмитриевич Попов**

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

**Синьминь Лю**

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

**Жарылкасын Сарсембекович Садыков**

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

**Даврон Рустамович Норчаев**

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

**Юлия Сергеевна Ценч**

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

**Вячеслав Иванович Черноиванов**

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

**Роман Алексеевич Фандо**

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



## SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL

The journal is registered by  
Federal Agency for Supervision of  
Legislation Observance of Mass  
Communications Sphere and  
Cultural Heritage Protection  
Certificate ПИ No. ФЦ77-68608  
from February, 3, 2017

**The Journal is included in the  
list of peer-reviewed scientific  
publications recommended  
by the Higher Attestation  
Commission for publishing the  
research results from theses for  
Ph.D. and Dr.Sc. degrees.**

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.,  
Gorelova L.A.,  
Grishutkina S.V.,  
Nurbagandova R.M.  
Translation into English –  
Svetlana Sorokina

### EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

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

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

**Printed by FSAC VIM  
Russian Academy of Science**

The format is 205 × 290 mm  
The issue was submitted 15.09.2022  
The circulation is 500 copies

## [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, First Deputy Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 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; Director of the All-Russian Scientific and Research Institute of Livestock Mechanization, Podolsk, 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, Academician Secretary of Department of Agricultural Sciences at 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, 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

**МОБИЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА**

- Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Пастухов А.Г., Скорыходов Д.М., Логачев К.М.**  
Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации ..... 4

**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.  
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ**

- Альт В.В., Исакова С.П.**  
Планирование производства продукции растениеводства с применением цифровых технологий ..... 12

**ПОСЛЕУБОРОЧНАЯ ОБРАБОТКА  
ЗЕРНА И СЕМЯН**

- Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Добрицкий А.А.**  
Определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы ..... 20
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А.**  
Обоснование конструктивно-компоновочной схемы гравитационно-пневматического очистителя семян сои ..... 27

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ОБОРУДОВАНИЕ**

- Курбанов Р.К., Захарова Н.И.**  
Обоснование параметров полетного задания беспилотного воздушного судна для мультиспектральной аэрофотосъемки ..... 33
- Лебедева В.В., Лебедев И.В.**  
Алгоритмы расчета траекторий полета беспилотных воздушных судов для решения сельскохозяйственных задач ..... 40
- Казберов Р.Я., Тужилин С.П.**  
Качество упрочняющей пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники ..... 48

**ТЕХНИКА ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА**

- Беляков М.В., Никитин Е.А., Ефременков И.Ю.**  
Эффективность фотолуминесцентного метода контроля гомогенности кормовых смесей в животноводстве ..... 55
- Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Владимиров Ф.Е., Юрочка С.С.**  
Влияние субклинического и клинического мастита на процесс молокоотдачи коров ярославской породы ..... 62

**ТЕХНИКА ДЛЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА**

- Ракутько С.А., Ракутько Е.Н.**  
Портативный микропроцессорный колориметр для определения стабильности развития растений ..... 67
- Мирзаев М.А.**  
Разработка алгоритма роботизированного устройства точного внесения средств защиты растений ..... 74

**MOBILE ENERGY UNITS**

- Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Pastukhov A.G., Logachev K.M.**  
Deformation of precision parts in diesel fuel equipment during diffusion metallization ..... 4

**DIGITAL TECHNOLOGIES.  
ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

- Alt V.V., Isakova S.P.**  
Planning crop production with the use of digital technologies ..... 12

**POST-HARVEST PROCESSING  
OF SEEDS FOR GRAIN**

- Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Vol'vak S.F., Dobritskiy A.A.**  
Estimating Poisson's ratio and Young's modulus of the outer fruit shell of corn grain ..... 20
- Khamuev V.G., Gerasimenko S.A.**  
Substantiation of the design and layout scheme for the gravity-pneumatic soybean seed cleaner ..... 27

**INNOVATIVE TECHNOLOGIES  
AND EQUIPMENT**

- Kurbanov R.K., Zakharova N.I.**  
Justifying the parameters for an unmanned aircraft flight missions of multispectral aerial photography ..... 33
- Lebedeva V.V., Lebedev I.V.**  
Algorithms for calculating the trajectory of unmanned aerial vehicles for solving agricultural problems ..... 40
- Kazberov R.Ya., Tuzhilin S.P.**  
The quality of strengthening impregnation of 3D-printed parts for agricultural machinery .. 48

**EQUIPMENT FOR ANIMAL HUSBANDRY**

- Belyakov M.V., Nikitin E.A., Efremenko I.Yu.**  
Efficiency of the photoluminescent method for monitoring the homogeneity of feed mixtures in animal husbandry ..... 55
- Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Vladimirov F.E., Yurochka S.S.**  
Research into the influence of clinical and subclinical mastitis on the milk flow rate of the Yaroslavl breed cows ..... 62

**MACHINERY FOR PLANT GROWING**

- Rakutko S.A., Rakutko E.N.**  
Portable microcontroller-based colorimeter for determining plant development stability .... 67
- Mirzaev M.A.**  
Developing an algorithm for robotic precision application of crop protection products ..... 74

## Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации

Михаил Никитьевич Ерохин<sup>1</sup>,

академик РАН, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;

Сергей Павлович Казанцев<sup>1</sup>,

доктор технических наук, профессор,  
e-mail: kspts@bk.ru;

Александр Геннадиевич Пастухов<sup>2</sup>,

доктор технических наук, профессор,  
e-mail: pastuhov\_ag@bsaa.edu.ru;

Дмитрий Михайлович Скороходов<sup>1</sup>,

кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru;

Константин Михайлович Логачев<sup>1</sup>,

аспирант, e-mail: klogachyov@mail.ru

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

<sup>2</sup>Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Белгородская область, Российская Федерация

**Реферат.** Отметили, что износ рабочих поверхностей плунжера и втулки ухудшают экономические и экологические показатели дизельного двигателя. Указали на экономическую целесообразность восстановления работоспособности с повышением их износостойкости дорогостоящих плунжерных пар. Предложили решить эту задачу методом диффузионной металлизации, чтобы получить упрочняющие покрытия на основе карбидов, нитридов и боридов железа и легирующих элементов. (*Цель исследования*) Оценить влияние температурных режимов на деформацию плунжеров при диффузионном борировании. (*Материалы и методы*) В качестве параметров технологического процесса приняли: состав порошковой смеси, температуру и время выдержки, время охлаждения контейнеров, толщину покрытия, прогиб детали. Исследовали материалы: сталь 45, сталь ХВГ, сталь 25Х5МА после азотирования в среде диссоциированного аммиака на заводе-изготовителе топливной аппаратуры. (*Результаты и обсуждение*) Измерили толщину боридного слоя при 8-часовом борировании: 250; 215 и 170 микрон соответственно. Выявили, что каждые 2 часа процесса дают приращение слоя в среднем на 40 микрон. Измерили среднюю величину прогиба плунжеров, борированных 2 и 6 часов, после 8-часового охлаждения контейнеров: 9,8 и 12,7 микрон. Отметили, что увеличение скорости охлаждения контейнера усиливает коробление плунжеров до 35 микрон. Для равномерного прогрева рекомендовали использовать контейнеры, вмещающие не более 100 плунжеров. (*Выводы*) Выявили главную причину деформации (прогиба) плунжеров после диффузионной металлизации, которая заключается в релаксации внутренних напряжений в сердцевине детали в результате структурных изменений в стали. Установили, что минимальное время охлаждения контейнеров вместе с печью должно составлять не менее 8 часов, тогда прогиб не превышает 20 микрон. Достигли возможности уменьшить припуск на механическую обработку плунжера до 30 микрон. **Ключевые слова:** прецизионные детали, плунжерная пара, восстановление работоспособности изношенных плунжерных пар, диффузионная металлизация, упрочняющие покрытия, деформация плунжеров.

■ **Для цитирования:** Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Пастухов А.Г., Скороходов Д.М., Логачев К.М. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 4-11. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11. EDN DXVZBU.

## Deformation of Precision Parts in Diesel Fuel Equipment During Diffusion Metallization

Mikhail N. Erokhin<sup>1</sup>,

Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy of Sciences, e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;

Sergey P. Kazantsev<sup>1</sup>,

Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: kspts@bk.ru;

Alexander G. Pastukhov<sup>2</sup>,

Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: pastuhov\_ag@bsaa.edu.ru;

Dmitriy M. Skorokhodov<sup>1</sup>,

Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru;

Konstantin M. Logachev<sup>1</sup>,

Ph.D. student, e-mail: klogachyov@mail.ru

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

<sup>2</sup>Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin, Mayskiy, Belgorod region, Russian Federation

**Abstract.** The deterioration of the plunger working surfaces and sleeve worsens the economic and environmental performance of the diesel engine. Therefore, restoring the performance of worn plunger pairs with an increase in their wear resistance is economically feasible. The problem is proposed to be solved by the method of diffusion metallization to obtain hardening coatings based on iron carbides, nitrides and borides and alloying elements. (*Research purpose*) To evaluate the effect of temperature regimes on the deformation of the plungers during diffusion boriding. (*Materials and methods*) The following parameters of the technological process are accepted: the composition of the powder mixture, the temperature and exposure time, the cooling time of the containers, the thickness of the coating, the deflection of the part. The materials under research are 45steel, KhVG steel, 25Kh5MA steel after nitriding in dissociated ammonia at the fuel equipment manufacturer. (*Results and discussion*) The thickness of the boride layer obtained after 8-hour boriding is 250; 215 and 170 micrometers, respectively. It is found that every 2 hours of the process result in an average layer increment of 40 microns. The average deflection of the plungers, exposed to 2-hour and 6-hour boriding, is 9.8 and 12.7 micrometers after the 8-hour cooling of containers. It is found that an increase in the cooling rate of the container leads to an increase in the warping of the plungers up to 35 microns. For uniform heating, it is recommended to use containers containing no more than 100 plungers. (*Conclusions*) The main reason for the deformation (deflection) of plungers after diffusion metallization is detected to be the relaxation of internal stresses in the core of the part as a result of structural changes in the steel. It is established that the minimum cooling time of the containers together with the furnace should be at least 8 hours. In this case, the deflection does not exceed 20 micrometers. It has been made possible to reduce the allowance for mechanical processing of the plunger to 30 microns.

**Keywords:** precision parts, plunger pair, restoration of worn plunger pairs, diffusion metallization, hardening coatings, plunger deformation, microhardness.

■ **For citation:** Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Pastukhov A.G., Logachev K.M. Deformatsiya pretsizionnykh detaley toplivnoy apparatury dizeley pri vosstanovlenii metodom diffuzionnoy metallizatsii [Deformation of precision parts in diesel fuel equipment during diffusion metallization]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 4-11 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11. EDN DXVZBU.

Диффузионные покрытия на основе карбидов нитридов, боридов железа и легирующих элементов отличаются высокой износ- и коррозионной стойкостью. При относительно небольшой толщине упрочняющего покрытия они могут быть рекомендованы для восстановления прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей.

При восстановлении плунжерных пар методом порошковой диффузионной металлзации карбидохромовыми, хромонитридными или железоборидными покрытиями для упрощения технологии и улучшения качества механической обработки предпочтительнее наносить покрытие на плунжер [1, 2]. Эта деталь имеет меньшие размеры и более доступные наружные поверхности. Отверстие втулки можно подвергать только механической обработке до выведения следов износа.

Увеличение диаметра плунжера должно быть достаточным для компенсации износа направляющих поверхностей втулки и плунжера, припуска на механическую обработку с учетом перешлифовки плунжеров в другие группы и коробления после диффузионной металлзации [3, 4]:

$$\Delta d = 2(I_{вт} + I_{пл}) + \Pi_{вт} + \Pi_{пл} + 2f, \quad (1)$$

где  $\Delta d$  – необходимое увеличение диаметра плунжера, мм;

$I_{вт}, I_{пл}$  – величина наибольшего местного износа направляющей поверхности втулки и плунжера, мм;

$\Pi_{вт}, \Pi_{пл}$  – припуск на механическую обработку деталей плунжерной пары, мм;

$f$  – прогиб (деформация) плунжера, мм.

Следует учитывать, что увеличение толщины покрытий более 150 мкм, имеющих микротвердость в пределах 14 000–19 000 МПа, приводит к образованию трещин. Это ограничивает применение диффузионных покрытий как метода восстановления плунжерных пар топливных насосов высокого давления. Поэтому актуальна разработка технологических мероприятий по снижению прогиба плунжера после диффузионной металлзации.

Известно, что наибольшей деформации при химико-термической обработке подвергаются длинные тонкие стержни. Прогиб плунжеров при температуре диффузионной металлзации, достигающей 1180°C, практически неизбежен и в ряде случаев может привести к неисправимому браку.

Причина прогиба – в градиенте температуры от поверхности к сердцевине изделия из-за высокой скорости и неравномерности нагрева и охлаждения садки в электрической печи. Это приводит к неодновременному расширению внешних и внутренних объемов металла из-за структурных изменений [5–7]. При нагреве плунжеров происходит значительное сниже-

ние модуля упругости сердцевины, что вызывает релаксацию внутренних напряжений. Структурные изменения влияют на удельный объем в стальных изделиях [8-11].

К числу факторов, увеличивающих коробление, относится различие физико-механических свойств на границе «покрытие – плунжер», в том числе различие коэффициентов линейного расширения [13-15]. В нашем случае плунжеры имеют осесимметричную форму, что при равномерном нанесении упрочняющего покрытия и оптимальных скоростях нагрева и охлаждения должно способствовать уравниванию изгибающих моментов.

На величину коробления плунжеров при порошковых методах диффузионной металлизации влияют также способ упаковки и их расположение в контейнере.

Использование способов восстановления деталей с помощью диффузионной металлизации лимитирует число восстанавливаемости любых прецизионных деталей, в том числе и игл распылителя форсунок. Их восстановление возможно, если толщина диффузионного слоя больше величины прогиба деталей, возникшего из-за высокотемпературной термообработки [16, 17].

Прогиб плунжера – причина разнотолщинности упрочняющего покрытия после шлифования (рис. 1). В случае значительного прогиба плунжера  $f$  с радиусом кривизны  $R$  при последующей механической обработке возможно появление зон со снятым упрочняющим слоем  $\Delta_{\min} \leq 0$ .

Устранить прогиб возможно путем увеличения толщины  $\Delta_{\max}$  наносимого покрытия до значений, превышающих величину самого прогиба  $f$ . Последующая механическая обработка плунжеров на бесцентровых шлифовальных станках устраняет прогиб вследствие уменьшения толщины нанесенного износостойкого слоя.

Кроме того, после применения механической обработки появляется смещение оси прецизионной детали  $\Delta r$ . Это особенно критично для иглы распылителя форсунки. Возникает биение иглы в корпусе распылителя из-за несоосности запирающего конуса иглы с запирающим гнездом корпуса распылителя, наблюдается неперпендикулярность торца иглы к торцу форсунки. Таким образом, при восстановлении распылителей форсунок биение запирающего гнезда корпуса и конуса иглы взаимосвязано с разнотолщинностью  $\Delta_{\min}$  и  $\Delta_{\max}$ .

При диффузионных методах получения упрочняющего покрытия наибольшая величина микротвердости всегда наблюдается с поверхности. Например, диффузионный слой на основе карбидов хрома в поверхностной зоне имеет наибольшую концентрацию хрома и полезные сжимающие напряжения. Поэтому при механической обработке удаляется наиболее эф-

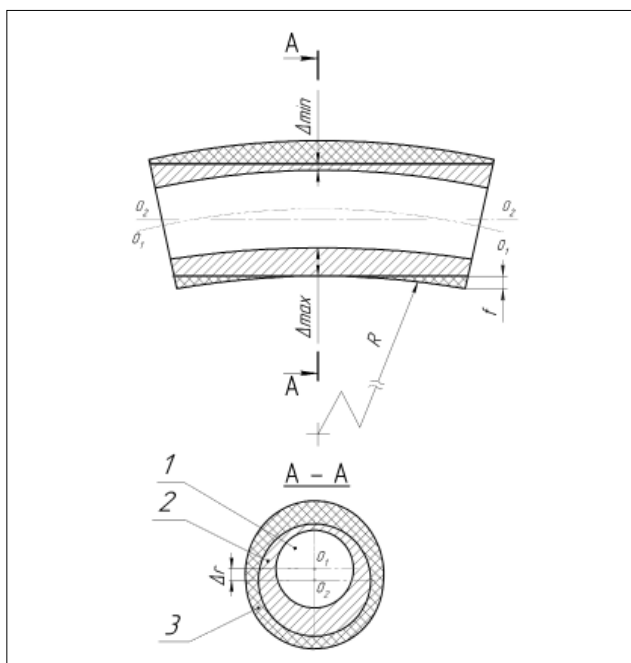


Рис. 1. Прогиб плунжера и разнотолщинность упрочняющего покрытия после шлифования: 1 – плунжер; 2 – упрочняющее покрытие после шлифования; 3 – припуск на шлифование;  $f$  – прогиб плунжера, мм;  $R$  – радиус кривизны, мм;  $\Delta_{\max}$ ,  $\Delta_{\min}$  – максимальная и минимальная толщина покрытия, мм;  $O_1$ ,  $O_2$  – ось вращения, соответственно после диффузионной металлизации и шлифования;  $\Delta r$  – ось смещения, мм

Fig. 1. Plunger deflection and thickness variation of hardening coating after grinding: 1 – plunger; 2 – hardening coating after grinding; 3 – allowance for grinding;  $f$  – plunger deflection, mm;  $R$  – curvature radius, mm;  $\Delta_{\max}$ ,  $\Delta_{\min}$  – maximum and minimum coating thickness, mm;  $O_1$ ,  $O_2$  – axis of rotation, after diffusion plating and grinding, respectively;  $\Delta r$  – displacement axis, mm

фективная по износо- и коррозионной стойкости часть диффузионного слоя. Микротвердость покрытия зависит от толщины диффузионного слоя (рис. 2).

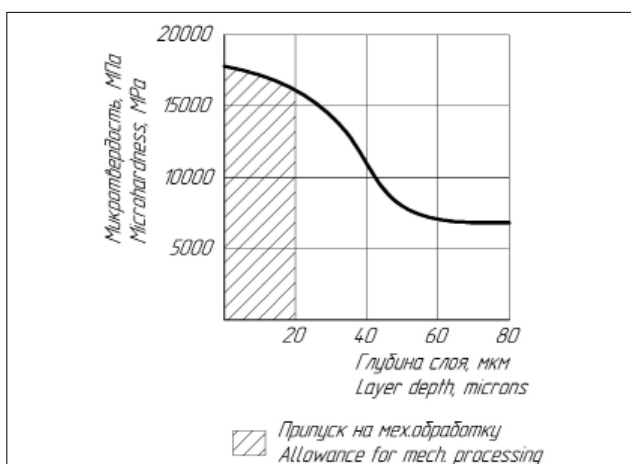


Рис. 2. Изменение микротвердости по глубине диффузионного слоя на стали ХВГ

Fig. 2. Change in microhardness by the depth of the diffusion layer on KhVG steel

Механическая обработка при устранении коробления удаляет самый твердый слой покрытия. Чем больше припуск, тем ниже микротвердость оставшегося покрытия. Чем выше температура нанесения износостойких покрытий, тем заметней изменения в кристаллической решетке металла и больше прогиб прецизионных деталей. Главная причина прогиба связана с воздействием температуры и одновременным тепловым расширением внешних и внутренних объемов металла при нагреве и охлаждении. Прогиб по этой причине неизбежен и необратим. Однако на его величину можно влиять, изменяя температуру нагрева и скорость охлаждения.

Таким образом, можно уменьшить несоосность прецизионных деталей топливной аппаратуры, разнотолщинность упрочняющего диффузионного покрытия и его различную поверхностную твердость.

Влияние перечисленных факторов будет минимальным, если изменить температуру процесса, скорость нагрева и охлаждения деталей, схему упаковки контейнеров и т.д.

**Цель исследования** – оценить влияние температурных режимов на деформацию плунжеров при диффузионном борировании.

**Материалы и методы.** Диффузионное упрочняющее покрытие получали методом борирования порошковым методом в электрической печи сопротивления СНОЛ-1,6.2,5.1/9 в контейнерах с плавким затвором. Температурно-временной режим поддерживался автоматически с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Состав смеси, % (по массе): 65%  $\text{B}_4\text{C}$ , 35%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Эксперименты по определению толщины диффузионного слоя в зависимости от времени насыщения проводили на образцах из стали 45, стали 25Х5М и ХВГ диаметром 8 мм с чистотой поверхности Ra 0,1 мкм. Температура диффузионного борирования составляла  $980^\circ\text{C}$ , время выдержки – 2; 4; 6 и 8 ч.

Микрошлифы опытных образцов изготавливали по методике в соответствии с ГОСТ 1778 (ИСО 4967-79). Толщину диффузионного боридного слоя определяли на микроскопе ПМТ-3.

Исследования по определению прогиба проводились на плунжерах, имеющих соотношение длины цилиндрической поверхности к ее диаметру 7:1.

Плунжеры подвешивали в вертикальном положении в кассетах и устанавливали в контейнер, изготовленный из жаропрочной стали 18ХГТ (рис. 3). Все засыпали порошковой смесью. Рабочее пространство изолировали асбестовой прокладкой и слоем измельченной натрий-силикатной глыбы для создания плавкого затвора. Контейнер закрывается стальной крышкой.

Эксперименты проводили в трех партиях по 50 деталей при различных режимах выдержки и охлаждения (таблица, рис. 4).

Контейнеры № 1 и № 2 после диффузионного бо-

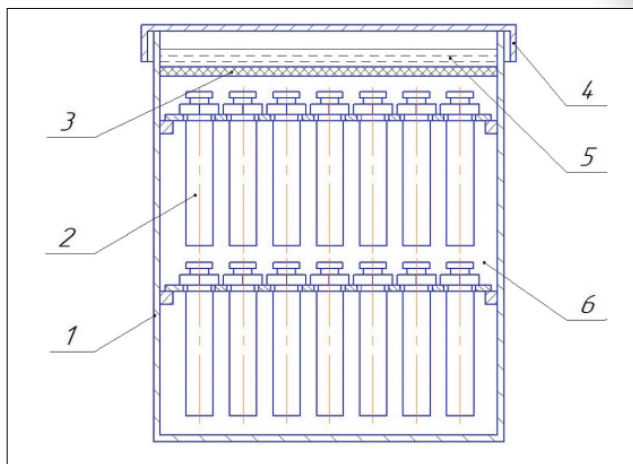


Рис. 3. Схема упаковки контейнера: 1 – контейнер; 2 – плунжеры; 3 – прокладка асбестовая; 4 – крышка; 5 – затвор плавкий; 6 – смесь порошковая

Fig. 3. Container packing diagram: 1 – container; 2 – plungers; 3 – asbestos gasket; 4 – cap; 5 – flat shutter; 6 – powder mixture

| Таблица<br>РЕЖИМЫ ДИФфуЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ<br>MODES OF DIFFUSION BORATION |                                                                                           |                                       |                                        |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
| №                                                                          | Температура<br>борирования, $^\circ\text{C}$<br>Boration<br>temperature, $^\circ\text{C}$ | Время выдержки, ч<br>Exposure time, h | Время охлаждения, ч<br>Cooling time, h |
| 1                                                                          | 980                                                                                       | 2                                     | 8                                      |
| 2                                                                          | 980                                                                                       | 6                                     | 8                                      |
| 3                                                                          | 980                                                                                       | 6                                     | 2                                      |

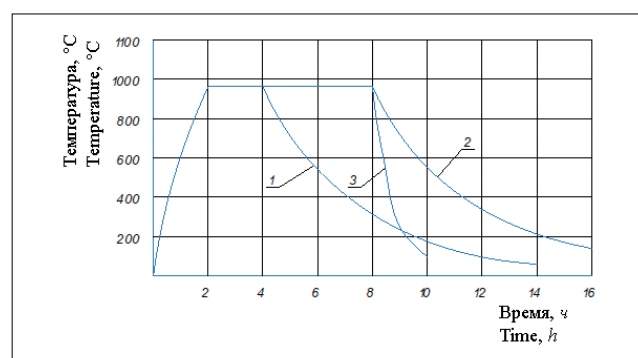


Рис. 4. Режимы нагрева, выдержки и охлаждения контейнеров  
Fig. 4. Modes of heating, holding and cooling of containers

рирования охлаждали вместе с печью. Контейнер № 3 охлаждали на воздухе.

Для определения температуры внутри контейнеров применяли вольфрам-рениевые термопары, которые вставляли через керамические трубки.

После распаковки контейнеров и очистки деталей стрелу прогиба  $f$  измеряли на призмах-ножах с ис-

пользованием индикаторной головки МИГ-1 с ценой деления 0,001 мм.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Из теории упругости известно, что действие внутренних напряжений вызывает упругое удлинение и изгиб цилиндрического стержня (рис. 5).

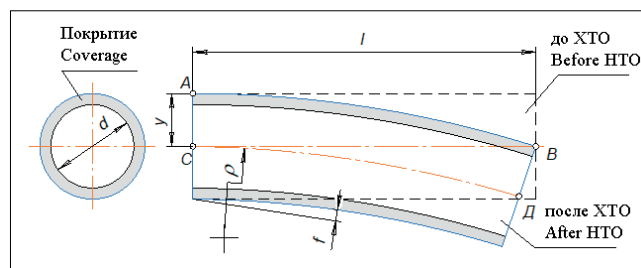


Рис. 5. Схема деформации (прогиба) цилиндрической детали после химико-термической обработки

Fig. 5. Diagram of a cylindrical part deformation (deflection) after chemical-thermal treatment

Кривизну цилиндрической детали определяли по формуле:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{y\sigma(1-\mu)}{E}, \quad (2)$$

где  $y$  – расстояние от поверхности детали АВ до нейтрального слоя СД, мм;

$\rho$  – радиус кривизны нейтрального слоя, мм;

$\sigma$  – напряжения в стальном изделии, вызывающие изгибающий момент, МПа;

$E$  – модуль упругости стали, МПа;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Известно, что наибольшее напряжение при изгибе возникает на поверхности цилиндрического изделия, то есть на расстоянии, равном радиусу:

$$y_{\max} = \frac{d}{2}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр стержня, мм.

Тогда выражение (2) примет вид:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2\sigma(1-\mu)}{Ed}. \quad (4)$$

Прогиб  $f$  на заданной длине  $l$  можно определить по формуле:

$$f \approx \frac{l^2}{8\rho}. \quad (5)$$

Окончательно на основе положения теории упругости получим уравнение для определения прогиба (коробления) плунжера:

$$f = \frac{l^2\sigma(1-\mu)}{4Ed}. \quad (6)$$

Внутренние напряжения – главная причина прогиба плунжеров, при прочих равных условиях прямо

пропорционального квадрату длины и обратно пропорционального диаметру и модулю упругости стали [2, 18, 19].

Таким образом, уменьшение внутренних напряжений в плунжерах после диффузионной металлизации будет способствовать уменьшению прогиба. Необходимо определить влияние толщины упрочняющего покрытия и скорости охлаждения деталей на величину прогиба.

Толщина боридного слоя (покрытия) на стали марок 45, 25Х5МА и ХВГ изменяется в зависимости от времени диффузионного насыщения при температуре 980°C (рис. 6). Из стали ХВГ изготавливают плунжерные пары 4УТНМ-1111410-01 (НЗТА).

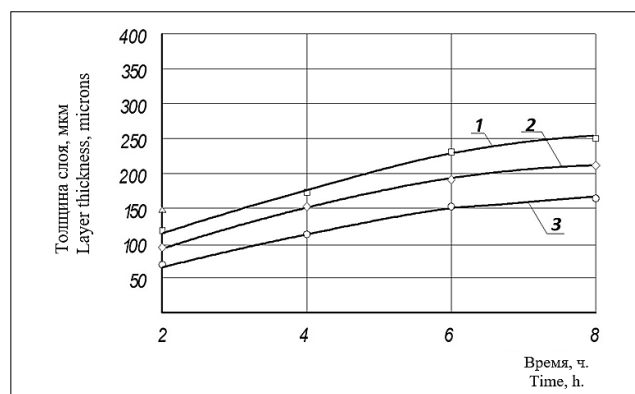


Рис. 6. Зависимость толщины боридного слоя от времени насыщения (при 980°C): 1 – сталь 45; 2 – сталь 25Х5МА; 3 – сталь ХВГ

Fig. 6. Dependence of the boride layer thickness on the saturation time (980°C): 1 – steel 45; 2 – 25X5MA steel; 3 – HVG steel

Кривые имеют параболический характер. Толщина боридного слоя после 8 ч борирования составляет, соответственно, 250, 215 и 170 мкм. Каждые 2 ч процесса дают приращение слоя в среднем на 40 мкм.

Распределение прогиба плунжеров Н01.111150 из стали 25Х5М (ЯЗДА) после процесса диффузионного борирования зависит от режима выдержки и охлаждения (рис. 7).

Анализ результатов измерений прогиба деталей показал, что увеличение времени выдержки диффузионного борирования не оказывает существенного влияния на его величину. Это можно объяснить большим соотношением толщины диффузионного слоя к диаметру плунжера.

Средняя величина прогиба плунжеров, борированных 2 и 6 ч, после охлаждения контейнеров в течение 8 ч составляет 9,8 и 12,7 мкм, а максимальная достигает 20 мкм. Увеличение скорости охлаждения контейнера усиливает коробление плунжеров до 35 мкм.

Таким образом, припуск на механическую обработку плунжера можно нивелировать на величину  $2\Delta f$ , то есть на 30 мкм, что позволит уменьшить раз-

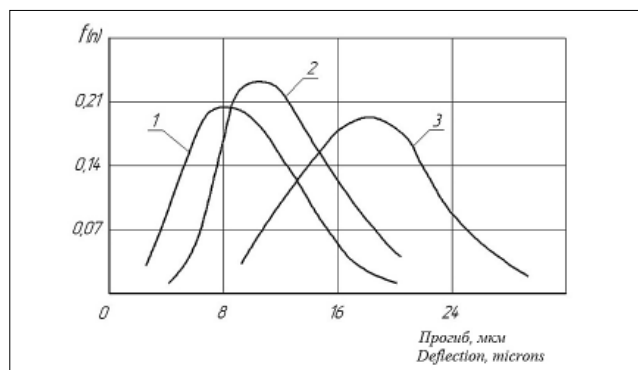


Рис. 7. Распределение прогиба плунжеров после борирования (при 980 °С): 1 – выдержка 2 ч, охлаждение 8 ч; 2 – выдержка 6 ч, охлаждение 8 ч; 3 – выдержка 6 ч, охлаждение 2 ч  
Fig. 7. Distribution of plunger deflection after boration (treatment temperature – 980 °С): 1 – exposure 2 h, cooling 8 h; 2 – exposure 6 h, cooling 8 h, 3 – exposure 6 h, cooling 2 h

нотолщинность упрочняющего покрытия после шлифования и улучшить его качество. Минимальное время охлаждения контейнеров вместе с печью должно составлять не менее 8 ч.

Для равномерного прогрева следует использовать контейнеры, вмещающие не более 100 плунжеров.

### Выводы

1. Главная причина деформации (прогиба) плунжеров после диффузионной металлизации заключается в релаксации внутренних напряжений в сердцевине детали в результате структурных изменений в стали.

2. Величина прогиба зависит от скорости охлаждения деталей. Максимального значения она достигает 35 мкм при охлаждении контейнеров на воздухе в течение 2 ч.

3. Рекомендуемое время охлаждения контейнеров при диффузионной металлизации в порошках должно составлять не менее 8 ч вместе с печью. В этом случае прогиб не превышает 20 мкм, то есть разница  $\Delta f$  с временем охлаждения 2 ч составит 15 мкм.

4. Припуск на механическую обработку плунжера можно сократить на величину  $2\Delta f$ , то есть на 30 мкм. Это позволит уменьшить разнотолщинность упрочняющего покрытия после шлифования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л. Формирование износостойких покрытий на прецизионных узлах трения // *Металлообработка*. 2011. N3. С. 14-17.
2. Козинцев Н.П. Упрочнение плунжерных пар топливных насосов высокого давления // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2016. N11-4. С. 16-18.
3. Ерохин М.Н., Казанцев С.П. Диффузионные покрытия в ремонтном производстве. М.: Минсельхоз РФ, МГАУ им. В.П. Горячкина. 2006. 124 с.
4. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятков Н.Н. Технологическое оснащение процесса получения металлических покрытий CVD-методом металлоорганических соединений // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина"*. 2018. N6(88). С. 40-44.
5. Лялякин В.П. Восстановление деталей машин в агропромышленном комплексе. Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса. Коллективная монография. Под редакцией В.В. Окоркова. Иваново. 2019. С. 254-258.
6. Erokhin M., Pastukhov A., Golubev I., Kazantsev S. Theoretical basis of justification of electromechanical hardening modes of machine parts. *Engineering for Rural Development*. 2020. N19. 147-152.
7. Лялякин В.П., Костюков А.Ю., Даниличев И.И. Восстановление нижней головки "колотых" шатунов // *Технический сервис машин*. 2021. N4(145). С. 111-118.
8. Лебедев А.Т., Лебедев П.А. Восстановление работоспособности плунжерных пар // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2010. N1. С. 23-24.
9. Лебедев А.Т., Болотоков А.Л., Лебедев П.А. Повышение долговечности распылителей форсунок автотракторных дизелей // *Вестник АПК Ставрополя*. 2018. N2(30). С. 34-37.
10. Лебедев А.Т., Лебедев П.А., Губжиков Х.Л., Болотоков А.Л. Улучшение показателей эффективности использования энергетических средств с дизельными двигателями модернизацией распылителей форсунок // *Наука в центральной России*. 2018. N5(35). С. 71-77.
11. Лебедев А.Т., Лебедев П.А., Васин В.А. Повышение эффективности работы топливной аппаратуры дизельных двигателей // *Трактора и сельхозмашины*. 2011. N7. С. 43-45.
12. Denisov V.A., Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Mishina Z.N., Ilmukhametov A.F. Justification of the permissible values system of machine parts parameters during their technical service. *AIP Conference Proceedings*. 2021. 2402. 070042.
13. Катаев Ю.В., Малыха Е.Ф., Вялых Д.Г. Организация технического сервиса машинно-тракторного парка на региональном уровне // *Наука без границ*. 2017. N11(16). С. 60-64.
14. Семенова Е.Е., Борисов Г.А., Миронов В.В. Повышение ресурса прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры нанесением на их поверхность гальванозофазного хрома: Монография. Рязань: РГТУ им. П.А. Костычева. 2011. 172 с.
15. Болотоков А.Л. Исследование влияния технического состояния распылителя на работоспособность форсунки дизеля // *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*. 2011. N1. С. 23-24.

ственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2019. N3(25). С. 73-77.

16. Васильев А.Е., Голубев И.Г. Инновационные технологии для восстановления деталей к зарубежной сельскохозяйственной технике // *Труды ГОСНИТИ*. 2015. Т. 118. С. 176-179.
17. Саматов З.А., Шарифуллин С.Н., Адигамов Н.Н., Адигамов Н.Н. Высокоэффективные технологии в восстановлении и упрочнении ответственных элементов машин и механизмов // *Современные проблемы науки и об-*

разования. 2014. N3. С. 22-29.

18. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., Kravchenko I.N., Kuznetsov Y.A. Properties of Wear-Resistant Composite Coatings Produced by High-Speed Boronizing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022. N51(2). 134-142.
19. Lyalyakin, V.P., Slinko, D.B. Active Control of the Inside Diameter of Diesel Engine Cylinder Liners during Their Honing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. N13. 1623-1626.

## REFERENCES

1. Leont'ev L.B., Shapkin N.P., Leont'ev A.L. Formirovanie iznosostoykikh pokrytiy na pretsizionnykh uzlakh treniya [Formation of wear-resistant coatings on precision friction units]. *Metalloobrabotka*. 2011. N3. 14-17 (In Russian).
2. Kodintsev N.P. Uprochnenie plunzhernykh par toplivnykh nasosov vysokogo davleniya [Hardening of plunger pairs of high pressure fuel pumps]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2016. N11-4. 16-18 (In Russian).
3. Erokhin M.N., Kazantsev S.P. Diffuzionnye pokrytiya v remontnom proizvodstve [Diffusion coatings in the repair industry]. Moscow: Minсель'khoz RF, MGAU named after V.P. Goryachkin. 2006. 124 (In Russian).
4. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Tekhnologicheskoe osnashchenie protsessa polucheniya metallicheskiy pokrytiy CVD-metodom metalloorganicheskikh soedineniy [Technological equipment for obtaining metal coatings by decomposing metalorganic compounds with cvd method]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet named after V.P. Goryachkin"*. 2018. N6(88). 40-44 (In Russian).
5. Lyalyakin V.P. Vosstanovlenie detaley mashin v agropromyshlennom komplekse. Sovremennye tendentsii v nauchnom obespechenii agropromyshlennogo kompleksa. Kollektivnaya monografiya [Restoration of machine parts in the agro-industrial complex. Modern trends in the scientific support of the agro-industrial complex. Collective monograph]. Edited by V.V. Okorkov. Ivanovo: 2019. 254-258 (In Russian).
6. Erokhin, M., Pastukhov, A., Golubev, I., Kazantsev, S. Theoretical basis of justification of electromechanical hardening modes of machine parts. *Engineering for Rural Development*. 2020. N19. 147-152 (In English).
7. Lyalyakin V.P., Kostyukov A.Yu., Danilichev I.I. Vosstanovlenie nizhney golovki "kolotykh" shatunov [Restoration of the lower head of "chipped" connecting rods]. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2021. N4(145). 111-118 (In Russian).
8. Lebedev A.T., Lebedev P.A. Vosstanovlenie rabotosposobnosti plunzhernykh par [Restoration of plunger pairs]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2010. N1. 23-24 (In Russian).
9. Lebedev A.T., Bolotokov A.L., Lebedev P.A. Povyshenie dolgovechnosti raspyliteley forsunok avtotraktornykh dizeley [Increase of durability of injector nozzles automotive diesel engines]. *Vestnik APK Stavropol'ya*. 2018. N2(30). 34-37 (In Russian).
10. Lebedev A.T., Lebedev P.A., Gubzhokov H.L., Bolotokov A.L. Uluchshenie pokazateley effektivnosti ispol'zovaniya energeticheskikh sredstv s dizel'nyimi dvigatelyami modernizatsiy raspyliteley forsunok [Improvement of indicators of efficiency of use energy products with diesel engines with the help modernization of sprayers nozzles]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2018. N5(35). 71-77 (In Russian).
11. Lebedev A.T., Lebedev P.A., Vasin V.A. Povyshenie effektivnosti raboty toplivnoy apparatury dizel'nykh dvigateley [Improving the efficiency of fuel injection equipment of diesel engines]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2011. N7. 43-45 (In Russian).
12. Denisov V.A., Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Mishina Z.N., Ilmukhametov A.F. Justification of the permissible values system of machine parts parameters during their technical service. *AIP Conference Proceedings this link is disabled*. 2021. 2402. 070042 (In English).
13. Kataev Yu.V., Malykha E.F., Vyalykh D.G. Organizatsiya tekhnicheskogo servisa mashinno-traktornogo parka na regional'nom urovne [Organization of technical service of the machine and tractor fleet at the regional level]. *Nauka bez granits*. 2017. N11(16). 60-64 (In Russian).
14. Semenova E.E., Borisov G.A., Mironov V.V. Povyshenie resursa pretsizionnykh detaley dizel'noy toplivnoy apparatury naneseniem na ikh poverkhnost' gal'vanogazofaznogo khroma: Monografiya [Increasing the precision part durability of diesel fuel equipment by applying galvanic-gas-phase chromium to their surface: Monograph]. Ryazan': RGATU named after P.A. Kostychev. 2011. 172 (In Russian).
15. Bolotokov A.L. Issledovanie vliyaniya tekhnicheskogo sostoyaniya raspylitelya na rabotosposobnost' forsunki dizelya [A study of the influence of the technical condition of the sprayer on the performance of diesel injectors]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta named after V.M. Kokov*. 2019. N3(25). 73-77 (In Russian).
16. Vasil'ev A.E., Golubev I.G. Innovatsionnye tekhnologii dlya vosstanovleniya detaley k zarubezhnoy sel'skokhozyaystvennoy tekhnike [Innovative technologies for the restoration of



- parts for foreign agricultural machinery]. *Trudy GOSNITI*. 2015. Vol. 118. 176-179 (In Russian).
17. Samatov Z.A., Sharifullin S.N., Adigamov N.N., Adigamov N.N. Vysokoeffektivnye tekhnologii v vosstanovlenii i uprochnenii otvetstvennykh elementov mashin i mekhanizmov [High technology restoration and strengthening of critical components machines and mechanisms]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. N3. 22-29 (In Russian).
18. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., Kravchenko I.N.,

Kuznetsov Y.A. Properties of Wear-Resistant Composite Coatings Produced by High-Speed Boronizing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022. N51(2). 134-142 (In English).

19. Lyalyakin, V.P., Slinko, D.B. Active Control of the Inside Diameter of Diesel Engine Cylinder Liners during Their Honing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. N13. 1623-1626 (In English).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Ерохин М.Н. – научное руководство, формулирование основных целей и задач экспериментальных исследований, доработка текста;

Казанцев С.П. – формулирование основных направлений и обоснование актуальности исследования, постановка проблемы, подготовка начального варианта статьи, доработка текста;

Пастухов А.Г. – формирование общих выводов, доработка текста и литературный анализ;

Скороходов Д.М. – обработка полученных результатов экспериментальных исследований, построение графиков, итоговая переработка статьи;

Логачев К.М. – подготовка и проведение экспериментальных исследований, построение графиков, редактирование и оформление материалов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Erokhin M.N. – scientific guidance, formulating the main goals and objectives of experimental research, the manuscript revision;

Kazantsev S.P. – formulation of the main research concepts, substantiation of the research relevance, problem statement, preparation of the manuscript initial version, the manuscript revision;

Pastukhov A.G. – formation of general conclusions, the manuscript revision and literature review;

Skorokhodov D.M. – processing the experimental study results obtained, plotting, the manuscript final revision;

Logachev K.M. – preparing and conducting the experimental studies, plotting, proofreading.

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

16.05.2022  
02.09.2022

## Планирование производства продукции растениеводства с применением цифровых технологий

Виктор Валентинович Альт<sup>1,2</sup>,  
доктор технических наук, профессор,  
академик РАН, e-mail: altviktor@ngs.ru;

Светлана Павловна Исакова<sup>1</sup>,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: isakova.s.p@yandex.ru

<sup>1</sup>Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, г. Краснообск, Новосибирская область, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что сельскохозяйственное производство связано с территориальной распределенностью, многовариантностью агротехнологий, изменчивостью климатических условий, большими объемами разнообразной информации, сложными алгоритмами принятия стратегических и тактических решений. Отметили, что решение задачи по планированию производства заключается в систематизации и структурировании информации о технологических операциях, определении признаков и формировании параметров для выбора (корректировки) технологии, в моделировании сельскохозяйственного технологического процесса, создании автоматизированного информационного сопровождения. Подчеркнули актуальность привлечения современной компьютерной техники и передовых цифровых технологий ввода и обработки больших объемов информации, визуализации результатов. (*Цель исследования*) Разработать программно-технологическое обеспечение, позволяющее подобрать варианты технологий, адаптированных к условиям конкретного хозяйства. (*Материалы и методы*) Программное обеспечение тестировали на примере южно-таежно-лесной зоны Новосибирской области. Изучили процесс выбора технологий, рассмотрели совокупность технологий обработки почв при возделывании зерновых культур, обеспечивающих минимизацию воздействия на урожай лимитирующих факторов. По результатам оценки выделили постоянные и переменные факторы. Использовали информационные и аналитические методы анализа материалов, системный подход, методологии разработки программного обеспечения. (*Результаты и обсуждение*) С помощью программного модуля сформировали два варианта технологий, адаптированных к природным и производственным условиям хозяйства. В качестве исходного материала для подбора вариантов приняли регистры технологических операций и условия применения. (*Выводы*) Разработали программный модуль, который позволяет подобрать агротехнологии на основе тщательного учета и оперативной обработки информации, характеризующей конкретные условия хозяйства, что дает возможность повысить эффективность управления производством продукции растениеводства и конкурентоспособность сельхозпредприятия.

**Ключевые слова:** цифровизация, планирование работ, выбор технологий, программный комплекс, адаптированные технологии, природные и производственные условия хозяйства.

■ **Для цитирования:** Альт В.В., Исакова С.П. Планирование производства продукции растениеводства с применением цифровых технологий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 12-19. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-12-19. EDN FOPWFU.

## Planning Crop Production with the Use of Digital Technologies

Viktor V. Alt<sup>1,2</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy  
of Sciences, e-mail: altviktor@ngs.ru;

Svetlana P. Isakova<sup>1</sup>,  
senior researcher,  
e-mail: isakova.s.p@yandex.ru

<sup>1</sup>Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technology of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russian Federation;

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract.** Agricultural production is shown to be associated with land distribution, variety of agricultural technologies, climatic variability, information diversity, complex algorithms for strategic and tactical decision making. It was noted that the solution to the problem of production planning implies systematizing and structuring the information about technological operations,

identifying features and working out parameters for technology selection (adjustment), modeling the agricultural technological process, and the creation of automated information support. The emphasis is placed on the relevance of using modern computers and advanced digital technologies for entering and processing large amounts of information, and visualization of results. (*Research purpose*) To develop software and technological support enabling the selection of options for technologies adjusted to a particular farm conditions. (*Materials and methods*) The software was tested in a case of the southern taiga-forest zone of the Novosibirsk region. The process of choosing technologies was studied when cultivating grain crops. A complex of tillage technologies was considered for grain crop cultivation, which ensures minimizing the impact of limiting factors on the yield. Based on the assessment results, invariable and variable factors were identified. The methods used are as follows: information and analytical analysis of materials, a systematic approach, and software development methodologies. (*Results and discussion*) With the help of the software module, technology options were developed being adjusted to the natural and production conditions of the economy. Registers for technological operations and application conditions were taken as the source material for the formation of options. Two options for selecting technologies were obtained. (*Conclusions*) As a result, a software module was developed enabling the selection of agricultural technologies based on the thorough accounting and operational processing of information that is used to characterizing the specific conditions of the economy, which makes it possible to increase the efficiency of crop production management and the competitiveness of an agricultural enterprise.

**Keywords:** digitalization, work planning, technology selection, software package, adapted technologies, natural and production conditions of the economy.

■ **For citation:** Alt V.V., Isakova S.P. Planirovanie proizvodstva produktsii rastenievodstva s primeneniem tsifrovyykh tekhnologiy [Planning crop production with the use of digital technologies]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 12-19 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-12-19. EDN FOPWFU.

Эффективность и конкурентоспособность производства продукции растениеводства в большинстве случаев зависит от своевременных действий аграриев, выявления состояния почвы, соблюдения научно обоснованной структуры посевных площадей, внесения достаточного количества удобрений, правильно организованной защиты растений, адаптации технологий выращивания сельхозкультур к погодным условиям, грамотного формирования и обеспечения работоспособности машинно-тракторного парка и т.д. [1]. Специфика сельскохозяйственного производства связана с рядом факторов: территориальной распределенностью, многовариантностью агротехнологий, изменчивостью климатических условий, большими объемами разнообразной информации, сложными алгоритмами принятия стратегических и тактических решений [2, 3]. С появлением новых тенденций по накоплению, сбору и обработке данных немаловажную роль играют инновационные и цифровые технологии [4-7]. Их внедрение позволяет повысить эффективность функционирования различных сфер деятельности, снизить производственные затраты, устранить ручной труд, сберечь ресурсы благодаря принятию результативных управленческих решений [8-13].

Новосибирская область – один из наиболее крупных сельскохозяйственных регионов в Западной Сибири. Общая площадь составляет 17,776 млн га, при этом на долю сельскохозяйственных угодий приходится почти 7,6 млн га. Общая сельскохозяйственная освоенность земель достигает 48%, в целом по Западной Сибири – 33% [14]. По данным Федеральной службы государственной статистики за 2021 г., общая пло-

щадь посевных угодий в хозяйствах всех категорий – 2 320,5 тыс. га, в том числе 1 505,13 тыс. га под зерновыми и зернобобовыми культурами. По валовому сбору зерна в хозяйствах всех категорий Новосибирская область занимает третье место в Сибирском федеральном округе, после Алтайского края и Омской области. По данным Министерства сельского хозяйства Новосибирской области, в 2021 г. обмолочено 3 477,3 тыс. га зерновых и зернобобовых культур при средней урожайности 2,33 т/га.

Территория области расположена в зоне рискованного земледелия. На сельхозпроизводство влияют географическое расположение, природные условия, почвенно-ландшафтные особенности: болотные массивы с прохладным и переувлажненным микроклиматом на севере, степи с сухим и засушливым климатом на юге области, засоленность почвенного покрова в отдельных зонах. Положение усугубляет низкая интенсивность производства. Для стабильной урожайности сельскохозяйственных культур необходимо внедрение инновационной техники и технологий [14].

Применение определенной технологии, последовательность выполнения различных технологических операций и их сроки во многом определяются агроклиматическими условиями и биологическими требованиями культур. Так, нарушение сроков посева, уборки, засоренность посевов, повреждение от болезней и вредителей приводят к значительному недобору урожая и повышению затрат [15-17]. Применение научно обоснованных технологий возделывания культур позволит существенно снизить влияние внешних факторов, риски падения урожайности.

Выполнение каждой технологической операции и всего цикла возделывания зерновой культуры в целом сопровождается большими объемами информации. Ее надо получить, передать, обработать, чтобы оперативно внести корректировку в агротехнологии. Возникает необходимость автоматизации процесса принятия решений по выбору технологии и техническому оснащению машинами. Для этого требуются:

- систематизация и структурирование всего массива информации, сопровождающего каждую технологическую операцию;
- определение информативных признаков и формирова-

ние обоснованного набора значимых параметров для выбора (корректировки) технологии, моделирования сельскохозяйственного технологического процесса:

- создание автоматизированного информационного сопровождения.

И здесь не обойтись без современной компьютерной техники и передовых цифровых технологий ввода и обработки больших объемов информации, визуализации результатов.

**Цель исследования** – разработка программно-технологического обеспечения, позволяющего подобрать

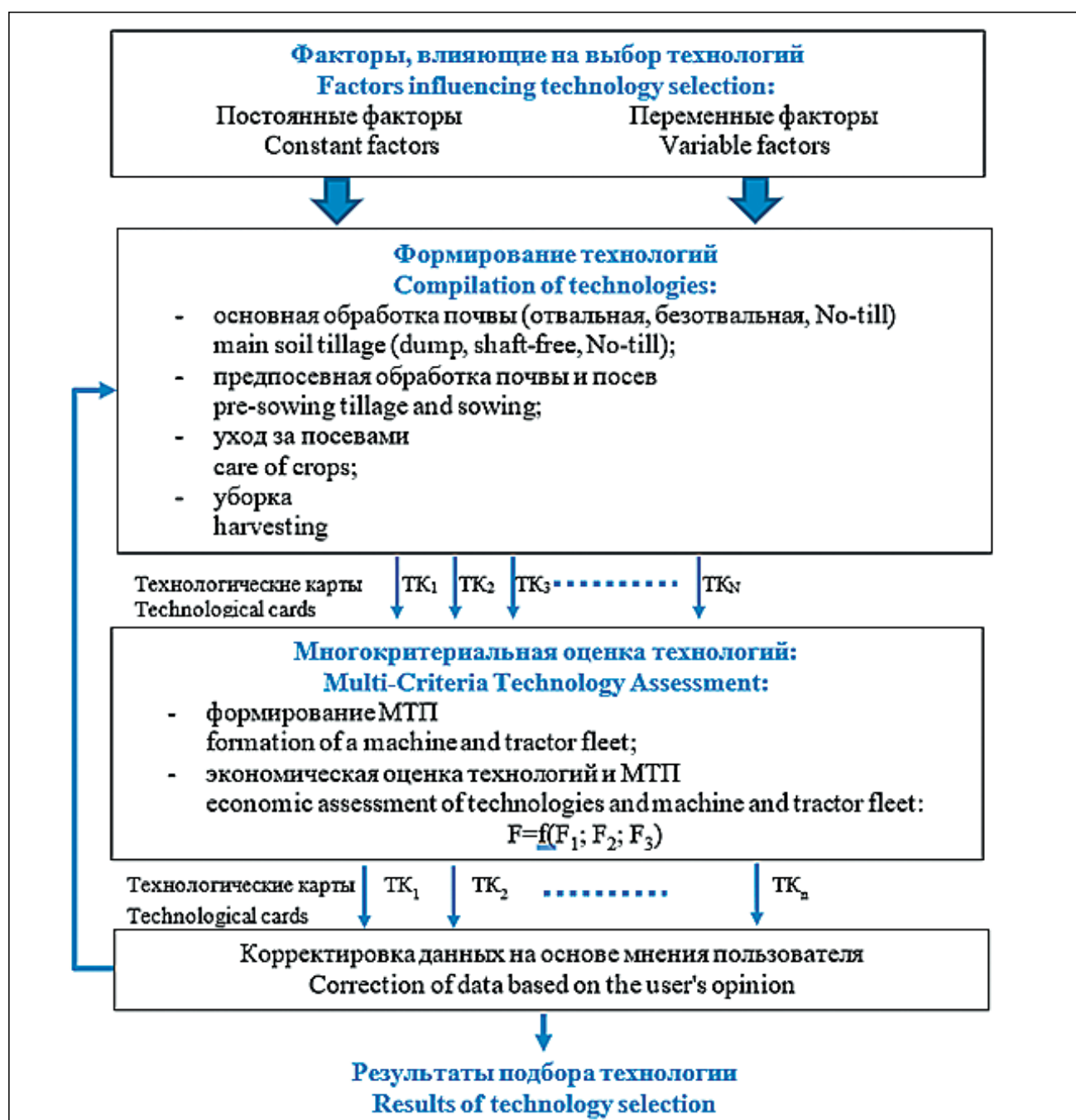


Рис. 1. Обобщенная структурная схема процесса выбора технологий и технических средств  
Fig.1. Generalized block diagram showing the process of selecting technologies and technical means

варианты технологий, адаптированных к природно-климатическим и производственным условиям конкретного хозяйства.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Исследования проводили в 2018-2021 гг. в рамках темы НИР 0533-2021-0007 «Разработать программно-технологическое обеспечение сопровождения машинных технологий».

В качестве лимитирующих факторов развития зернового производства могут быть выделены:

- увлажнение и сумма температур в вегетационный период;
- безморозный период;
- повреждение посевов от болезней и вредителей и т.д.

В процессе исследования мы рассматривали технологии основной обработки почв при возделывании зерновых культур, обеспечивающие минимальное воздействие на урожай лимитирующих факторов.

Объектом исследования стал процесс выбора технологий при возделывании зерновых культур, который может быть представлен в виде укрупненной структурной схемы (рис. 1).

По результатам оценки факторов, влияющих на выбор технологии, выделены постоянные и переменные факторы. К постоянным факторам относятся:

- агроклиматическая зона расположения хозяйства;
- его производственная направленность;
- конфигурация полей и их площади;
- состав машинно-тракторного парка (МТП);
- культуры;
- севооборот и др.

Среди переменных факторов учтены:

- агроклиматические характеристики зоны (сумма осадков, температур);
- сорта культур;
- необходимость применения средств защиты и удобрений и др. [18].

При проведении исследований использовали информационные и аналитические методы анализа материалов, системный подход, методологию разработки ПО. Для обоснования алгоритмов ПО по выбору технологий провели анализ материалов патентно-информационного поиска научной литературы и имеющихся технологических решений. Входные параметры для ПО, влияющие на решение проблемы, определены на предыдущих этапах НИР [19-21]. На основе этих данных сформированы дополнительные ограничения, влияющие на выбор агротехнологии:

- почвенно-климатические условия;
- фитосанитарная обстановка;
- севооборот;
- наличие семян.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Разрабатываемый программный продукт предполагает работу с большими объемами данных, которые для удобства оперирования ими, их структурирования и хранения размещаются в базе данных (БД). Для использования разра-

ботки на различных цифровых устройствах (мобильные устройства, персональные компьютеры) выбран формат *web*-приложения, интерфейс которого одинаково доступен для любого устройства. Программный продукт будет состоять из нескольких программных компонентов, которые представляют собой отдельные программные модули с четким назначением и собственным интерфейсом (принцип модульности):

- разграничение доступа;
- подбор технологий;
- подбор техники;
- редактор БД;
- отчеты (рис. 2).

Для подбора технологий возделывания зерновых культур пользователю (агроному) необходимо ввести следующие исходные данные:

- агроклиматическая зона расположения хозяйства;
- количество рабочих участков с указанием: номера, ширины, длины, общей площади, угла наклона, доли древесно-кустарниковой растительности, удаленности от хозяйства и агроэкологического типа земель;
- год получения урожая;
- информация по рабочим участкам о наличии сорняков, болезней и вредителей;
- предшественник по каждому рабочему участку;
- сорта возделываемых культур.

Информацию об агроклиматической зоне, о количестве рабочих участков и агроэкологическом типе земель пользователь вводит однократно при первом входе. Информацию о годе получения урожая, планируемых для высевы сортах на данный год и предшественниках вносят каждый раз при работе с разделом.

Затем дополняют сведения о рабочих участках: год урожая; возделываемые культуры; предшественник; данные о сорняках, болезнях и вредителях.

В результате работы программного модуля формируются варианты технологий, адаптированных к природным (аэроландшафтный район, агроэкологическая группа земель) и производственным условиям (культура, предшественник в севообороте, уровень интенсификации) хозяйства (таблица). В качестве исходного материала для формирования вариантов администратор вносит в БД регистры технологических операций и условия их применения.

В каждом из результатов подбора технологий для отдельной технологической карты предусмотрен вывод дополнительной информации о ее применении и технологических средствах для ее выполнения. По каждому варианту подбора технологий выводится список основных технологических операций для доминирующего типа агроэкологической группы земель в наиболее типичных условиях (погода, плотность почвы, засоренность предшественника и др.).

Работу ПО тестировали на примере южно-таежно-лесной зоны Новосибирской области. Рассмотр-

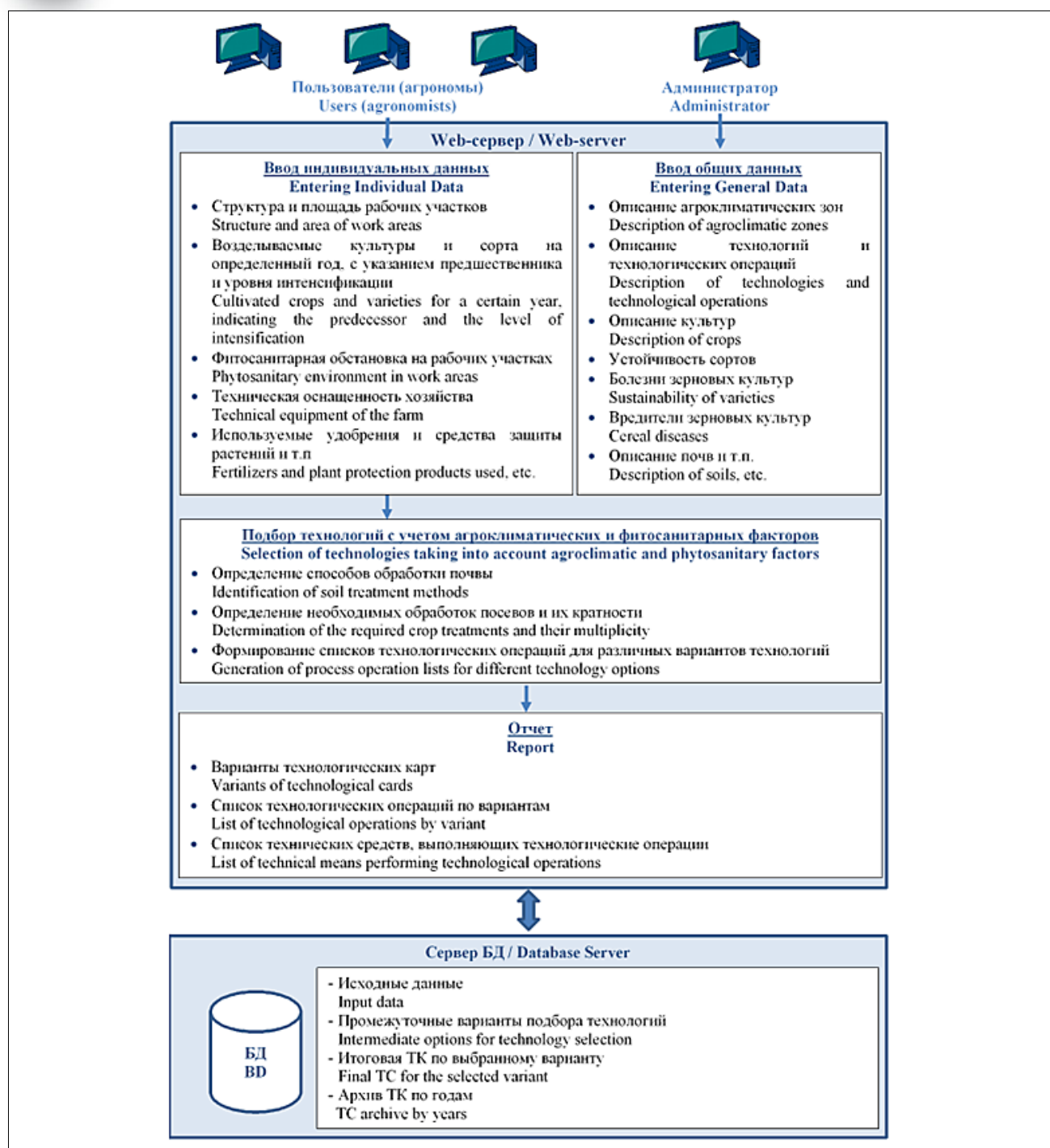


Рис. 2. Схема программного модуля по выбору технологий  
Fig.2. Scheme of the software module for technology selection

ли технологии возделывания яровой пшеницы. По результатам работы программного модуля получены два варианта технологий: классическая технология с нормальным уровнем интенсификации и *No-till* – с высоким уровнем интенсификации (таблица). Формирование вариантов технологий осуществляется на основе экспертной оценки.

**Выводы.** Разработанный программный модуль позволяет подобрать агротехнологии на основе тщательного учета и оперативной обработки информа-

ции, характеризующей объективно существующее большое разнообразие факторов, условий и особенностей производства, вследствие чего повысить эффективность управления производством продукции растениеводства и конкурентоспособность сельхозпредприятия.

На следующих этапах исследования в данной области для выбранных вариантов подбора технологий будет рассчитан состав МТП, выполнены расчеты экономических показателей и сформированы технологические карты.

Разработанный программный модуль войдет в состав программного комплекса «СТАМАТ».

| Таблица                                                                                                             | Table                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| РЕЗУЛЬТАТ ПОДБОРА ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИЛОЖЕНИЕМ / THE RESULT OF TECHNOLOGY SELECTION OPTIONS BY THE APPLICATION  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Варианты технологий<br>Technology options                                                                           | Описание технологий<br>Technology Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>2022 / Нормальный / Пшеница / Пар*</b><br><b>2022 / Normal / Wheat / Fallow*</b>                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Яровая пшеница по пару<br>Spring wheat by fallow                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Внесение органических удобрений (навоз, перегной)/ Application of organic fertilizers (manure, humus)</li> <li>• Вспашка на глубину 18-20 см/ Plowing to 18-20 cm depth</li> <li>• Боронование зубowymi боровами пара и зяби/ Spike-toothed harrowing of fallow and ploughland</li> <li>• Культивация/ Cultivation</li> <li>• Воздушно-тепловой обогрев семян/ Air-thermal heating of seeds</li> <li>• Протравливание семян зерновых сортов против возбудителей болезней/ Grain seed treatment against pathogens</li> <li>• Планировка почвы/ Soil leveling</li> <li>• Посев. Сроки посева яровых культур – ранний/ Sowing. Sowing dates for spring crops – early</li> <li>• Рядковое внесение гранулированных удобрений при посеве/ Row application of granular fertilizers during sowing</li> <li>• Прикатывание кольчато-шпоровыми средними катками/ Rolling with ring-spur medium rollers</li> <li>• Боронование зубowymi боровами посевов**/ Spike-toothed harrowing of crops**</li> <li>• Обкос полей и разбивка загонов/ Field mowing and laying out paddocks</li> <li>• Прямое комбайнирование с копнением соломы или измельчением и разбрасыванием/ Combine harvesting with straw collecting or chopping and spreading</li> <li>• Транспортировка зерна от комбайна/ Grain transportation of from the combine</li> <li>• Свлокивание соломы при копнении или скирдование при копнении соломы/ Straw dragging or straw stacking when collecting it</li> <li>• Скирдование соломы/ Straw stacking</li> </ul>    |
| <b>2022 / Интенсивный / Пшеница / Зерновые, зернобобовые*</b><br><b>2022 / Intensive / Wheat / Grain, legumes*</b>  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Яровая пшеница по зерновым<br>Spring wheat by grain                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Нулевая обработка (оставление стерни без осенней обработки)/ Zero tillage (leaving the stubble without autumn tillage)</li> <li>• Аспирация пыли и калибровка семян/ Dust aspiration and seed calibration</li> <li>• Воздушно-тепловой обогрев семян/ Air-thermal heating of seeds</li> <li>• Протравливание семян зерновых сортов против возбудителей болезней/ Grain seed treatment against pathogens</li> <li>• Боронование игольчатыми боровами пара и зяби/ Spike-toothed harrowing of fallow and ploughland</li> <li>• Планировка почвы/ Soil leveling</li> <li>• Посев. Сроки посева яровых культур – ранний/ Sowing. Sowing dates for spring crops - early</li> <li>• Рядковое внесение гранулированных удобрений при посеве/ Row application of granular fertilizers during sowing</li> <li>• Опрыскивание инсектицидами против вредителей генеративных органов зерновых культур/ Insecticides spraying against pests of grain generative organs</li> <li>• Опрыскивание фунгицидами зерновых культур/ Fungicide spraying of crops</li> <li>• Сеникация**/ Senication**</li> <li>• Обкос полей и разбивка загонов/ Field mowing and laying out paddocks</li> <li>• Прямое комбайнирование с копнением соломы или измельчением и разбрасыванием/ Combine harvesting with straw collecting or chopping and spreading</li> <li>• Транспортировка зерна от комбайна/ Grain transportation from the combine</li> <li>• Свлокивание соломы/ Straw dragging</li> <li>• Скирдование соломы/ Straw stacking</li> </ul> |
| *Наименование технологических карт в формате Год/ Уровень интенсификации Культура/ Предшественник                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| *Labeling the technological maps in the format Year/ Intensification level/ Crop/ Predecessor                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| **Технологические операции для остальных типов земель и возможных условий в связи с временной изменчивостью климата |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| **Technological operations for other land types and possible conditions due to temporal climate variability         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

Реализация программного комплекса позволит автоматизировать процесс формирования годового планирования работ, расчет экономических показателей. Программный комплекс может использоваться при

производстве продукции растениеводства в системах поддержки принятия решений, построенных на базе цифровых технологий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коковихин С.В., Биднина И.А., Шарий В.А., Червань А.Н., Дробитько А.В. Оптимизация агротехнологического процесса возделывания сельскохозяйственных культур на орошаемых землях с использованием информационных технологий // *Почвоведение и агрохимия*. 2020. N2(65). С. 63-71.
2. Gostev A.V., Pykhtin A.I., Tarasov S. An approach to automation of a rational choice of adaptive agricultural technologies. *BIO Web of Conferences* (FIES 2019). 2020. 00002.
3. Garbelini L.G., Debiasi H., Junior A.A.B., Franchini J.C., Coelho A.E., Telles T.S. Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production sys-

- tems. *European Journal of Agronomy*. 2022. Vol. 137. 126528.
4. Болдарева Ю.О., Назарова А.В. Перспективы цифровизации сельского хозяйства России // *Управление в экономических и социальных системах*. 2020. N2(4). С. 14-18.
5. Измайлов А.Ю., Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Дорохов А.А. Цифровое сельское хозяйство (обзор цифровых технологий сельхозназначения) // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N2(31). С. 41-52.
6. Zscheischler J., Brunsch R., Rogga S., Scholz R.W. Perceived risks and vulnerabilities of employing digitalization and digital data in agriculture – Socially robust orientations from a transdisciplinary process. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 358. 132034.
7. Rose D.C., Wheeler R., Winter M., Lobley M., Chivers Ch.-A. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*. 2021. Vol. 100. 104933.
8. Romanova Ju.A., Morkovkin D.E., Romanova I.N., Arta-monova K.A., Gibadullin A.A. Formation of a digital agricultural development system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. N548. 032014.
9. Варич М.И., Давлетшин Р.Р. Цифровизация сельского хозяйства в рамках проекта развития сельского хозяйства в Российской Федерации до 2025 года // *Молодой ученый*. 2020. N2(292). С. 354-357.
10. Davnis V.V., Tinyakova V.I., Blinov A.O. Volodin Yu.V. Combined Modeling of Projected Evaluation of the Regional Socio-economic Development. *International Journal of Economics & Business Administration (IJEBA)*. 2019. N10. 348-354.
11. Sharma R., Parhi S., Shishodia A. Industry 4.0 Applications in Agriculture: Cyber-Physical Agricultural Systems (CPASs). *Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICAME 2020*. 2020. 807-813.
12. Gurfova S.A. Digitalization of agriculture: formation and development // *Экономика и предпринимательство*. 2020. N3(116). С. 445-448.
13. Zhumaxanova K.M., Yessymkhanova Z.K., Yessenzhigitova R.G., Kaydarova A.T. The current state of agriculture digitalization: problems and ways of solution. *Central Asian Economic Review*. 2019. N5(128). 144-155.
14. Каличкин В.К. Системы земледелия и агротехнологии в Новосибирской области: руководство. Новосибирск: СФНЦА РАН. 2016. 232 с.
15. Беляев В.И., Силантьева М.М., Никулин А.М., Бондарович А.А. Кулунда: сельское хозяйство и низкоэмиссионные технологии устойчивого землепользования: коллективная монография. Барнаул: Алтайский государственный университет. 2021. С. 455-472.
16. Санин С.С., Ибрагимов Т.З., Стрижекозин Ю.А. Метод расчета потерь урожая пшеницы от болезней // *Защита и карантин растений*. 2018. N1. С. 11-15.
17. Суллиева С.Х. Зокиров К.Г. Структура урожайности озимой пшеницы при применении гербицидов против сорняков // *Экономика и социум*. 2020. N9(76). С. 323-326.
18. Альт В.В., Исакова С.П., Лапченко Е.А., Елкин О.В. Структурная схема по выбору технологий и технических средств в растениеводстве // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2019. Т. 49. N3. С. 87-93.
19. Альт В.В., Балущкина Е.А. Исакова С.П. Алгоритм выбора агротехнологий и технических средств при производстве продукции растениеводства // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2021. Т. 51. N4. С. 93-100.
20. 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.
21. 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.

## REFERENCES

1. Kokovikhin S.V., Bidnina I.A., Shariy V.A., Chervan' A.N., Drobit'ko A.V. Optimizatsiya agrotekhnologicheskogo protsessa vozdel'yvaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na oroshaemykh zemlyakh s ispol'zovaniem informatsionnykh tekhnologiy [Agrophysical properties soil data in formation of soil-protection land management systems using GIS-technologies]. *Pochvovedenie i agrokimiya*. 2020. N2(65). 63-71 (In Russian).
2. Gostev A.V., Pykhtin A.I., Tarasov S. An approach to automation of a rational choice of adaptive agricultural technologies. *BIO Web of Conferences (FIES 2019)*. 2020. 00002 (In English).
3. Garbelini L.G., Debiassi H., Junior A.A.B., Franchini J.C., Coelho A.E., Telles T.S. Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production systems. *European Journal of Agronomy*. 2022. Vol. 137. 126528 (In English).
4. Boldareva Yu.O., Nazarova A.V. Perspektivy tsifrovizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii [Prospects for digitalization of agriculture of Russia]. *Upravlenie v ekonomicheskikh i sotsial'nykh sistemakh*. 2020. N2(4). 14-18 (In Russian).
5. Izmaylov A.Yu., Godzhaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Dorokhov A.A. Tsifrovoe sel'skoe khozyaystvo (obzor tsifrovyykh tekhnologiy sel'khozna znacheniya) [Digital agriculture (review of agricultural digital technologies)]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N2(31). 41-52 (In Russian).
6. Zscheischler J., Brunsch R., Rogga S., Scholz R.W. Perceived risks and vulnerabilities of employing digitalization and digital data in agriculture – Socially robust orientations from a transdisciplinary process. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 358. 132034 (In English).
7. Rose D.C., Wheeler R., Winter M., Lobley M., Chivers Ch.-A. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and

- the planet. *Land Use Policy*. 2021. Vol. 100. 104933 (In English).
8. Romanova Ju.A., Morkovkin D.E., Romanova I.N., Artamonova K.A., Gibadullin A.A. Formation of a digital agricultural development system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. N548. 032014 (In English).
  9. Varich M.I., Davletshin R.R. Tsifrovizatsiya sel'skogo khozyaystva v ramkakh proekta razvitiya sel'skogo khozyaystva v Rossiyskoy Federatsii do 2025 goda [Digitalization of agriculture in the framework of the agricultural development project in Russia until 2025]. *Molodoy uchenyy*. 2020. N2(292). 354-357 (In Russian).
  10. Davnis V.V., Tinyakova V.I., Blinov A.O., Volodin Yu.V. Combined Modeling of Projected Evaluation of the Regional Socio-economic Development. *International Journal of Economics & Business Administration (IJEBA)*. 2019. N10. 348-354 (In English).
  11. Sharma R., Parhi S., Shishodia A. Industry 4.0 Applications in Agriculture: Cyber-Physical Agricultural Systems (CPASs). *Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICAME 2020*. 2020. 807-813 (In English).
  12. Gurfova S.A. Digitalization of agriculture: formation and development. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2020. N3(116). 445-448 (In English).
  13. Zhumaxanova K.M., Yessymkhanova Z.K., Yessenzhigitova R.G., Kaydarova A.T. The current state of agriculture digitalization: problems and ways of solution. *Central Asian Economic Review*. 2019. N5(128). 144-155 (In English).
  14. Kalichkin V.K. Sistemy zemledeliya i agrotekhnologii v Novosibirskoy oblasti: rukovodstvo [Farming systems and agrotechnologies in the Novosibirsk region: a guide]. Novosibirsk: SFNCA RAN. 2016. 232 (In Russian).
  15. Belyaev V.I., Silant'eva M.M., Nikulin A.M., Bondarovich A.A. Kulunda: sel'skoe khozyaystvo i nizkoemissionnye tekhnologii ustoychivogo zemlepol'zovaniya: kolektivnaya monografiya [Kulunda: agriculture and low-emission technologies for sustainable land use: collective monograph]. Barnaul: Altayskiy gosudarstvennyy universitet. 2021. 455-472 (In Russian).
  16. Sanin S.S., Ibragimov T.Z., Strizhekozin Yu.A. Metod rascheta poter' urozhaya pshenitsy ot bolezney [Method for calculating wheat yield losses from diseases]. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2018. N1. 11-15 (In Russian).
  17. Sullieva S.H., Zokirov K.G. Struktura urozhaynosti ozimoy pshenitsy pri primeneni gerbitsidov protiv sornyakov [The structure of winter wheat yield when using herbicides against weeds]. *Ekonomika i sotsium*. 2020. N9(76). 323-326 (In Russian).
  18. Alt V.V., Isakova S.P., Lapchenko E.A., Elkin O.V. Strukturnaya skhema po vyboru tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv v rastenievodstve [Structural scheme for the choice of technologies and technical means in plant growing]. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2019. Vol. 49. N3. 87-93 (In Russian).
  19. Alt V.V., Balushkina E.A., Isakova S.P. Algoritm vybora agrotekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv pri proizvodstve produktsii rastenievodstva [Algorithm for choosing agrotechnologies and technical means in the production of crops]. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2021. Vol. 51. N4. 93-100 (In Russian).
  20. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologiy i mashin [Aspects of digitalization of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
  21. Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Lichman G.I. Tekhnicheskie sistemy tsifrovogo kontrolya kachestva obrabotki pochvy [Technical systems of digital quality control of tillage]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 16-21 (In Russian).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Альт В.В. – замысел исследования, окончательное одобрение варианта статьи для опубликования;

Исакова С.П. – замысел и дизайн исследования, сбор, анализ и интерпретация данных, подготовка статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Alt V.V. – the research concept, the final approval of the article manuscript for publication;

Isakova S.P. – the research concept and design, data collection, analysis and interpretation, the article manuscript preparation.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

22.04.2022

09.08.2022

## Определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы

**Александр Геннадиевич Пастухов**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой,  
e-mail: pastukhov\_ag@mail.ru;  
**Дмитрий Николаевич Бахарев**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры,  
e-mail: baharevdn\_82@mail.ru;

**Сергей Федорович Вольвак**,  
кандидат технических наук, профессор кафедры,  
e-mail: volvak.s@yandex.ru;  
**Александр Александрович Добрицкий**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры,  
e-mail: dobrickiy\_aa@bsaa.edu.ru

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, п. Майский, Белгородская обл., Российская Федерация

**Реферат.** Отметили необходимость снижения травмирования зерна кукурузы при обмолоте початков. Показали, что можно ввести ограничивающие условия и обеспечить рациональные параметры при работе молотильно-сепарирующих устройств, исключая повреждение внешней плодовой оболочки зерна. Подтвердили, что закономерности обмолота початков кукурузы адекватно описываются посредством применения контактной задачи теории упругости Г. Герца. (*Цель исследования*) Определить коэффициент Пуассона и модуль Юнга плодовой оболочки зерна кукурузы, поверхность которой непосредственно контактирует с рабочими органами молотильного устройства. (*Материалы и методы*) Использовали методы однофакторного экспериментального исследования с последующей статистической обработкой массива данных. Экспериментально изучили коэффициент Пуассона для внешней плодовой оболочки зубовидной кукурузы и модуль Юнга применительно к зерну кремнистой, зубовидной, сахарной и лопающейся кукурузы. (*Результаты и обсуждение*) Разработали методики исследования и экспериментальные установки для определения коэффициента Пуассона и модуля Юнга плодовой оболочки зерна кукурузы. Установили, что с доверительной вероятностью 0,95 среднее значение коэффициента Пуассона плодовой оболочки зерна зубовидной кукурузы составляет 0,356. Определили модуль Юнга применительно к нескольким разновидностям кукурузы: кремнистой – 98-125 мегапаскалей, зубовидной кукурузы – 78-127, сахарной – 97-124, лопающейся – 127-169 мегапаскалей. Выявили, что максимально допустимый скоростной режим обмолота обеспечивается при скорости контактного взаимодействия зерна и шипа молотильного устройства не более 1,6 метра в секунду. (*Выводы*) Доказали, что для более полного прикладного применения контактной задачи теории упругости Г. Герца при моделировании процессов обмолота початков кукурузы необходимо знать коэффициент Пуассона и модуль Юнга внешней плодовой оболочки зерна. Рекомендовали использовать полученные численные значения данных механико-технологических характеристик при моделировании деформационных процессов, регламентирующих скоростные режимы обмолота.

**Ключевые слова:** обмолот, зерно кукурузы, травмирование зерна, молотильно-сепарирующее устройство, плодовая оболочка, коэффициент Пуассона, модуль Юнга.

■ **Для цитирования:** Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Добрицкий А.А. Определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 20-26. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-20-26. EDN BNZXOM.

## Estimating Poisson's Ratio and Young's Modulus of the Outer Fruit Shell of Corn Grain

**Aleksandr G. Pastukhov**,  
Dr.Sc.(Eng.), professor, head of department,  
e-mail: pastukhov\_ag@mail.ru;  
**Dmitriy N. Bakharev**,  
Ph.D.(Eng.), e-mail: baharevdn\_82@mail.ru;

**Sergey F. Vol'vak**,  
Ph.D.(Eng.), professor, e-mail: volvak.s@yandex.ru;  
**Aleksandr A. Dobritskiy**,  
Ph.D.(Eng.), e-mail: dobrickiy\_aa@bsaa.edu.ru

Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin, Maysky, Belgorod region, Russian Federation

**Abstract.** The paper highlights the need of reducing damage caused to corn grain during cobs threshing. The damage to the grain fruit shell can be eliminated by introducing limiting conditions and ensuring optimal parameters for the threshing and separating device operation. It has been confirmed that the patterns of corn cobs threshing can be adequately described by applying the Hertzian elastic contact theory. (*Research purpose*) To obtain the Poisson's ratio and Young's modulus of the fruit shell of corn grain, whose surface is in direct contact with the working bodies of the threshing device. (*Materials and methods*) One-factor-at-a-time experiments were conducted with the subsequent statistical processing of the data array. Poisson's ratio was experimentally studied for the fruit shell of dent corn and so was Young's modulus for the grain of flint corn, dent corn, sugar corn and popcorn. (*Results and discussion*) Research methods and experimental equipment have been developed to determine the Poisson's ratio and Young's modulus of the fruit shell of corn grain. It was established that with a confidence probability of 0.95, the average Poisson's ratio value of the fruit shell of the dent corn grain equals 0.356. Young's modulus was obtained by the following corn varieties: flint corn – 98-125 megapascals, dent corn – 78-127 megapascals, sugar corn – 97-124 megapascals, popcorn – 127-169 megapascals. It was found out that the maximum permissible speed mode of threshing can be provided if the speed of contact interaction between the grain and the threshing device pin does not exceed 1.6 meters per second. (*Conclusion*). It was proved that for a more comprehensive application of the Hertzian elastic contact theory when modeling the processes of threshing corn cobs, it is necessary to know the Poisson's ratio and Young's modulus for the outer fruit shell of grain. The obtained numerical values of these mechanical and technological characteristics are recommended to be used in modeling the deformation processes that regulate the threshing speed regimes.

**Keywords:** threshing, corn grain, grain damage, threshing and separating device, fruit shell, Poisson's ratio, Young's modulus.

■ **For citation:** Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Vol'vak S.F., Dobritskiy A.A. Opredelenie koeffitsienta Puassona i modulya Yunga vneshney plodovoy obolochki zerna kukuruzy [Estimating Poisson's ratio and Young's modulus of the outer fruit shell of corn grain]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 20-26 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-20-26. EDN BNZXOM.

Из зерна и обмолоченных стержней початков кукурузы производят пищевые продукты, корма для сельскохозяйственных животных и более 500 разновидностей непищевых продуктов (спирт, биоэтанол, пластик для 3D-принтеров, гранулы для твердотопливных котлов и т.д.) [1, 2]. Полная реализация генетического потенциала урожайности семенного зерна возможна только при отсутствии механических повреждений. В процессе комбайновой уборки початков и их послеуборочной переработки зерно подвергается многократному силовому воздействию рабочими органами машин, конструкция и режимы работы которых в большинстве случаев не рациональны [3, 4].

Совершенствование рабочих органов машин для комбайновой уборки початков и их послеуборочной переработки на семена целесообразно проводить посредством моделирования и всестороннего изучения динамического контактного взаимодействия внешней плодовой оболочки зерна кукурузы и рабочих органов машин. Больше всего зерно повреждается во время обмолота в аксиально-роторном молотильно-сепарирующем устройстве (МСУ). Здесь осуществляется контакт зерна со стальными шипами деки МСУ (рис. 1) [5, 6].

Расчет и прогнозирование величины равнодействующей сил динамического контактного взаимодействия позволяют ввести ограничивающие условия и обеспечить рациональную скорость взаимодействия, исключая повреждение внешней плодовой оболочки зерна. Максимально допустимая сила

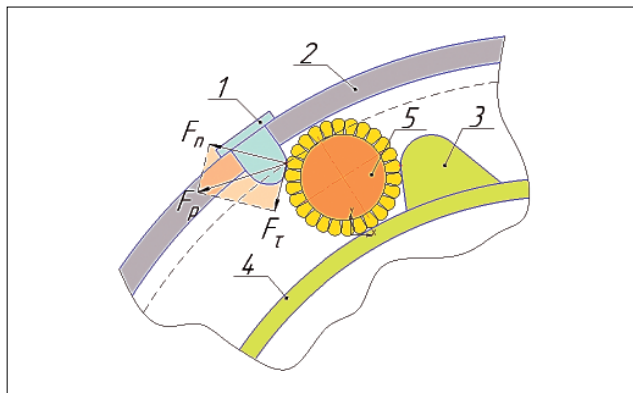


Рис. 1. Графическая интерпретация динамического контактного взаимодействия зерна кукурузы с шипом деки МСУ: 1 – шип деки; 2 – дека; 3 – лопасть ротора; 4 – цилиндр-ротор; 5 – початок кукурузы;  $F_n$ ,  $F_t$  – нормальная и тангенциальная составляющие равнодействующей сил динамического контактного взаимодействия  $F_p$

Fig. 1. Graphical interpretation of the dynamic contact interaction of corn grain with the pin of the TSD deck: 1 – a pin of the deck; 2 – deck; 3 – rotor blade; 4 – cylinder rotor; 5 – corn cob;  $F_n$ ,  $F_t$  – normal and tangent components of the resultant forces of dynamic contact interaction  $F_p$

удара по зерну кукурузы составляет 680 Н [7-9]. Тогда научная задача минимизации повреждений сводится к определению зависимости равнодействующей сил динамического контактного взаимодействия и скорости движения рабочего органа. Для этих целей применима теория Г. Герца, выраженная в виде прикладной модели [10, 11]:

$$F_p = \left( \frac{4 \cdot \sqrt{R_1}}{3 \cdot \pi \cdot (k_1 + k_2)} \right)^{2/5} \cdot \left( \frac{5 \cdot V^2}{4 \cdot \left( \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} \right)} \right)^{3/5}, \quad (1)$$

где  $F_p$  – равнодействующая сил динамического контактного взаимодействия, Н;

$R_1$  – радиус кривизны ударника (шила), м;

$V$  – скорость удара, м/с;

$m_1, m_2$  – массы соударяющихся тел, кг;

$k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, зависящие от модуля Юнга и коэффициента Пуассона соударяющихся тел [11]:

$$k_1 = (1 - \nu_1^2) / \pi \cdot E_1 \text{ и } k_2 = (1 - \nu_2^2) / \pi \cdot E_2, \quad (2)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – модули Юнга материалов соударяющихся тел, Па;

$\nu_1$  и  $\nu_2$  – коэффициенты Пуассона материалов соударяющихся тел.

Изучение контактного взаимодействия целесообразно начинать с исследования механических характеристик контактирующих поверхностей. В частности, необходимо определить модуль Юнга и коэффициент Пуассона для внешней плодовой оболочки зерна кукурузы.

**Цель исследования** – определить коэффициент Пуассона и модуль Юнга плодовой оболочки зерна кукурузы, поверхность которой непосредственно контактирует с рабочими органами молотильного устройства.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Использованы методы однократного экспериментального исследования с последующей статистической обработкой массива данных.

Экспериментально изучали коэффициент Пуассона для внешней плодовой оболочки зубовидной кукурузы. Модуль Юнга определяли для внешней плодовой оболочки зерна кремнистой, зубовидной, сахарной и лопающейся кукурузы.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Методика определения коэффициента Пуассона внешней плодовой оболочки зерна кукурузы предусматривает три этапа.

1. Выбрана опорная математическая модель [12, 13]:

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\varepsilon$  – относительное удлинение;

$\varepsilon'$  – относительное сужение.

Относительное сужение  $\varepsilon'$  определяется выражением [12, 13]:

$$\varepsilon' = \frac{\Delta a}{a_0}, \quad (4)$$

где  $\Delta a$  – абсолютное сужение, мм;

$a_0$  – начальная толщина, мм.

Относительное удлинение  $\varepsilon$  определяется выражением [12, 13]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (5)$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение, мм;

$l_0$  – начальная длина, мм.

2. Изготовлена экспериментальная установка (рис. 2).

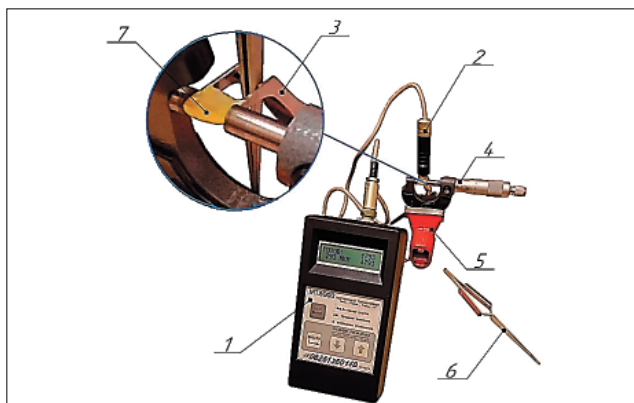


Рис. 2. Оборудование для определения коэффициента Пуассона плодовой оболочки зерна кукурузы: 1 – магнитный толщиномер; 2 – датчик толщиномера; 3 – захват-расширитель; 4 – микрометр; 5 – мини-тиски; 6 – обратный пинцет; 7 – внешняя плодовая оболочка зерна кукурузы

Fig. 2. Equipment for determining the Poisson's ratio of the fruit shell of corn grain: 1 – magnetic thickness gauge; 2 – thickness gauge sensor; 3 – gripper expander; 4 – micrometer; 5 – mini vise; 6 – reverse tweezers; 7 – outer fruit shell of corn grain

3. Разработана методика экспериментального исследования и проведены эксперименты. С зерна зубовидной кукурузы, созревшей до восковой спелости, посредством пинцета удалили зародыш и эндосперм так, чтобы внешняя плодовая и семенная оболочки сохранили свою целостность. Затем освобожденную от внутренних тканей плодовую оболочку надели на стальной захват-расширитель. Замерили начальную длину  $l_0$  оболочки микрометром марки МК25-1 и начальную толщину  $a_0$  магнитным толщиномером марки МТ2003. Шток микрометра переместили на 2,25 мм в сторону увеличения. Данная величина растяжения оболочки установлена в результате поискового опыта, чтобы исключить ее полный или частичный разрыв. По результатам экспериментов при 20-кратной повторности на основании выражения (3) рассчитали коэффициент Пуассона для внешней плодовой оболочки зерна кукурузы.

В среднем значение коэффициента Пуассона для внешней плодовой оболочки зерна зубовидной кукурузы составило 0,356, а диапазон значений может колебаться от 0,341 до 0,382. Среднее квадратичное отклонение – 0,014, абсолютная ошибка – 0,020 мм, относительная ошибка – 5,6%.

Методика определения модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы различных ботанических подвидов также проводится в три этапа.

1. Выбрана опорная математическая модель [14-16]:

$$E = \frac{0,886 \cdot P_{\text{ви}} \cdot \psi \cdot (1 - \nu^2)}{H_{\text{ви}}^{\frac{3}{2}} \cdot d^{\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

где  $E$  – модуль Юнга, МПа;

$P_{\text{ви}}$  – сопротивление внедрению индентора в оболочку зерна, Н;

$\psi$  – приведенная константа упругости;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$d$  – диаметр цилиндрического индентора,  $d = 1,13$  мм;

$H_{\text{ви}}$  – глубина внедрения индентора в оболочку зерна, мм.

2. Изготовлена экспериментальная установка (рис. 3).

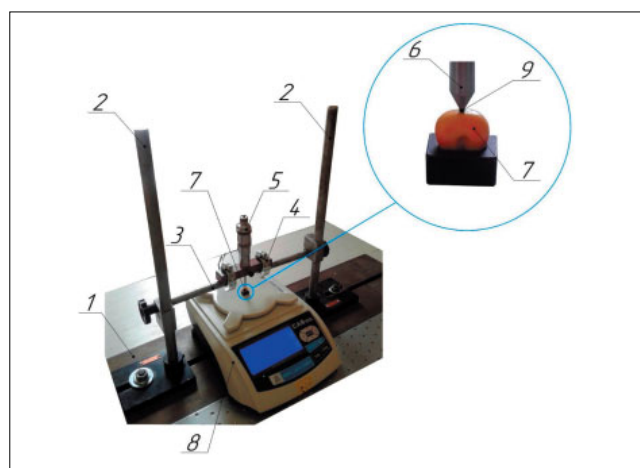


Рис. 3. Оборудование для определения модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы: 1 – лабораторный стенд СМУ 000.000; 2 – стойка-штатив; 3 – опора; 4 – фиксатор; 5 – микрометрический глубиномер; 6 – шток глубиномера; 7 – зерно; 8 – весы; 9 – цилиндрический индентор

Fig. 3. – Equipment for determining the Young's module of the outer fruit shell of corn grain: 1 – SMU 000.000 laboratory stand; 2 – stand-tripod; 3 – support; 4 – retainer; 5 – micrometer depth gauge; 6 – depth gauge rod; 7 – grain; 8 – scales; 9 – cylindrical indenter

3. Разработана методика экспериментального исследования и проведены эксперименты. Выявлена зависимость сопротивления внедрению цилиндрического индентора  $P_{\text{ви}}$  от глубины внедрения индентора в оболочку зерна кремнистой, зубовидной, сахарной и лопающейся кукурузы  $H_{\text{ви}}$  до достижения границы ее упругих свойств. Сопротивление измеряли посредством весового оборудования II высокого класса точности, глубину внедрения – микрометрическим глубиномером ГМ50 первого класса точности.

Зерно кукурузы – это живой организм, развивающийся по законам биологии и биосимметрии. Исходя из этого, на основе методики теории подобия предложено приведенную константу упругости принять сопоставимой с величиной двойного отношения линейных размеров, для зерна кукурузы  $\psi = 1,29$  [17, 18].

Влажность испытуемых образцов зерна составляла 12,8-13,4% и контролировалась по общеизвестной методике в лабораторных условиях.

Для каждого из четырех исследуемых подвидов кукурузы отобрали группу зерен с равной толщиной и шириной верхней части. В защитную плодную оболочку отобранных зерен посредством перемещения штока глубиномера внедряли цилиндрический индентор на глубину до 1600 мкм. Сопротивление внедрению фиксировалось дискретно при ступенчатом изменении положения индентора с шагом 100 мкм. В каждом положении индентора эксперимент повторяли до появления статистически достоверного результата.

Применяемое измерительное оборудование и кратность повторения опытов позволили получить результаты экспериментов, достоверная вероятность которых превышает  $p = 0,95$ . По результатам исследований построили соответствующие графические зависимости (рис. 4).

После полного разрыва всех тканей оболочки начинается деформация эндосперма, это характеризуется стабильностью сопротивления и графически выражается участком плавной кривой. Для определения модуля Юнга наибольший научный интерес представляет последний изгиб кривой перед началом деформации эндосперма, поскольку здесь достигается предел упругости материала защитной плодовой оболочки зерна [19]. Числовые значения сопротивления в данном участке целесообразно использовать для расчета модуля Юнга. В результате установлено усилие, при котором преодолевается предел прочности внешней плодовой оболочки зерна кукурузы и при этом зафиксирована глубина внедрения индентора в оболочку зерна. В итоге на основании (6) рассчитан модуль Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы, МПа:

- кремнистой – 98-125;
- зубовидной – 78-127;
- сахарной – 97-124;
- лопающейся – 127-169.

Полнота знаний о коэффициенте Пуассона и модуле Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы позволяет реализовать модель (1), в результате чего для анализируемых ботанических подвидов кукурузы установлен максимально допустимый скоростной режим обмолота, обеспечивающий скорость контактного взаимодействия зерна и шипов МСУ, – не более 1,6 м/с. При этом равнодействующая сил динамического контактного взаимодействия не превышает максимально допустимого значения  $F_p = 680$  Н.

В перспективе предстоит уточнить механико-технологические характеристики плодовых оболочек большинства зерновых культур, что позволит не только оптимизировать режимы их обмолота, но и корректировать эффективные конструктивные параме-

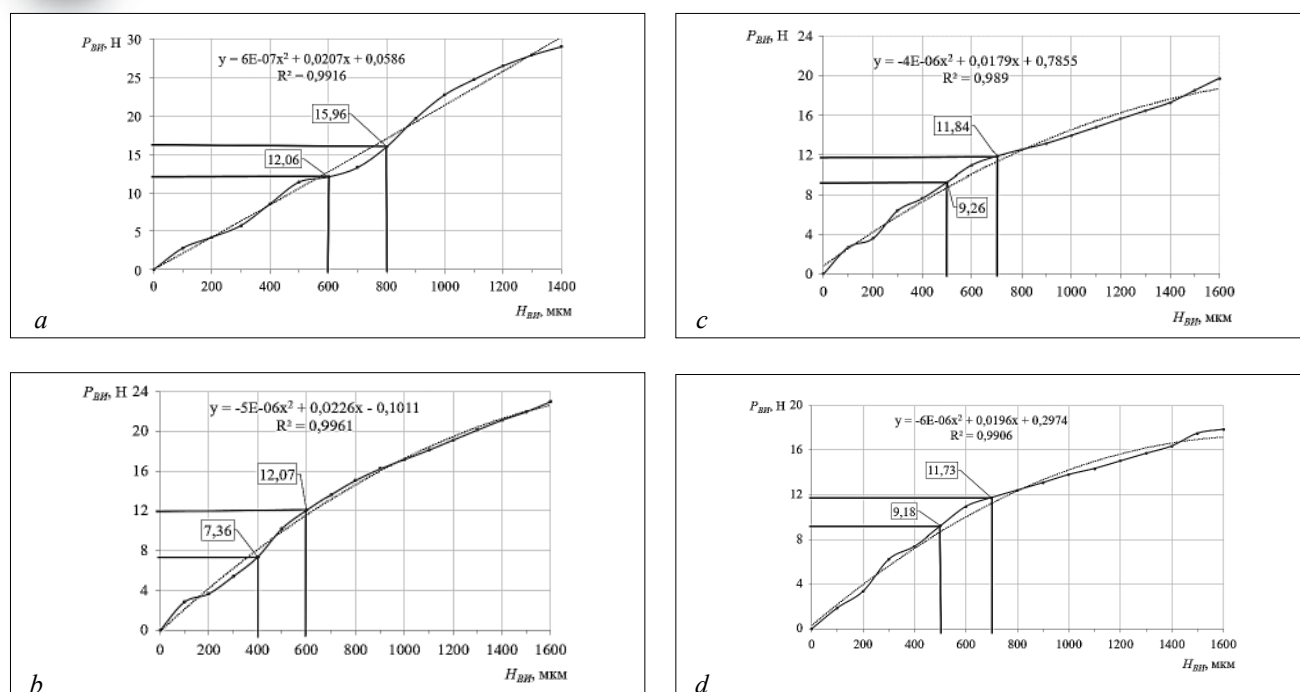


Рис. 4. Графическая зависимость сопротивления внедрению индентора в оболочку зерна от глубины его внедрения: а – кремнистая кукуруза; б – зубовидная; с – лопающаяся; д – сахарная

Fig. 4. – Graphical dependence between the indenter resistance to the insertion into the grain shell and its penetration depth: а – flint corn; б – dent corn; с – popcorn; d – sugar corn

тры рабочих органов молотильных устройств.

### Выводы

1. Для более полного прикладного применения контактной задачи теории упругости Г. Герца при моделировании процессов обмолота початков кукурузы необходимо знание коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна.
2. Коэффициент Пуассона защитной плодовой оболочки зерна зубовидной кукурузы в среднем составляет 0,356.
3. Модуль Юнга внешней плодовой оболочки кремнистой кукурузы равен 98-125 МПа, зубовидной –

78-127, сахарной – 97-124, лопающейся – 127-169 МПа.

4. Полученные численные значения данных механико-технологических характеристик использованы при моделировании деформационных процессов, регламентирующих скоростные режимы обмолота. В результате установлено, что максимально допустимый скоростной режим обмолота обеспечивается скоростью контактного взаимодействия зерна и шипов МСУ не более 1,6 м/с. При этом равнодействующая сил динамического контактного взаимодействия не превысит максимально допустимого значения  $F_p = 680$  Н.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Santolini E., Bovo M., Barbaresi A., Torreggiani D., Tassinari P. Turning Agricultural Wastes into Biomaterials: Assessing the Sustainability of Scenarios of Circular Valorization of Corn Cob in a Life-Cycle Perspective. MDPI. *Applied Sciences*. 2021 Vol. 11. 6281.
2. Voća N., Krička T., Janušić V., Matin A. Bioethanol production from corn kernel grown with different cropping intensities. *Proceedings of the VI. Alps-Adria Scientific Workshop*. 2007. Vol. 35(2). 1309-1312.
3. Шекихачев Ю.А Технические средства для обмолота початков кукурузы // *NovalInfo*. 2016. N45. С. 28-35.
4. Тронеv С.В., Ряднов А.И., Федорова О.А. Повышение производительности зерноуборочного комбайна // *Научное обозрение*. 2017. N21. С. 37-43.
5. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Черников Р.В. Пневматическая система дифференцированного обмолота кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N4. С. 42-47.
6. Пастухов, А.Г., Бахарев Д.Н. Молотильно-сепарирующее устройство для первичного семеноводства кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 34-39.
7. Курасов В.С., Куцеев В.В., Самурганов Е.Е. Механизация работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве кукурузы: Монография. Краснодар: КубГАУ. 2013. 151 с.
8. Труфляк Е.В., Кравченко В.С., Гончарова И.А. Изучение механического повреждения початка кукурузы при его отрыве в кукурузоуборочной жатке // *Научный журнал КубГАУ*. 2008. N38(4). С. 1-11.

9. Петунина И.А. Обмолот початков кукурузы: Монография. Краснодар: КубГАУ. 2006. 200 с.
10. Zukas J. A., Nicholas T., Hallock F. Swift H.F. Impact dynamics: Monograph. New York: John Wiley and sons. 1982. 296.
11. Лейбович М.В. Теория удара в задачах и примерах. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет. 2016. 236 с.
12. Burubail W., Amulal E., Davies R.M., Etekpe G.W.W., Daworiye S.P. Determination of Poisson's ratio and elastic modulus of African nutmeg (*Monodora myristica*). *International Agrophysics*. 2008. Vol. 22(2). 99-102.
13. Dai F., Zhao W., Han Z., Zhang F. Experiment on Poisson's ratio determination about corn kernel. *Proceedings of 3rd International Conference on Chemical Engineering and Advanced*. 2013. Vol. 781-784. 799-802.
14. Shelef L., Mohsenin N.N. Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grain. *Cereal Chemistry*. 1967. Vol. 44(4). 392-402.
15. Калашникова Н.В. Модуль упругости семян зерновых и зернобобовых культур // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, Вып. 12, 1975. С. 51-52.
16. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Dobrickiy A. Methodology and results of experimental determination of corn grain elasticity modulus. *Proceedings of 20th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development»*. 2021. Vol. 20. 92-97.
17. Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г. Бионические основы конструирования молотильно-сепарирующих систем для початков кукурузы: Монография. п. Майский: Белгородский ГАУ. 2018. 168 с.
18. Бахарев Д.Н., Пастухов А.Г., Вольвак С.Ф., Бурнукин А.Е. Научные основы совершенствования технологии поточной обработки кукурузы в початках: Монография. п. Майский: Белгородский ГАУ. 2021. 188 с.
19. Рожковский М.Ф. До визначення механізму деформації і руйнування зернових матеріалів. *Вісник аграрної науки*. 2000. Вип. 7. С. 50-53.

## REFERENCES

1. Santolini E., Bovo M., Barbaresi A., Torreggiani D., Tassinari P. Turning Agricultural Wastes into Biomaterials: Assessing the Sustainability of Scenarios of Circular Valorization of Corn Cob in a Life-Cycle Perspective. MDPI. *Applied Sciences*. 2021 Vol. 11. 6281 (In English).
2. Voća N., Krička T., Janušić V., Matin A. Bioethanol production from corn kernel grown with different cropping intensities. *Proceedings of the VI. Alps-Adria Scientific Workshop*. 2007. Vol. 35(2). 1309-1312 (In English).
3. Shekikhachev Yu. A. Tekhnicheskie sredstva dlya obmola pochatkov kukuruzy [Technical means for threshing corn cobs]. *NovaInfo*. 2016. N45. 28-35 (In Russian).
4. Tronev S.V., Ryadnov A.I., Fedorova O.A. Povyshenie proizvoditel'nosti zernouborochnogo kombayna [Increasing the performance of a combine harvester]. *Nauchnoe obozrenie*. 2017. N21. 37-43 (In Russian).
5. Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Vol'vak S.F., Chernikov R.V. Pnevmaticheskaya sistema differentsirovannogo obmolota kukuruzy [Pneumatic system of variable-force corn threshing]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N4. 42-47 (In Russian).
6. Pastukhov A.G., Bakharev D.N. Molotil'no-separiruyushchee ustroystvo dlya pervichnogo semenovodstva kukuruzy [Maize threshing and separating device for primary seed production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 34-39 (In Russian).
7. Kurasov V.S., Kutseev V.V., Samurganov E.E. Mekhanizatsiya rabot v selektsii, sortoispytanii i pervichnom semenovodstve kukuruzy: Monografiya [Mechanization of work in breeding, variety testing and primary corn seed production: Monograph]. Krasnodar: KubGAU. 2013. 151 (In Russian).
8. Truflyak E.V., Kravchenko V.S., Goncharova I.A. Izucheniye mekhanicheskogo povrezhdeniya pochatka kukuruzy pri ego otryve v kukuruzouborochnoy zhatke [Study of mechanical damage of a corn-cob under its brake-off in a corn-harvester]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2008. N38(4). 1-11 (In Russian).
9. Petunina I.A. Obmolot pochatkov kukuruzy: Monografiya [Corn cobs threshing: Monograph]. Krasnodar: KubGAU. 2006. 200 (In Russian).
10. Zukas J.A., Nicholas T., Hallock F. Swift H.F. Impact dynamics: Monograph. New York: John Wiley and sons. 1982. 296 (In English).
11. Leybovich M.V. Teoriya udara v zadachakh i primerakh [Impact theory in problems and examples]. Khabarovsk: Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet. 2016. 236 (In Russian).
12. Burubail W., Amulal E., Davies R.M., Etekpe G.W.W., Daworiye S.P. Determination of Poisson's ratio and elastic modulus of African nutmeg (*Monodora myristica*). *International Agrophysics*. 2008. Vol. 22(2). 99-102 (In English).
13. Dai F., Zhao W., Han Z., Zhang F. Experiment on Poisson's ratio determination about corn kernel. *Proceedings of 3rd International Conference on Chemical Engineering and Advanced*. 2013. Vol. 781-784. 799-802 (In English).
14. Shelef L., Mohsenin N.N. Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grain. *Cereal Chemistry*. 1967. Vol 44(4). 392-402 (In English).
15. Kalashnikova N.V. Modul' uprugosti semyan zernovykh i zernobobovykh kul'tur [Elasticity modulus of grain and leguminous crops seeds]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 1975. N12. 51-52 (In Russian).
16. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Dobrickiy A. Methodology and results of experimental determination of corn grain elasticity modulus. *Proceedings of 20th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development»*. 2021. Vol. 20. 92-97 (In English).
17. Bakharev D.N., Vol'vak S.F., Pastukhov A.G. Bioniches-

kie osnovy konstruirovaniya molotil'no-separiruyushchikh sistem dlya pochatkov kukuruzy: Monografiya [Bionic basis for the design of threshing and separating systems for corn cobs: Monograph]. Mayskiy: Belgorodskiy GAU. 2018. 168 (In Russian).

18. Bahharev D.N., Pastuhov A.G., Vol'vak S.F., Burnukin A.E. Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya tekhnologii potochnoy obrabotki kukuruzy v pochatkakh: Monografiya [Sci-

entific foundations of improving the flow processing technology of corn cobs: Monograph]. Mayskiy: Belgorodskiy GAU. 2021. 188 (In Russian).

19. Rozhkova M.F. Do viznachennya mekhanizmu deformatsii i rujnuvannya zernovih materialiv [To determine the mechanism of deformation and destruction of grain materials]. *Visnik agrarnoi nauki*. 2000. N7. 50-53 (In Ukrainian).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Заявленный вклад соавторов:

Пастухов А.Г. – научное руководство и формулирование основных направлений исследования, общая корректировка текста;  
Бахареv Д.Н. – проведение экспериментов и обработка результатов исследования, формирование общих выводов;  
Вольвак С.Ф. – литературный анализ и выбор опорных тематических моделей;  
Добрицкий А.А. – изготовление экспериментальных установок, визуализация.  
*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Coauthors' contribution:

Pastukhov A.G. – scientific supervision and formulation of the research main directions, manuscript proofreading;  
Bakharev D.N. – conducting experiments and processing research results, developing general conclusions;  
Volvak S.F. – literature review and selection of the reference mathematical models;  
Dobritsky A.A. – creating experimental installations, visualization.  
*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

07.04.2022  
03.06.2022

## Обоснование конструктивно-компоновочной схемы гравитационно-пневматического очистителя семян сои

**Виктор Геннадьевич Хамуев,**  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: victor250476@yandex.ru;

**Станислав Александрович Герасименко,**  
младший научный сотрудник,  
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что научные исследования по интенсификации процессов сепарации семян сои необходимы для разработки технологий очистки нового типа, исключающих недостатки традиционных машин, а также для достижения более выгодных технико-экономических показателей зерноочистительного оборудования. (*Цель исследования*) Обосновать конструктивные параметры очистительно-сортировальной установки для высокоэффективной сепарации семян сои. (*Материалы и методы*) Использовали разработанный макетный образец установки для очистки семян сои, состоящий из гравитационной колонки и пневматического очистительно-сортировального канала. Обосновали количество гребенок в гравитационной колонке и зазор между прутками гребенок. Определили полноту выделения крупной примеси в гравитационной колонке, легкой примеси – в первой секции канала, половинок сои – во второй, мелких и шуплых семян сои – в третьей секции канала при различной подаче материала на очистку. (*Результаты и обсуждение*) Установили оптимальное количество гребенок для гравитационной колонки – 10 штук при зазорах между прутками гребенок 10 миллиметров, при этом эффективность сепарации – 99,3 процента. Выявили, что оптимальное соотношение ширины сужающей перегородки и глубины секции канала, равной 150 миллиметрам, составляет 0,37. Вычислили, что ширина сужающих перегородок составит 55,5 миллиметра; оптимальная подача сои – 2,5 тонны в час, при этом полнота выделения в гравитационной колонке – не ниже 95 процентов, в пневматическом канале – не меньше 98 процентов. (*Выводы*) Определили, что интенсификация сепарации семян сои возможна путем совместного применения гравитационной колонки и пневматического сепарирующего устройства, что позволяет увеличить производительность и эффективность очистки сои на 20 процентов и более.

**Ключевые слова:** семена сои, очистка семян, сортировка семян, сепарация семян, гравитационная колонка, пневматический канал.

**■ Для цитирования:** Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы гравитационно-пневматического очистителя семян сои // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 27-32. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-27-32. EDN CYQEBA.

## Substantiation of the Design and Layout Scheme for the Gravity-Pneumatic Soybean Seed Cleaner

**Viktor G. Khamuev,**  
Ph.D.(Eng), leading researcher,  
e-mail: victor250476@yandex.ru;

**Stanislav A. Gerasimenko,**  
junior researcher,  
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** It is shown that scientific research into the intensification of soybean seed separation processes is necessary for developing new type purification technologies that eliminate the shortcomings of traditional machines, as well as achieving more favorable technical and economic indicators of grain cleaning equipment. (*Research purpose*) To substantiate the design parameters of a cleaning and sorting plant for highly efficient separation of soybean seeds. (*Materials and methods*) We used a developed prototype model of the plant for cleaning soybean seeds, consisting of a gravity column and a pneumatic cleaning and sorting channel. The number of combs in the gravity column and the gap between the comb bars were substantiated. Subject to different supply of material, the completeness of separating a large impurity was determined in a gravity column, a light impurity – in the first section of the channel, soybean halves – in the second section of the channel, small and puny soybean seeds – in the third one. (*Results*

and discussion) The optimal number of combs for the gravity column was set to 10 pieces with a gap between the comb bars of 10 millimeters, thus providing the separation efficiency of 99.3 percent. It was obtained that the optimal ratio between the width of the narrowing partition and the 50-millimeters depth of the channel section equals 0.37. The width of the narrowing partitions was calculated to be 55.5 millimeters; the optimal supply of soybeans is 2.5 tons per hour, thus providing the separation completeness in the gravity column of no less than 95 percent, and that in the pneumatic channel of no less than 98 percent. (Conclusions) It was determined that the intensification of the soybean seed separation process is possible by the combined use of a gravity column and a pneumatic separating device, which can increase the productivity and efficiency of soybean cleaning by 20 percent or more. **Keywords:** soybean seeds, seed cleaning, seed sorting, seed separation, gravity column, pneumatic channel.

**For citation:** Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Obosnovanie konstruktivno-komponovochnoy skhemy gravitatsionno-pnevmaticheskogo ochestitelya semyan soi [Substantiation of the design and layout scheme for the gravity-pneumatic soybean seed cleaner]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 27-32 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-27-32. EDN CYQEBA.

Основным рабочим органом в оборудовании для очистки сои остается решет, где выделение примесей стало простой отработанной технологией [1-3]. Одни из самых популярных воздушно-решетных зерноочистительных машин в хозяйствах РФ – *Petkus K-531, ОВС-25, ЗВС-20А* и др [4-6]. Тем не менее решетным машинам присущи свои недостатки, например, очистка материала от мелких примесей ведет к забиванию отверстий решет, что уменьшает производительность [7-9]. Специальные очищающие устройства усложняют конструкцию, увеличивают энерго- и металлоемкость техники [10-12]. Для высокопроизводительных машин с большими динамическими нагрузками требуется сооружение специальных фундаментов, что ведет к удорожанию комплексов для послеуборочной обработки сои (СНиП 2.02.05-87).

Интенсификация сепарации семян сои базируется на технологиях очистки нового типа, исключающих недостатки традиционных машин, с более выгодными технико-экономическими показателями зерноочистительного оборудования [13-15].

**Цель исследования** – обоснование конструктивных параметров очистительно-сортировальной установки для высокоэффективной сепарации семян сои.

**Материалы и методы.** Исследования проводили на разработанном в ФНАЦ ВИМ макетном образце установки для очистки семян сои (рис. 1).

Исходный материал (соя после уборки) подается в приемный бункер, затем поступает в гравитационную колонку, где движется вниз самотеком по криволинейным поверхностям гребенок, установленных каскадом. Крупная примесь (камни, кусочки земли, недомолоченные стручки сои) сходом выводится из гравитационной колонки. В пневмоочистительном канале под воздействием вертикально восходящих воздушных потоков, создаваемых вентиляторами, происходит выделение легких примесей, половинок сои и семян с наименьшим удельным весом [16-18].

Мелкие примеси выносятся в осадочные камеры. Пыль, проходя через вентилятор, поступает в матер-

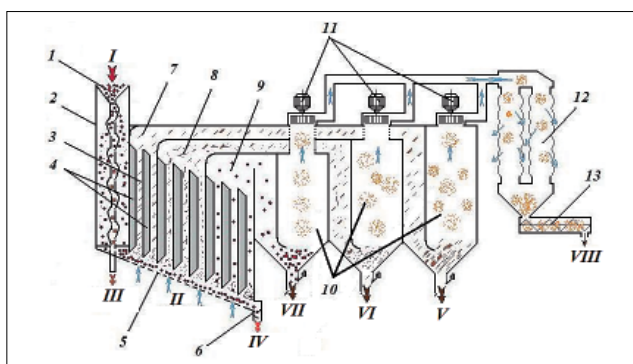


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема макетного образца очистителя семян сои: 1 – приемный бункер; 2 – гравитационная колонка; 3 – пневматический канал; 4 – сужающие перегородки; 5 – поддерживающая сетка; 6 – вывод чистого материала; 7-9 – секции пневматического очистительно-сортировального канала; 10 – осадочные камеры; 11 – вентиляторы; 12 – фильтры; 13 – шнек; I – исходный материал; II – воздушный поток; III – крупная примесь; IV – очищенные семена сои; V – легкая примесь; VI – половинки семян; VII – фуражная фракция; VIII – пыль

Fig. 1. Design and layout diagram of a mock-up sample of a soybean seed cleaner: 1 – receiving hopper; 2 – gravity column; 3 – pneumatic channel; 4 – narrowing partitions; 5 – supporting grid; 6 – purified product output; 7-9 sections of the pneumatic cleaning and sorting channel; 10 – sedimentary chambers; 11 – fans; 12 – filters; 13 – auger; I – source material; II – air flow; III – large impurity; IV – shelled soybean seeds; V – light impurity; VI – soy halves; VII – soybean fodder; VIII – dust

чатые фильтры пылесборника, откуда выводится транспортером.

В опытах обосновывали:

- количество гребенок  $N$  в гравитационной колонке и зазор  $C$  между прутками гребенок;
- оптимальное соотношение ширины  $b$  сужающей перегородки и глубины  $d=150$  мм секции канала ( $b/d$ ), чтобы удельная зерновая нагрузка в канале составляла  $3 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{ч}$ . Ширина перегородок: 0 (без перегородок), 30, 60, 90 и 120 мм, угол  $\alpha$  скоса перегородки –  $45^\circ$ .

Затем определяли полноту выделения крупной примеси в гравитационной колонке, легкой примеси в I секции канала, половинок сои во II секции канала, мелких и щуплых семян сои (проход через решето диаметром 3 мм) в III секции канала при различной подаче материала на очистку.

Количество выносимых в отходы семян сои в исследованиях соответствовало исходным требованиям (ИТ) на основные технологические операции послеуборочной обработки семян [19-21].

Зерновая смесь влажностью 11,9% состояла из семян сои чистой 96,11%, крупной примеси (камни и кусочки земли) – 0,68%, легкой примеси (оболочка бобов) – 1,33%, мелких и щуплых семян – 0,71%, половинок – 1,17%.

Опыты проводили в трехкратной повторности, погрешность – менее 5% при доверительной вероятности 0,9.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Выделение крупной примеси наиболее результативно, если в гравитационной колонке 10 гребенок, а зазоры между их прутками равны 10 мм (рис. 2). Эффективность сепарации составляет 99,3%, то есть при 100%-ном выделении крупной примеси потери основного компонента составляют 0,7%, что соответствует ИТ [13-15].

Если зазоры между прутками меньше – 8 мм, то некоторая часть сои не проходит через гребенки и попадает вместе с примесью в отходы, что повышает потери сои. Эффективность очистки равна 82,3%. Если зазоры увеличить до 12 мм, то через гребенки вместе с основным материалом проходят крупные примеси (уменьшается полнота выделения примеси). В этом случае эффективность очистки не превышает 77,9%.

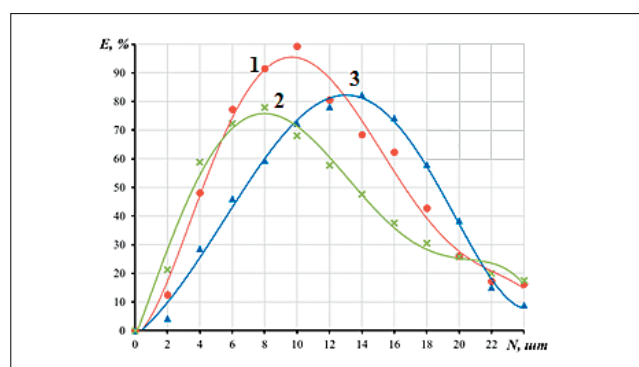


Рис. 2. Эффективность выделения крупной примеси в зависимости от количества гребенок при различных зазорах между прутками гребенок: 1 – 10 мм, 2 – 12 мм, 3 – 8 мм

Fig. 2. Efficiency of large impurity extraction ( $E$ ) depending on the number of combs ( $N$ ) at different clearances ( $C$ ) between the comb bars: 1 –  $C = 10$  mm, 2 –  $C = 12$  mm, 3 –  $C = 8$  mm

Полнота выделения примесей зависит от соотношения ширины сужающей перегородки  $b$  и глубины секции  $d$  пневматического очистительно-сортировального канала

(рис. 3). Оптимальное соотношение  $b/d$  при максимуме кривых для каждой примеси равно примерно 0,37, откуда ширина сужающих перегородок составит 55,5 мм.

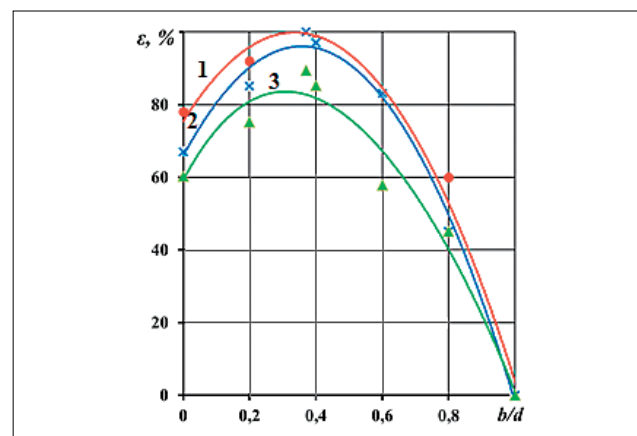


Рис. 3. Зависимость полноты выделения примесей от соотношения ширины сужающей перегородки  $b$  и глубины секции  $d$  пневматического очистительно-сортировального канала: 1 – легкие примеси; 2 – половинки сои; 3 – мелкая соя

Fig. 3. Dependence of the impurity extraction completeness ( $\epsilon$ ) on the ratio of the narrowing partition width ( $b$ ) and the depth of the pneumatic cleaning and sorting channel section ( $d$ ): 1 – light impurities; 2 – soybean halves; 3 – fine soybeans

Полнота выделения примесей  $\epsilon$  зависит от подачи материала  $Q$  в макетный образец очистительно-сортировальной установки (рис. 4). Оптимальная подача сои составляет 2,5 т/ч, при этом полнота выделе-

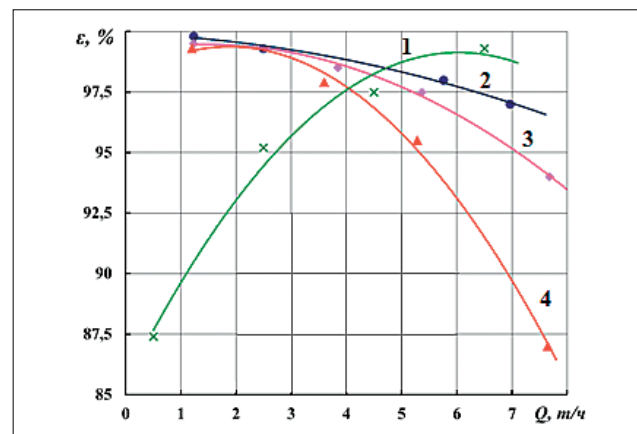


Рис. 4. Зависимость полноты выделения примесей  $\epsilon$  от подачи материала  $Q$  в макетный образец очистительно-сортировальной установки: 1 – крупные примеси; 2 – легкие примеси; 3 – битые пополам семена; 4 – мелкая соя

Fig. 4. Dependence of the impurity extraction completeness ( $\epsilon$ ) on feeding the material ( $Q$ ) into the prototype model of the cleaning and sorting plant: 1 – large impurities, 2 – light impurities, 3 – seeds broken into halves, 4 – fine soybeans

ния в пневматическом канале – не ниже 98%, а крупной примеси – не меньше 95%.

**Выводы.** Интенсификация сепарации семян сои возможна путем совместного применения гравитационной колонки с зигзагообразным каналом, образованным каскадом установленных гребенок, и пневматического сепарирующего канала с вертикаль-

но-восходящим воздушным потоком, где установлены сужающие перегородки. В результате увеличивается производительность, эффективность очистки повышается на 20% и более.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмедов А.Н., Ибодуллаева М.С.К., Рахматов Э.Р. Совершенствование процесса очистки семян сои // *Universum: технические науки*. 2022. N4-7(97). С. 16-20.
2. Смолянинов Ю.Н. Пути совершенствования технологии послеуборочной обработки зерна // *Бюллетень науки и практики*. 2017. N11(24). С. 97-102.
3. Бельшклина М.Е., Старостин И.А., Загоруйко М.Г. Пути совершенствования технологии уборки и послеуборочной доработки сои // *Аграрный научный журнал*. 2020. N8. С. 4-9.
4. Харитонов М.К., Гиевский А.М., Оробинский В.И., Чернышов А.В., Баскаков И.В. Повышение эффективности работы решётной очистки зерноочистительных машин // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2020. Т. 13. N1(64). С. 19-27.
5. Припоров И.Е., Слепченко Ю.В. Перспективы использования компьютерных устройств в воздушно-решётных зерноочистительных машинах // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020. N1(81). С. 93-97.
6. Николаев В.А. Определение параметров траектории зерновки при ее падении на решето полуавтоматической зерноочистительной машины // *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2019. N4(29). С. 92-101.
7. Измайлов А.Ю., Лачуга Ю.Ф., 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. 2-8.
8. Хамуев В.Г. Обоснование параметров гравитационной очистительной колонки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 26-32.
9. Дорохов А.С., Московский М.Н., Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Определение оптимальных кинематических параметров решетного стана при сепарации образцов селекционных семян // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2018. N6(88). С. 4-10.
10. Московский М.Н., Хамуев В.Г., Герасименко С.А., Борзенко С.И., Кынев Н.Г. Производственные испытания зерноочистительной машины с программно-аппаратным управлением в составе технологической линии // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N4 (45). С. 112-117.
11. Лачуга Ю.Ф., Назин Е.И., Митин С.Г., Орлик Л.С., Краснощек Н.В., Липкович Э.И. и др. Стратегия машинно-технологического обеспечения производства сельскохозяйственной продукции России на период до 2010 г. М.: ВИМ. 2003. 49 с.
12. Жалнин Э.В. Аксиоматизация земледельческой механики. М.: ВИМ. 2002. 204 с.
13. Moskovsky M.N., Chaava M.M., Chumak I.V. Development of a structural-functional model of a single production process obtaining seed material in farms. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. N6. 2157-2165.
14. Елизаров В.П., Антышев Н.М., Бейлис В.М., Шевцов В.Г. Исходные требования на технологические операции в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N1. С. 11-14.
15. Зюлин А.Н., Стрелков А.А. Гравитационный зерноочиститель: зависимость полноты просеивания фракций зернового материала от числа решеток // *Достижения науки и техники АПК*. 2001. N10. С. 25.
16. Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А., Зиганшин Б.Г. Разработка и исследование машины для воздушной очистки семян трав и зерна // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 16. N1(61). С. 84-89.
17. Цепляев А.Н., Габидулина А.Е., Харлашин А.В., Богданов С.И. Аналитическое определение абсолютной скорости семени мелкозерновых культур при разделении вороха на роторном сепараторе // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2019. N2(54). С. 338-346.
18. Цепляев А.Н., Габидулина А.Е., Харлашин А.В. Экспериментальное определение параметров пневмомеханического сепаратора на основе многофакторного эксперимента // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2019. N4(56). С. 282-290.
19. Doshi J.S., Patel V.B., Patel J.B., Patel J.A. Quantification of Quality Improvement in Wheat Seed Processing. *Journal of Agricultural Engineering*. 2013. Vol. 4. Issue 159. 83-86.
20. Kroulik M., Hüla J., Rybka A., Honzík I. Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. 62. 56-63.
21. Łukaszuk J., Molenda M., Horabik J., Szot B., Montross M.D. Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering*. 2008. 54. 50-57.

## REFERENCES

1. Akhmedov A.N., Ibdullaeva M.S.K., Rakhmatov E.R. Sovershenstvovanie protsessa oчитki semyan soi [Improving the soybean seed cleaning process]. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2022. N4-7(97). 16-20 (In Russian).
2. Smolyaninov Yu.N. Puti sovershenstvovaniya tekhnologii posleuborochnoy obrabotki zerna [Perfection of technology postharvest processing of grain]. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2017. N11(24). 97-102 (In Russian).
3. Belyshkina M.E., Starostin I.A., Zagoruyko M.G. Puti sovershenstvovaniya tekhnologii uborki i posleuborochnoy dorabotki soi [Ways to improve cleaning technology and post-harvest processing of soybeans]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2020. N8. 4-9 (In Russian).
4. Kharitonov M.K., Gievskiy A.M., Orobinskiy V.I., Chernyshov A.V., Baskakov I.V. Povyshenie effektivnosti raboty reshetnoy oчитki zernooчитitel'nykh mashin [Improving the efficiency of screen-type separation in grain cleaning machines]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. Vol. 13. N1(64). 19-27 (In Russian).
5. Priporov I.E., Slepchenko Yu.V. Perspektivy ispol'zovaniya komp'yuternykh ustroystv v vozdušno-reshetnykh zernooчитitel'nykh mashinakh [Prospects for the use of computer devices in air-sieve grain cleaning machines]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. N1(81). 93-97 (In Russian).
6. Nikolaev V.A. Opredelenie parametrov traektorii zernovki pri et padenii na reshetu poluavtomaticheskoy zernooчитitel'noy mashiny [Determination of the trajectory parameters of grain when falling onto a sieve of semi-automatic grain cleaning machine]. *Agrarnyy vestnik Verkhnevolzh'ya*. 2019. N4(29). 92-101 (In Russian).
7. Izmaylov A.Yu., Lachuga Yu.F., Zyulin A.N. Razrabotka i vnedrenie vysokoeffektivnykh, resurso- i energosberegayushchikh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv posleuborochnoy obrabotki zerna i podgotovki semyan [Development and implementation of highly efficient, resource- and energy-saving approaches and technologies for post-harvest grain processing and seed preparation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009. N1. 2-8 (In Russian).
8. Khamuev V.G. Obosnovanie parametrov gravitatsionnoy oчитitel'noy kolonki [Justification of the gravitational seed cleaning system parameters]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 26-32 (In Russian).
9. Dorokhov A.S., Moskovskiy M.N., Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Opredelenie optimal'nykh kinematicheskikh parametrov reshetnogo stana pri separatsii obraztsov selektsionnykh semyan [Determining optimal kinematic parameters of a screen shoe used for separating breeding seed samples]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2018. N6(88). 4-10 (In Russian).
10. Moskovskiy M.N., Khamuev V.G., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I., Kynev N.G. Proizvodstvennyye ispytaniya zernooчитitel'noy mashiny s programmno-apparatnym upravleniem v sostave tekhnologicheskoy linii [Production tests of a grain-cleaning machine with software and hardware control as part of a technological line]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021. Vol. 68. N4 (45). 112-117 (In Russian).
11. Lachuga Yu.F., Nazin E.I., Mitin S.G., Orsik L.S., Krasnoshechekov N.V., Lipkovich E.I., et al. Strategiya mashinno-tekhnologicheskogo obespecheniya proizvodstva sel'skokhozyaystvennoy produktsii Rossii na period do 2010 g [Strategy for machine and technological support of agricultural production in Russia for the period up to 2010]. Moscow: VIM. 2003. 49 (In Russian).
12. Zhalnin E.V. Aksiomatizatsiya zemledel'cheskoy mekhaniki [Axiomatization of agricultural mechanics]. Moscow: VIM. 2002. 204 (In Russian).
13. Moskovskiy M.N., Chaava M.M., Chumak I.V. Development of a structural-functional model of a single production process obtaining seed material in farms. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. N6. 2157-2165 (In English).
14. Elizarov V.P., Antyshev N.M., Beylis V.M., Shevtsov V.G. Iskhodnye trebovaniya na tekhnologicheskie operatsii v rasstenevodstve [Initial requirements for technological operations in crop production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2011. N1. 11-14 (In Russian).
15. Zyulin A.N., Strelkov A.A. Gravitatsionnyy zernooчитitel': zavisimost' polnoty proseivaniya fraktsiy zernovogo materiala ot chisla reshetok [Gravity grain cleaner: dependence between the completeness of sifting grain material fractions and the number of gratings]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2001. N10. 25 (In Russian).
16. Savinykh P.A., Sychugov Yu.V., Kazakov V.A., Ziganshin B.G. Razrabotka i issledovanie mashiny dlya vozdušnoy oчитki semyan trav i zerna [Development and research of a machine for air cleaning of grass and grain seeds]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021. Vol. 16. N1(61). 84-89 (In Russian).
17. Tseplyaev A.N., Gabidulina A.E., Kharlashin A.V., Bogdanov S.I. Analiticheskoe opredelenie absolyutnoy skorosti sementi melkosemyannykh kul'tur pri razdelenii vorokha na rotnom separatore [Analytical determination of the absolute velocity of the seed of small-seed crops under the splitting spark on a rotary separator]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2019. N2(54). 338-346 (In Russian).
18. Tseplyaev A.N., Gabidulina A.E., Kharlashin A.V. Eksperimental'noe opredelenie parametrov pnevmomekhanicheskogo separatora na osnove mnogofaktornogo eksperimenta [Experimental determination of the parameters of the pneumatic-mechanical separator based on a multi-factor experiment]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2019. N4(56). 282-290 (In Russian).

19. Doshi J.S., Patel V.B., Patel J.B., Patel J.A. Quantification of Quality Improvement in Wheat Seed Processing. *Journal of Agricultural Engineering*. 2013. Vol. 4. N159. 83-86 (In English).
20. Kroulík M., Hůla J., Rybka A., Honzík I. Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. 62. 56-63 (In English).
21. Łukaszuk J., Molenda M., Horabik J., Szot B., Montross M.D. Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering*. 2008. 54. 50-57 (In English).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Заявленный вклад соавторов:

Хамуев В.Г. – научное руководство, проведение опыта, формирование общих выводов, обобщение данных литературы, итоговая переработка статьи;  
Герасименко С.А. – проведение опыта, обработка данных опыта, составление начального варианта статьи, литературный анализ, доработка текста.

#### Coauthors' contribution:

Khamuev V.G. – scientific supervision, conducting the experiment, formulating general conclusions, summarizing the research literature, the manuscript final processing;  
Gerasimenko S.A. – conducting the experiment, processing the experiment data, working on the initial version of the article, literature review, the manuscript revision.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

20.04.2022  
17.08.2022

## Обоснование параметров полетного задания беспилотного воздушного судна для мультиспектральной аэрофотосъемки

**Рашид Курбанович Курбанов,**  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: celeba@outlook.com;

**Наталья Ивановна Захарова,**  
младший научный сотрудник,  
e-mail: smedia@vim.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Показали возможность сбора мультиспектральных и RGB-данных о состоянии сельскохозяйственных культур с помощью беспилотного воздушного судна. Отметим, что использование нескольких программ для создания полетного задания приводит к неэффективному использованию ресурсов беспилотного воздушного судна. (*Цель исследования*) Рассчитать параметры аэрофотосъемки с мультиспектральной и RGB-камерами для повышения эффективности использования ресурсов беспилотного воздушного судна. (*Материалы и методы*) Изучили спецификации характеристик RGB и мультиспектральных камер, устанавливаемых на беспилотник. Использовали результаты научных исследований по расчету параметров аэрофотосъемки: продольное и поперечное перекрытие, а также скорость полета беспилотного воздушного судна. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что рассчитанные значения продольного и поперечного перекрытия, а также скорости полета беспилотного воздушного судна для RGB-камеры Zenmuse X4S при совместной аэрофотосъемке с мультиспектральной камерой позволяют применять стандартные мобильные приложения для создания полетного задания. (*Выводы*) Определили, что полученные значения гарантируют создание качественных цифровых карт. Рассчитали параметры полетного задания, обеспечивающие эффективное использование ресурсов беспилотного воздушного судна, при одновременном использовании RGB-камеры Zenmuse X4S и одной из шести моделей мультиспектральных камер на борту беспилотного воздушного судна.

**Ключевые слова:** цифровое сельское хозяйство, беспилотное воздушное судно, аэрофотосъемка, мультиспектральная камера, полетное задание, перекрытие изображений.

**■ Для цитирования:** Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Обоснование параметров полетного задания беспилотного воздушного судна для мультиспектральной аэрофотосъемки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 33-39. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-33-39. EDN IQDDKQ.

## Justifying the Parameters for an Unmanned Aircraft Flight Missions of Multispectral Aerial Photography

**Rashid K. Kurbanov,**  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: celeba@outlook.com;

**Natalia I. Zakharova,**  
junior researcher,  
e-mail: smedia@vim.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper shows the possibility of collecting multispectral and RGB data on the crop condition using an unmanned aircraft. The use of several programs for creating a flight mission is likely to lead to the inefficient use of the unmanned aircraft resources. (*Research purpose*) To calculate the parameters of aerial photography with multispectral and RGB cameras to enable the improved efficiency of unmanned aircraft resources. (*Materials and methods*) The paper studies the specifications of RGB and multispectral cameras installed on the drone. The research uses the results of scientific research on the calculation of aerial photography parameters such as longitudinal and transverse overlap, as well as the flight speed of an unmanned aircraft. (*Results and discussion*) It is established that the calculated values of the longitudinal and transverse overlap for the Zenmuse X4S RGB camera, as well as the unmanned aircraft flight speed during the joint aerial photography with a multispectral camera, make it possible to use standard mobile applications to create a flight mission. (*Conclusions*) It is determined that the obtained values guarantee the creation of high-quality digital maps. The parameters for the flight mission are calculated ensuring the efficient exploitation of the unmanned aircraft resources, using simultaneously the Zenmuse X4S RGB camera and six multispectral

cameras on board the unmanned aircraft.

**Keywords:** digital agriculture, unmanned aerial vehicle, aerial photography, multispectral camera, flight mission, image overlap.p

**For citation:** Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Obosnovanie parametrov poletnogo zadaniya bespilotnogo vozdušnogo sudna dlya mul'tispektral'noy aerofotosemki [Justifying the parameters for an unmanned aircraft flight missions of multispectral aerial photography]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 33-39 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-33-39. EDN IQDDKQ.

Аэросъемка с беспилотного воздушного судна (БВС) считается неотъемлемой частью цифрового сельского хозяйства [1-2]. Она подразумевает сбор данных с различных оптических и лазерных приборов [3-4]. При аэросъемке сельскохозяйственных культур целесообразно использовать RGB и мультиспектральные камеры [5-6]. Для повышения эффективности использования ресурсов БВС на борт устанавливаются две камеры одновременно. При этом на рынке отсутствуют серийно выпускаемые подвесы для крепления мультиспектральных камер на БВС [7]. Агрономы и исследователи разрабатывают подобные подвесы самостоятельно (рис. 1).



Рис. 1. Подвес для мультиспектральной камеры MicaSense Altum на БВС DJI Matrice 200 v2, разработанный сотрудниками ФНАЦ ВИМ: 1 – общий вид; 2 – крепление мультиспектральной камеры; 3 – крепление датчика освещенности  
Fig. 1. Gimbal for installing the MicaSense Altum multispectral camera on the DJI Matrice 200 v2 UAV, developed by the staff at the Federal Scientific Agroengineering Center VIM: 1 – general view; 2 – fastening of the multispectral camera; 3 – light sensor mount

После подготовки беспилотника создают полетное задание с помощью специального программного

обеспечения для мобильных устройств, учитывающее технические характеристики БВС и параметры камеры [8]. Полеты выполняются полностью в автоматическом режиме. Наряду с полетным заданием для проведения аэрофотосъемки необходимо задать параметры для мультиспектральной камеры, подключившись к ней через Wi-Fi [9-10]. Использование нескольких программ увеличивает время на создание полетного задания, а отсутствие синхронизации между ними приводит к повторным полетам. В итоге возрастают затраты общего времени проведения аэрофотосъемки, а ресурсы БВС используются неэффективно.

При полете с двумя камерами на борту БВС необходимо устанавливать поперечное и продольное перекрытие изображений, а также скорость полета БВС таким образом, чтобы обе камеры успели создать и



Рис. 2. Исследуемые камеры: / Fig. 2. Cameras under research: 1 – DJI Zenmuse X4S; 2 – Parrot Sequoia; 3 – MicaSense RE-P; 4 – MicaSense Altum-PT; 5 – Sentera Single Sensor; 6 – Sentera Double 4k; 7 – Sentera 6X

| Таблица 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                 | Table 1        |                |                    |                       |                   |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|-----------------------|-------------------|------------|
| ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕР / CAMERA SPECIFICATIONS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                 |                |                |                    |                       |                   |            |
| Значения*<br>Values*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | DJI Zenmuse X4S | Parrot Sequoia | MicaSense RE-P | MicaSense Altum-PT | Sentera Single Sensor | Sentera Double 4k | Sentera 6X |
| t                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3               | 1              | 0,3            | 0,5                | 0,5                   | 0,5               | 5          |
| b <sub>y</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 3648            | 860            | 1088           | 1544               | 950                   | 3000              | 3888       |
| b <sub>x</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 4864            | 1280           | 1456           | 2064               | 1248                  | 4000              | 5184       |
| F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 8,8             | 4,77           | 5,5            | 4,77               | 4.14                  | 5.4               | 7.2        |
| SW                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 11,7            | 7,5            | 5,14           | 4,33               | 4,66                  | 6,2               | 15,9       |
| <div>*t – время, затрачиваемое камерой для создания и записи изображения с одной точки съемки, с<br/>the time taken by the camera to create and record an image from one shooting point, s;<br/>b<sub>x</sub> – ширина изображения, пикс / image width, pix;<br/>b<sub>y</sub> – длина изображения, пикс / image length, pix;<br/>F – фокусное расстояние, мм / focal length, mm;<br/>S<sub>w</sub> – ширина матрицы, мм / the matrix width, mm</div> |                 |                |                |                    |                       |                   |            |

записать изображения на накопитель с заданным перекрытием.

**Цель исследования** – рассчитать параметры аэрофотосъемки с одновременным использованием двух камер – RGB и мультиспектральной – для повышения эффективности использования заряда аккумуляторной батареи и исключения наличия артефактов на цифровой карте беспилотного воздушного судна.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** В исследовании использовали технические характеристики RGB-камеры DJI Zenmuse X4S и шести мультиспектральных камер: Parrot Sequoia, MicaSense RE-P, MicaSense Altum-PT, Sentera Single Sensor, Sentera Double 4k, Sentera 6X (рис. 2, табл. 1) [11-13]. Технические характеристики RGB-камеры Zenmuse X4S совпадают с RGB-камерой, встроенной в БВС DJI Phantom 4 Pro, используемое в различных исследованиях сельхозкультур [14-16].

При вычислении поперечного перекрытия использовали формулу расчета расстояния между центрами соседних изображений  $B_x$ , см:

$$B_x = \frac{b_x \cdot (100 - P_x)}{100} \cdot GSD, \quad (1)$$

где  $b_x$  – ширина изображения, пикс.;

$P_x$  – продольное перекрытие, %;

$GSD$  – пространственное разрешение на местности, см/пикс.

Аналогично можно определить расстояние между центрами смежных изображений  $B_y$ , см:

$$B_y = \frac{b_y \cdot (100 - P_y)}{100} \cdot GSD, \quad (2)$$

где  $b_y$  – ширина изображения, пикс.;

$P_y$  – поперечное перекрытие, %.

Пространственное разрешение на местности ( $GSD$ ) зависит от высоты полета [17-18]. Его значения рассчитывают исходя из технических характеристик камер (табл. 2).

Скорость полета  $V$ , м/с, вычисляют по формуле:

$$V = \frac{B_x}{t \cdot 100}, \quad (3)$$

где  $t$  – время, затрачиваемое камерой для создания и

записи изображения с одной точки съемки, с.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** При аэросъемке с двумя камерами на борту БВС в мобильном приложении по созданию полетного задания необходимо указать значение продольного и поперечного перекрытия [19-20]. Перекрытие для RGB-камеры рассчитывали с учетом спецификаций характеристик мультиспектральных камер (табл. 1 и 2).

В зависимости от высоты съемки меняется расстояние между центрами соседних изображений  $B_x$ . Рассчитав значение  $B_x$  для мультиспектральной камеры по формуле (1), можно определить значение поперечного перекрытия для RGB-камеры:

$$P_x = 100 - \frac{B_x \cdot 100}{GSD \cdot b_x}. \quad (4)$$

Получаем зависимости поперечного перекрытия RGB и мультиспектральной камеры (рис. 3).

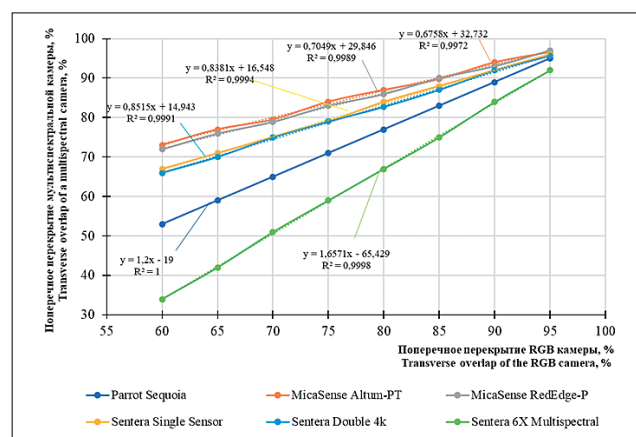


Рис. 3. Зависимость поперечного перекрытия камер RGB и мультиспектральной

Fig. 3. Dependence between the transverse overlap of RGB camera and that of multispectral camera

При совместном использовании камер DJI Zenmuse X4S + Parrot Sequoia и DJI Zenmuse X4S + Sentera 6X значения поперечного перекрытия для RGB-камеры ниже минимального, то есть меньше 70%. Это означает, что при фотограмметрической обработке данных RGB появляются артефакты на карте и ошибки

Таблица 2

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КАМЕР НА МЕСТНОСТИ, см/ПИКС. / SPATIAL RESOLUTION OF CAMERAS ON THE GROUND, CM/PIXEL

| Модели<br>Models      | Высота полета БВС, м / UAV flight altitude, m |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|-----------------------|-----------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                       | 30                                            | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 110  | 120   | 130   | 140   | 150   |
| Zenmuse X4S           | 0,82                                          | 1,09 | 1,37 | 1,64 | 1,91 | 2,19 | 2,46 | 2,73 | 3,01 | 3,28  | 3,55  | 3,83  | 4,1   |
| Parrot Sequoia        | 3,7                                           | 4,9  | 6,2  | 7,4  | 8,6  | 9,9  | 11,1 | 12,4 | 13,6 | 14,8  | 16,1  | 17,3  | 18,6  |
| MicaSense Altum-PT    | 1,32                                          | 1,76 | 2,2  | 2,64 | 3,08 | 3,52 | 3,96 | 4,4  | 4,84 | 5,28  | 5,72  | 6,16  | 6,6   |
| MicaSense ResEdge-P   | 1,93                                          | 2,57 | 3,21 | 3,85 | 4,49 | 5,13 | 5,78 | 6,42 | 7,06 | 7,7   | 8,34  | 8,99  | 9,63  |
| Sentera Single Sensor | 2,71                                          | 3,61 | 4,51 | 5,41 | 6,31 | 7,22 | 8,12 | 9,02 | 9,92 | 10,82 | 11,73 | 12,63 | 13,53 |
| Sentera Double 4k     | 0,86                                          | 1,15 | 1,44 | 1,72 | 2,01 | 2,3  | 2,58 | 2,87 | 3,16 | 3,44  | 3,73  | 4,02  | 4,31  |
| Sentera 6X            | 1,28                                          | 1,7  | 2,13 | 2,56 | 2,98 | 3,41 | 3,83 | 4,26 | 4,69 | 5,11  | 5,54  | 5,96  | 6,39  |

в проекте. При одновременном использовании камер *DJI Zenmuse X4S* и *Senterra 6X* значения поперечного перекрытия 59 и 67% недостаточны для создания цифровых карт и также приведут к появлению артефактов на них. Эти значения поперечного перекрытия необходимо установить равными 70%.

Целесообразно для мультиспектральных камер использовать поперечное перекрытие от 75 до 85%. В связи с этим значения поперечного перекрытия для RGB-камеры установлены в указанном выше диапазоне (табл. 3).

ника. При высокой скорости камера не успевает сделать снимки с нужным перекрытием, при низкой неэффективно расходуются аккумуляторные батареи. Определили скорость БВС с двумя камерами на борту в зависимости от требований перекрытия и высоты полета (табл. 5). С набором высоты полета скорость возрастает. При увеличении продольного перекрытия она снижается, а изменение поперечного перекрытия не влияет на скорость БВС. Полученные значения скорости полета БВС обеспечивают его максимально возможное движение с двумя камерами на

| Таблица 3<br>ПОПЕРЕЧНОЕ ПЕРЕКРЫТИЕ ДЛЯ RGB-КАМЕРЫ DJI ZENMUSE X4S ПРИ ПОЛЕТЕ С МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМИ КАМЕРАМИ<br>TRANSVERSE OVERLAP FOR DJI ZENMUSE X4S RGB CAMERA DURING THE FLIGHT WITH MULTISPECTRAL CAMERAS, % |                |                    |                     |                        |                    |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|---------------------|------------------------|--------------------|-------------|
| Необходимое перекрытие для мультиспектральной камеры<br>Necessary overlap for a multispectral camera                                                                                                             | Parrot Sequoia | MicaSense Altum-PT | MicaSense ResEdge-P | Senterra Single Sensor | Senterra Double 4k | Senterra 6X |
| 75                                                                                                                                                                                                               | 71             | 83                 | 83                  | 79                     | 79                 | 70*         |
| 80                                                                                                                                                                                                               | 77             | 87                 | 86                  | 84                     | 83                 | 70*         |
| 85                                                                                                                                                                                                               | 83             | 90                 | 90                  | 88                     | 87                 | 75          |

\*Значения поперечного перекрытия установлены на уровне 70% в соответствии с требованиями и рекомендациям программ фотограмметрической обработки.  
\* Transverse overlap values are set at 70% in accordance with the requirements and recommendations of photogrammetric processing programs

| Таблица 4<br>ПРОДОЛЬНОЕ ПЕРЕКРЫТИЕ ДЛЯ RGB-КАМЕРЫ DJI ZENMUSE X4S ПРИ ПОЛЕТЕ С МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМИ КАМЕРАМИ, %<br>LONGITUDINAL OVERLAP FOR DJI ZENMUSE X4S RGB CAMERA DURING THE FLIGHT WITH MULTISPECTRAL CAMERAS, % |                |                    |                     |                        |                    |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|---------------------|------------------------|--------------------|-------------|
| Необходимое перекрытие для мультиспектральной камеры<br>Necessary overlap for a multispectral camera                                                                                                                  | Parrot Sequoia | MicaSense Altum-PT | MicaSense ResEdge-P | Senterra Single Sensor | Senterra Double 4k | Senterra 6X |
| 75                                                                                                                                                                                                                    | 74             | 83                 | 83                  | 79                     | 79                 | 70*         |
| 80                                                                                                                                                                                                                    | 79             | 87                 | 86                  | 83                     | 83                 | 70*         |
| 85                                                                                                                                                                                                                    | 84             | 90                 | 90                  | 88                     | 87                 | 75          |

\*Значения продольного перекрытия установлены на уровне 70% в соответствии с требованиями и рекомендациям программ фотограмметрической обработки.  
\* Longitudinal overlap values are set at 70% in accordance with the requirements and recommendations of photogrammetric processing programs.

Рассчитав расстояния между центрами смежных изображений  $B_y$  для мультиспектральной камеры по формуле (2), найдем значение продольного перекрытия для RGB-камеры:

$$P_y = 100 - \frac{B_y \cdot 100}{GSD \cdot b_y}, \quad (5)$$

Рассчитали продольное перекрытие для RGB-камеры с учетом технических характеристик мультиспектральных камер (табл. 4). Вычисленные значения продольного перекрытия 59 и 67% не обеспечивают требуемого качества [9]. Уровень 70% – минимально необходимый для исключения артефактов и ошибок по требованиям и рекомендациям программ фотограмметрической обработки данных аэрофотосъемки.

Другим параметром, влияющим на качество аэрофотоснимков, считается скорость полета беспилот-

бору. Если скорость ниже, то использование аккумуляторной батареи неэффективно, а если выше, то происходит искажение изображений и пропуск кадров с заданным продольным перекрытием. При использовании камер *MicaSense* скорость БВС на высоте 30 м составит 1 м/с, а на высоте 150 м – 5 м/с при продольном перекрытии 85%. При мониторинге с камерами *Parrot Sequoia* и *Senterra 6X* значения поперечного и продольного перекрытий для RGB-камеры *Zenmuse X4S* ниже рекомендуемых для мультиспектральных камер (75; 80; 85%) и составляют: 71; 77; 83% и 70; 70; 75% соответственно. Это увеличивает максимально допустимую скорость БВС до 2,5 м/с на высоте 30 м и до 12,6 м/с на высоте 150 м при продольном перекрытии 75%, что повышает эффективность использования заряда аккумуляторной батареи БВС.

Таким образом, рассчитаны значения продольного и поперечного перекрытия, а также скорости по-

Таблица 5

Table 5

**СКОРОСТЬ ПОЛЕТА БВС В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ И ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКРЫТИЯ, м/с**  
**FLIGHT SPEED OF THE UAV DEPENDING ON THE ALTITUDE AND OVERLAP PARAMETERS, m/s**

| Модель камеры<br>Camera model | Необходимое перекрытие<br>для мультиспектральной камеры, %<br>Required overlap for a multispectral camera, % | Поперечное перекрытие RGB-камеры, %<br>Transverse overlap of RGB-camera, % | Продольное перекрытие RGB-камеры, %<br>Longitudinal overlap of RGB-camera, % | Высота полета БВС, м<br>UAV flight altitude, m |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                               |                                                                                                              |                                                                            |                                                                              |                                                |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|                               |                                                                                                              |                                                                            |                                                                              | 30                                             | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 | 110 | 120  | 130  | 140  | 150  |
| Parrot Sequoia                | 75                                                                                                           | 71                                                                         | 74                                                                           | 2,6                                            | 3,4 | 4,3 | 5,2 | 6,0 | 6,9 | 7,8 | 8,6 | 9,5 | 10,4 | 11,2 | 12,1 | 13,0 |
|                               | 80                                                                                                           | 77                                                                         | 79                                                                           | 2,1                                            | 2,8 | 3,5 | 4,2 | 4,9 | 5,6 | 6,3 | 7,0 | 7,7 | 8,4  | 9,1  | 9,8  | 10,5 |
|                               | 85                                                                                                           | 83                                                                         | 84                                                                           | 1,6                                            | 2,1 | 2,7 | 3,2 | 3,7 | 4,3 | 4,8 | 5,3 | 5,9 | 6,4  | 6,9  | 7,5  | 8,0  |
| MicaSense Altum-PT            | 75                                                                                                           | 83                                                                         | 83                                                                           | 1,7                                            | 2,3 | 2,8 | 3,4 | 3,9 | 4,5 | 5,1 | 5,6 | 6,2 | 6,8  | 7,3  | 7,9  | 8,5  |
|                               | 80                                                                                                           | 87                                                                         | 87                                                                           | 1,3                                            | 1,7 | 2,2 | 2,6 | 3,0 | 3,5 | 3,9 | 4,3 | 4,8 | 5,2  | 5,6  | 6,1  | 6,5  |
|                               | 85                                                                                                           | 90                                                                         | 90                                                                           | 1,0                                            | 1,3 | 1,7 | 2,0 | 2,3 | 2,7 | 3,0 | 3,3 | 3,7 | 4,0  | 4,3  | 4,7  | 5,0  |
| MicaSense RedEdge-P           | 75                                                                                                           | 83                                                                         | 83                                                                           | 1,7                                            | 2,3 | 2,8 | 3,4 | 3,9 | 4,5 | 5,1 | 5,6 | 6,2 | 6,8  | 7,3  | 7,9  | 8,5  |
|                               | 80                                                                                                           | 86                                                                         | 86                                                                           | 1,4                                            | 1,9 | 2,3 | 2,8 | 3,3 | 3,7 | 4,2 | 4,6 | 5,1 | 5,6  | 6,0  | 6,5  | 7,0  |
|                               | 85                                                                                                           | 90                                                                         | 90                                                                           | 1,0                                            | 1,3 | 1,7 | 2,0 | 2,3 | 2,7 | 3,0 | 3,3 | 3,7 | 4,0  | 4,3  | 4,7  | 5,0  |
| Sentera Single Sensor         | 75                                                                                                           | 79                                                                         | 79                                                                           | 2,1                                            | 2,8 | 3,5 | 4,2 | 4,9 | 5,6 | 6,3 | 7,0 | 7,7 | 8,4  | 9,1  | 9,8  | 10,5 |
|                               | 80                                                                                                           | 84                                                                         | 83                                                                           | 1,7                                            | 2,3 | 2,8 | 3,4 | 3,9 | 4,5 | 5,1 | 5,6 | 6,2 | 6,8  | 7,3  | 7,9  | 8,5  |
|                               | 85                                                                                                           | 88                                                                         | 88                                                                           | 1,2                                            | 1,6 | 2,0 | 2,4 | 2,8 | 3,2 | 3,6 | 4,0 | 4,4 | 4,8  | 5,2  | 5,6  | 6,0  |
| Sentera Double 4k             | 75                                                                                                           | 79                                                                         | 79                                                                           | 2,1                                            | 2,8 | 3,5 | 4,2 | 4,9 | 5,6 | 6,3 | 7,0 | 7,7 | 8,4  | 9,1  | 9,8  | 10,5 |
|                               | 80                                                                                                           | 83                                                                         | 83                                                                           | 1,7                                            | 2,3 | 2,8 | 3,4 | 3,9 | 4,5 | 5,1 | 5,6 | 6,2 | 6,8  | 7,3  | 7,9  | 8,5  |
|                               | 85                                                                                                           | 87                                                                         | 87                                                                           | 1,3                                            | 1,7 | 2,2 | 2,6 | 3,0 | 3,5 | 3,9 | 4,3 | 4,8 | 5,2  | 5,6  | 6,1  | 6,5  |
| Sentera 6X                    | 75                                                                                                           | 70                                                                         | 70                                                                           | 2,5                                            | 3,3 | 4,1 | 4,9 | 5,7 | 6,6 | 7,4 | 8,2 | 9,0 | 9,8  | 10,6 | 11,5 | 12,3 |
|                               | 80                                                                                                           | 70                                                                         | 70                                                                           | 2,0                                            | 2,6 | 3,3 | 3,9 | 4,6 | 5,3 | 5,9 | 6,6 | 7,2 | 7,9  | 8,5  | 9,2  | 9,9  |
|                               | 85                                                                                                           | 75                                                                         | 75                                                                           | 1,5                                            | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0  | 6,5  | 7,0  | 7,5  |

лета БВС для RGB-камеры *Zenmuse X4S* при совместной аэрофотосъемке с мультиспектральной камерой. Полученные значения позволяют оптимизировать параметры аэрофотосъемки и использовать стандартные мобильные приложения для создания полетного задания.

**Выводы.** Рассчитали значения поперечного и продольного перекрытия изображений, а также скорость полета БВС при одновременном применении RGB-камеры *Zenmuse X4S* и одной из шести мультиспектральных камер на борту БВС.

Рекомендуется использование мультиспектральной камеры *Parrot Sequoia* или *Sentera 6X* с камерой *Zenmuse X4S* для аэрофотосъемки. Такое сочетание увеличивает максимально допустимую скорость БВС до 12,6 м/с на высоте 150 м при минимально необхо-

димом для мультиспектральной камеры продольном перекрытии 75%.

Полученные значения гарантируют создание качественных цифровых карт. Рассчитанные максимальные показатели скорости полета БВС обеспечивают эффективное использование заряда аккумуляторной батареи БВС.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Pathak H., Igathinathane C., Zhang Z., Archer D., Hendrickson J. A review of unmanned aerial vehicle-based methods for plant stand count evaluation in row crops. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. N198. 107064.
3. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. N15(4). С. 6-10.
4. Аникеева И.А. Оценка рекомендуемых и допустимых значений показателей изобразительного качества по материалам, полученным различными аэрофотосъемочными системами для целей картографирования // *Геодезия и картография*. 2021. N 9. 30-40.
5. Акинчин А.В., Левшаков Л.В., Линков С.А. и др. Информационные технологии в системе точного земледелия // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. N9. С. 16-21.
6. Yishan J., Zhen C., Qian C., Rong L., Mengwei L., Xin Y., Guan L. Estimation of plant height and yield based on UAV imagery in faba bean (*Vicia faba* L.). *Plant Methods*. 2022. N18(1). 26.
7. Титович М.В., Таргонская М.В., Афанасьева Л.В. и др. Многофункциональная беспилотная мобильная платформа. Обеспечение точного земледелия // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2018. N3(14). С. 898-900.
8. Курбанов Р.К., Захарова О.М., Захарова Н.И., Горшков Д.М. Программное обеспечение для мониторинга и контроля показателей селекционных процессов посевов сои // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N3(32). С. 122-132.
9. Курбанов Р.К., Костомахин М.Н., Захарова Н.И. и др. Рекомендации для легких беспилотных летательных аппаратов по сбору данных // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2018. N6. С. 47-53.
10. Tugay A., Zeltser R., Kolot M., Panasiuk I. Organization of supervision over construction works using UAVs and special software. *Science and Innovation*. 2019. Vol. 15. N4. 21-28.
11. Ignas D., Jurate Suziedelyte V., Jurate K. Detection and analysis of methane emissions from a landfill using unmanned aerial drone systems and semiconductor sensors. *Detritus*. 2020. N10. 127-138.
12. Przybilla H.-J., Gerke M., Dikhoff I., Ghassoun Y. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high precision UAV test field zollern colliery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*. 2019. N42 (2/W13). 531-538.
13. López-Calderón M.J., Estrada-ávalos J., Rodríguez-Moreno V.M., Mauricio-Ruvalcaba J.E., Martínez-Sifuentes A.R., Delgado-Ramírez G. Estimation of total nitrogen content in forage maize (*Zea mays* L.) using spectral indices: Analysis by random forest. *Agriculture*. 2020 N451. 10(10). 1-15.
14. Zhou T., Atita P., Chunpeng James C., Yang H., Samuel R., Cesar Augusto M., Sen L., Zhang Z., Yu L.-X. Validation of UAV-based alfalfa biomass predictability using photogrammetry with fully automatic plot segmentation. *Scientific Reports*. 2021. N3336. 11
15. Bannari A., Selouani A., El-Basri M., Rhinane H., El-Harti A., El-Ghmari A. Multi-scale analysis of DEMs derived from unmanned aerial vehicle (UAV) in precision agriculture context. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2021. 8285-8288
16. Кузнецова И.А., Гильязов М.Р. Влияние высоты полета беспилотного летального аппарата при обработке данных в автоматизированных программных обеспечениях // *StudNet*. 2021. Т. 4. N5.
17. Юрченко В.И. Учет физических факторов при проектировании топографической аэрофотосъемки // *Геодезия и картография*. 2022. N5. 53-64.
18. Lili L., Jiangwei Q., Jiana Y., Jie L., Li L. Automatic freezing-tolerant rapeseed material recognition using UAV images and deep learning. *Plant Methods*. 2022. N18. 5.
19. Smith D.L., Abdullah Q.A., Maune D.F., Heidemann H.K. New ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data Released. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2015. 81(I.4). 1073-1085.
20. Young D.J.N., Koontz M.J., Weeks J.M. Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. N13(7). 1447-1463.

# REFERENCES

1. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Shogenov Yu.Kh. Rezul'taty nauchnykh issledovaniy agroinzhenernykh nauchnykh organizatsiy po razvitiyu tsifrovyykh sistem v sel'skom khozyaystve (okonchanie) [The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2022. N4(298). 2-6 (In Russian).
2. Pathak H., Igathinathane C., Zhang Z., Archer D., Hendrickson J. A review of unmanned aerial vehicle-based methods for plant stand count evaluation in row crops. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. N198. 107064 (In English).
3. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Tsifrovyye tekhnologii i robotizirovannyye tekhnicheskiye sredstva dlya sel'skogo khozyaystva [Digital technologies and robotic devices in the agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. N15(4). 6-10 (In Russian).
4. Anikeeva I.A. Otsenka rekomenduemykh i dopustimyykh znacheniy pokazateley izobrazitel'nogo kachestva po materialam, poluchennym razlichnymi aerofotosemochnymi sistemami dlya tseyey kartografirovaniya [Assessment of recommended and acceptable image quality indicators' values, based on materials, obtained with various aerial surveying

- systems for mapping purposes]. *Geodeziya i kartografiya*. 2021. N9. 30-40 (In Russian).
5. Akinchin A.V., Levshakov L.V., Linkov S.A., et al. Information technologies in precision farming. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2017. N9. 16-21 (In Russian).
  6. Yishan J., Zhen C., Qian C., Rong L., Mengwei L., Xin Y., Guan L. Estimation of plant height and yield based on UAV imagery in faba bean (*Vicia faba* L.). *Plant Methods*. 2022. N18(1). 26 (In English).
  7. Titovich M.V., Targonskaya M.V., Afanas'eva L.V., et al. Mnogofunktsional'naya bespilotnaya mobil'naya platforma. Obespechenie tochnogo zemledeliya [Multifunctional unmanned mobile platform. provision of exact agriculture]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2018. N3(14). 898-900 (In Russian).
  8. Kurbanov R.K., Zakharova O.M., Zakharova N.I., Gorshkov D.M. Programmnnoe obespechenie dlya monitoringa i kontrolya pokazateley selektsionnykh protsessov posevov soi [Software for monitoring and control of indicators for breeding processes of soybean crops]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N3(32). 122-132 (In Russian).
  9. Kurbanov R.K., Kostomakhin M.N., Zakharova N.I., et al. Rekomendatsii dlya legkikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov po sboru dannykh [Recommendations for light unmanned aerial vehicles for data collection]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2018. N6. 47-53 (In Russian).
  10. Tugay A., Zeltser R., Kolot M., Panasiuk I. Organization of supervision over construction works using UAVs and special software. *Science and Innovation*. 2019. Vol. 15. N4. 21-28 (In English).
  11. Ignas D., Jurate Suziedelyte V., Jurate K. Detection and analysis of methane emissions from a landfill using unmanned aerial drone systems and semiconductor sensors. *Detritus*. 2020. N10. 127-138 (In English).
  12. Przybilla H.-J., Gerke M., Dlkhoff I., Ghassoun Y. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high precision UAV test field zollern colliery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*. 2019. N42 (2/W13). 531-538 (In English).
  13. López-Calderón M.J., Estrada-ávalos J., Rodríguez-Moreno V.M., Mauricio-Ruvalcaba J.E., Martínez-Sifuentes A.R., Delgado-Ramírez G. Estimation of total nitrogen content in forage maize (*Zea mays* L.) using spectral indices: Analysis by random forest. *Agriculture*. 2020 N451. 10(10). 1-15 (In English).
  14. Zhou T., Atita P., Chunpeng James C., Yang H., Samuel R., Cesar Augusto M., Sen L., Zhang Z., Yu L.-X. Validation of UAV-based alfalfa biomass predictability using photogrammetry with fully automatic plot segmentation. *Scientific Reports*. 2021. N3336. 11 (In English).
  15. Bannari A., Selouani A., El-Basri M., Rhinane H., El-Harti A., El-Ghmari A. Multi-scale analysis of DEMs derived from unmanned aerial vehicle (UAV) in precision agriculture context. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2021. 8285-8288 (In English).
  16. Kuznetsova I.A., Gil'yazov M.R. Vliyanie vysoty poleta bespilotnogo letal'nogo apparata pri obrabotke dannykh v avtomatizirovannykh programmnykh obespecheniyakh [Influence of unmanned aircraft flight altitude during data processing in automated software]. *StudNet*. 2021. Vol. 4. N5 (In Russian).
  17. Yurchenko V.I. Uchet fizicheskikh faktorov pri proektirovanii topograficheskoy aerofotosemki [Consideration of physical factors at planning topographic aerial photography]. *Geodeziya i kartografiya*. 2022. N5. 53-64 (In Russian).
  18. Lili L., Jiangwei Q., Jiana Y., Jie L., Li L. Automatic freez-ing-tolerant rapeseed material recognition using UAV images and deep learning. *Plant Methods*. 2022. N18. 5 (In English).
  19. Smith D.L., Abdullah Q.A., Maune D.F., Heidemann H.K. New ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data Released. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2015. 81(14). 1073-1085 (In English).
  20. Young D.J.N., Koontz M.J., Weeks J.M. Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. N13(7). 1447-1463 (In English).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Курбанов Р.К. – научное руководство, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Захарова Н.И. – расчет параметров аэрофотосъемки, составление начального варианта статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Kurbanov R.K. – scientific guidance, developing general conclusions, article proofreading.

Zakharova N.I. – calculation of aerial photography parameters, preparing the initial version of the article manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

12.05.2022

31.08.2022

## Алгоритмы расчета траекторий полета беспилотных воздушных судов для решения сельскохозяйственных задач

Валерия Валентиновна Лебедева,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: izhboldina.valeriia@gmail.com;

Игорь Владимирович Лебедев,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: igorlevedev@gmail.com

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Реферат.** Обосновали актуальность использования беспилотных воздушных судов (БВС) по сравнению с другими способами аэрокосмической съемки. Привели примеры задач, требующие применения БВС для аэрофотосъемки с разной высоты. Показали, что внедрение сельскохозяйственных роботов, в том числе БВС, ускоряет выполнение полевых работ, а также позволяет получать уникальные данные, необходимые для оценки сельскохозяйственных территорий, обработки посевов и стимуляции роста растений. Отметили, что проблема построения траекторий движения БВС мультироторного типа при выполнении сельскохозяйственных задач за минимальное время остается нерешенной. (*Цель исследования*) Уменьшить длину траектории покрытия заданного участка и сократить время полета БВС мультироторного типа с учетом анализа возможных препятствий и участков земли, не представляющих интереса при решении поставленной задачи. (*Материалы и методы*) Использовали геометрические методы расчета траектории полета БВС для покрытия заданного участка, траекторию движения в среде с препятствиями к назначенной точке. С помощью методов фотограмметрии провели обработку изображений аэрофотосъемки при формировании ортофотоплана и карты рельефа местности. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что рассчитанная разработанным алгоритмом траектория удовлетворяет все требования: она непрерывна, имеет минимальное количество поворотов, сглажена, а также осуществима для БВС мультироторного типа. (*Выводы*) Определили, что для расчета по предложенному алгоритму траектории покрытия на прямоугольном участке со сторонами 200 и 30 метров потребовалось менее 0,05 секунды. Выявили, что траектория на первом участке, площадью 10 200 квадратных метров, уменьшилась на 9 процентов, а на втором, площадью 950 000 квадратных метров, – на 6 процентов, по сравнению с длиной траектории, построенной по стандартным алгоритмам, причем время полета сократилось на 32 и 10 процентов соответственно. Отметили основные преимущества применения БВС для видеосъемки: гарантированное высокое разрешение фотоматериалов и возможность съемки в заданное время, позволяющие оценивать состояние посевов.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственная робототехника, беспилотное воздушное судно, планирование траектории беспилотного воздушного судна, мониторинг сельскохозяйственных территорий, аэрофотосъемка.

■ **Для цитирования:** Лебедева В.В., Лебедев И.В. Алгоритмы расчета траекторий полета беспилотных воздушных судов для решения сельскохозяйственных задач // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 40-47. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-40-47. EDN WIJAUS.

## Algorithms for Calculating the Trajectory of Unmanned Aerial Vehicles for Solving Agricultural Problems

Valeria V. Lebedeva,  
junior researcher,  
e-mail: izhboldina.valeriia@gmail.com;

Igor V. Lebedev,  
junior researcher,  
e-mail: igorlevedev@gmail.com

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The relevance of using unmanned aerial vehicles (UAV) is substantiated in comparison with other methods of aerospace survey. The paper provides examples of tasks requiring the use of UAVs for aerial photography from different heights. It is shown that the introduction of agricultural robots, including UAVs, increases the speed of field work, allows obtaining unique data necessary for the assessment of agricultural territories, crops processing and plant growth stimulation. It is noted that the problem of constructing the movement trajectories of a multirotor UAV for performing agricultural tasks within a minimum time limit

remains unresolved. (*Research purpose*) To reduce the length of the trajectory covering a given area and reduce the flight time of a multirotor UAV, taking into account the analysis of possible obstacles and land plots that are beyond the task scope. (*Materials and methods*) Geometric methods have been used to calculate the UAV flight trajectory covering a given section, the trajectory of movement in an environment with obstacles to the designated point. Photogrammetry methods have been used for processing aerial photography images when forming an orthophotoplane and a terrain map. (*Results and discussion*) The trajectory calculated by the developed algorithm proves to meet all the requirements: it is continuous, has a minimum number of turns, it is smoothed, and feasible for a multirotor UAV. (*Conclusions*) It was determined that according to the proposed algorithm it takes less than 0.05 seconds to calculate the trajectory covering a rectangular section with the sides of 200 by 30 meters. It was found that the trajectory in the first 10,200-square-meter section decreased by 9 percent, and in the second 950,000-square-meter section it reduced by 6 percent, compared with the length of the trajectory built using standard algorithms. The flight time reduced by 32 and 10 percent, respectively. The paper presents the key advantages of using UAV for video shooting such as: guaranteed high resolution of photographic materials and the ability to shoot at a given time, allowing for the crop condition assessment

**Keywords:** agricultural robotics, unmanned aerial vehicle, UAV trajectory planning, monitoring of agricultural territories, aerial photography.

**■ For citation:** Lebedeva V.V., Lebedev I.V. Algoritmy rascheta traektoriy poleta bespilotnykh vozдушnykh sudov dlya resheniya sel'skokhozyaystvennykh zadach [Algorithms for calculating the trajectory of unmanned aerial vehicles for solving agricultural problems]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 40-47 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-40-47. EDN WIJAUS.

Обработка изображений, получаемых в ходе видеосъемки с беспилотных воздушных судов (БВС), позволяет создавать картографическую основу с точными координатами всех объектов на территории, необходимую для визуального анализа объектов [1]. С помощью фотоматериала можно определить объективную площадь пашни, сенокосов, пастбищ, залежей, язби, сева, недосево и присево. Результаты аэрофотосъемки позволяют определять границы участков при кадастровом учете, уточнять границы земельных участков и линейных объектов. Аэрофотосъемка с БВС более детализована по сравнению с космическими снимками. Кроме того, БВС позволяют вести съемку даже в условиях облачности, что актуально для Северо-Западного региона [2].

С помощью БВС возможно решение следующих задач:

- облет сельскохозяйственных угодий для контроля работы сельскохозяйственной техники и персонала [3];
- учет качества обработанной земли [4];
- создание электронных карт участков и топографических карт территории [5];
- инвентаризация посевов и полей, определение объективной площади пашни, а также сенокосов, пастбищ, многолетних трав, залежей [6];
- анализ и отслеживание очагов возгорания и последствий ущерба, нанесенного стихийными бедствиями [7];
- внесение химикатов на отдельные зараженные участки поля или по всему заданному участку [8, 9];
- мультиспектральная съемка на специальном оборудовании, с изображениями RGB, NIR, NDVI и NDRE за один полет [10];
- охрана урожая на поле [11];
- лазерная стимуляция растений [12].

Все представленные задачи предполагают работу

с большими участками, а также движение БВС на дальние расстояния. Поэтому необходима разработка новых алгоритмов построения маршрутов для работы БВС на больших территориях или для движения аппарата на дальние расстояния.

Все траектории движения БВС мультироторного типа для решения сельскохозяйственных задач можно разделить на три группы в зависимости от размера обрабатываемой территории и поставленной задачи (рис. 1):

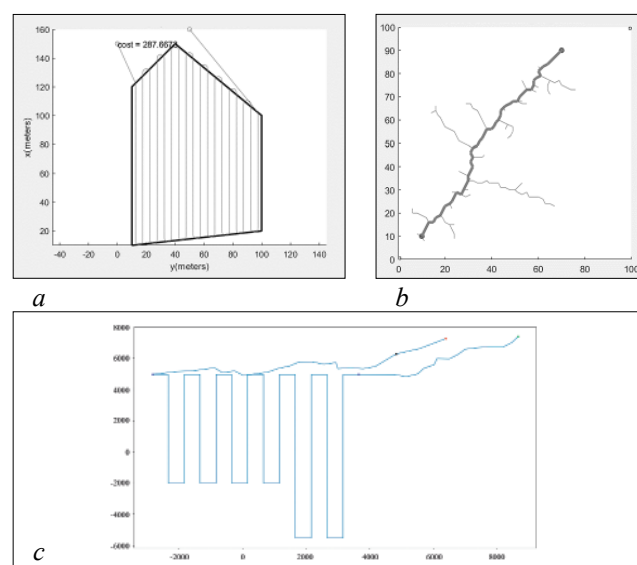


Рис. 1. Примеры траекторий для решения сельскохозяйственных задач: а – траектория, покрывающая заданный участок; б – траектория движения к назначенной точке на карте; в – комбинированная траектория

Fig. 1. Examples of trajectories for solving agricultural problems. a – trajectory covering a given section; b – the trajectory of movement to the designated point on the map; c – composite trajectory

- траектория, покрывающая заданный участок;
- траектория движения к назначенной точке на карте;
- комбинированная траектория, сочетающая траекторию покрытия и траекторию к точке.

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ** – уменьшение длины покрываемой траектории и времени полета БВС мультиторного типа на заданном участке.

Задачи исследования:

- анализ возможных препятствий и участков земли, не представляющих интереса [13];
- разработка алгоритма на основе декомпозиции рабочего пространства на ячейки с разным функционалом;
- построение графовой модели маршрута БВС мультиторного типа с покрытием всего рабочего пространства, сокращением числа поворотов и сглаживанием их траектории.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** При выполнении таких задач, как мониторинг сельскохозяйственных угодий, равномерная лазерная стимуляция растений, равномерное внесение удобрений на большом участке земли, аэрофотосъемка с последующим созданием модели или карты местности для БВС мультиторного типа, необходимо спланировать траекторию покрытия выделенной территории.

Назначение планировщика полета, функционирующего на борту БВС, – планирование траектории движения, чтобы полностью охватить заданную территорию [14]. Существуют методы как без разделения рабочей области на несколько частей, так и использующие точную и приближенную декомпозицию пространства [15].

Построение траектории покрытия территории правильной геометрической формы без препятствий с помощью одного БВС обычно основано на методах без декомпозиции рабочей области. Для исследования таких участков достаточно предопределенных траекторий. Наиболее распространенные паттерны – это возвратно-поступательное движение и спираль [16].

Приближенная декомпозиция разделяет заданный участок на части в зависимости от препятствий, находящихся на нем. Если он в форме невыпуклого многоугольника, тогда происходит хаотичное разбиение на выпуклые многоугольники. После приближенной декомпозиции планировщик на борту БВС строит траектории покрытия в каждой части участка, используя известные паттерны движения (рис. 2а) [17-18].

Точная декомпозиция – это наложение сетки на всю заданную территорию. Каждой ячейке присваивается статус: занята препятствием (1) или свободна (0). Затем на основе имеющихся свободных ячеек строится траектория, соединяющая все эти ячейки сетки (рис. 2б) [19-20].

Главное, чтобы маршрут движения БВС полно-

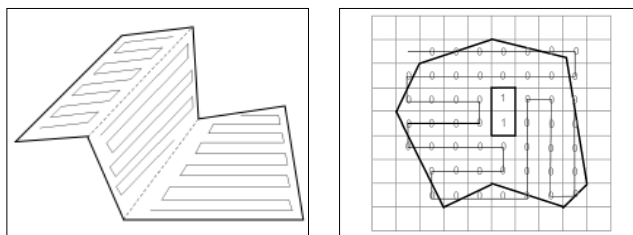


Рис. 2. Примеры декомпозиции заданной области: а – приближенной; б – точной

Fig. 2. Examples of a given section decomposition: a – approximate; b – exact

стью покрывал заданную территорию. Например, для аэрофотосъемки сельскохозяйственной территории может быть использован набор изображений для реконструкции местности, построения карты рельефа или ортофотоплана. Поэтому необходимо определить некоторые правила сбора фотоматериала.

Последовательные изображения должны иметь заданный уровень перекрытия. Чем больше перекрытие, тем выше точность трехмерной модели, карты или плана местности. Необходимо, чтобы все изображения были сделаны в одной и той же ориентации, поскольку это упрощает процесс трехмерной реконструкции и сшивки, что способствует поиску особых точек на смежных снимках. Съемка в одной ориентации уменьшает также количество маневров, что снижает потребление энергетических ресурсов и сокращает время полета БВС.

Для алгоритма, который решает задачу покрытия заданной области, в качестве входных данных используют:

- количество углов обследуемой области и их координаты;
- координаты точек взлета и посадки (начальная и конечная точки соответственно);
- число препятствий внутри обследуемой области и их расположение;
- параметры камеры: длину и ширину кадра, заданный горизонтальный и вертикальный уровень перекрытия между изображениями (рис. 3).

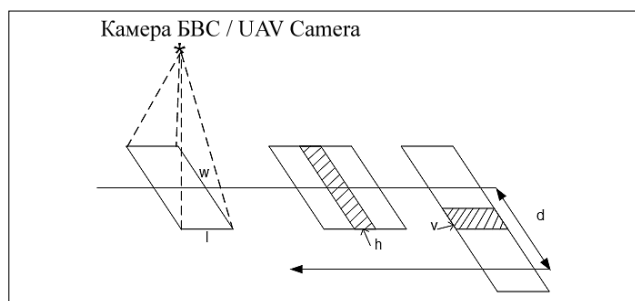


Рис. 3. Параметры камеры: l – длина; w – ширина; h и v – горизонтальный и вертикальный уровни перекрытия изображений соответственно

Fig. 3. Camera parameters: l – length; w – width; h and v – horizontal and vertical levels of image overlap, respectively

Выходные данные алгоритма построения траектории покрытия представлены самой траекторией в виде массива координат точек. Она должна быть непрерывной, покрывать весь обследуемый участок, а также сглаженной и минимизированной по длине. Длина траектории зависит от способа разбиения рабочего пространства, то есть от параметров камеры или другого сканирующего устройства, способа сглаживания траектории и количества маневров. Если траектория удовлетворяет вышеописанные требования, то задача обследования сельскохозяйственного поля считается решенной.

Ранее был разработан алгоритм, который рассчитывает траекторию полета БВС с покрытием территории на основе возвратно-поступательного движения [12]. Расчет проводят в двумерной плоскости, так как БВС мультироторного типа совершает полет на фиксированной высоте. На вход алгоритма подаются стартовая координата (по условиям задачи стартовая координата равна конечной), координаты вершин обследуемого участка и шаг покрытия (ширина кадра). Можно рассчитать количество параллельных линий полета при покрытии территории [21, 22]. Доказана работоспособность предложенного алгоритма [12]. Эксперименты проводили на ЭВМ с параметрами: процессор *Intel Core i5-8250U* (1,6 ГГц), память (ОЗУ) 8 Гб *DDR4* – 2400 МГц, видеокарта *nVidia GeForce MX 150* 2 Гб *GDDR5*, основной жесткий диск *SSD M2* 256 Гб (3300 МБ/с – чтение с диска; 1200 МБ/с запись на диск). Как показали результаты, время, затраченное на расчет траекторий на участке 200×30 м, не превышает 0,05 с (рис. 4).

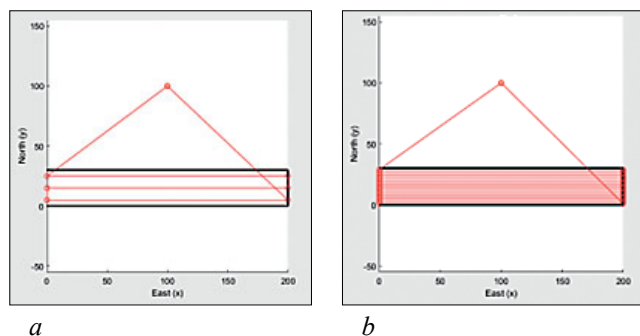


Рис. 4. Спланированные траектории для прямоугольного поля длиной 200 м и шириной 30 м с шагом: а – 10 м; б – 2 м

Fig. 4. Planned trajectories for a rectangular field of 200 m in length by 30 m in width with a step of: a – 10 m; b – 2 m

Рассмотрим блок-схему и описание алгоритма построения траектории покрытия сельскохозяйственного поля в виде многоугольника (рис. 5). Данный алгоритм – это усовершенствованная версия ранее предложенного [12]. Он учитывает наличие препятствий на обследуемом участке. Для расчета траектории покрытия новым алгоритмом необходимо ввести следующие данные:

- количество вершин участка и их координаты;
- число препятствий;
- координаты препятствий;
- координаты точки взлета (стартовой) и точки посадки (конечной);
- ширина кадра;
- уровень требуемого перекрытия.

На основе известных значений параметров камеры рассчитывается размер одной ячейки [26-29]. Далее необходимо разбить обследуемый участок на ячейки определенного ранее размера. После декомпозиции рабочего пространства и на основе известных данных о препятствиях каждой ячейке присваивается свой статус. Если ячейка свободна, то ее статус равен 0, если ячейка содержит препятствие или его часть, то ее статус равен 1. В результате происходит упрощение представления карты для дальнейшей навигации БВС на ней. Затем строится граф, соединяющий центры всех свободных ячеек. Он принимается за найденную траекторию, которая состоит из массива координат центров ячеек и сглаживается методом кубической интерполяции [14, 23-25].

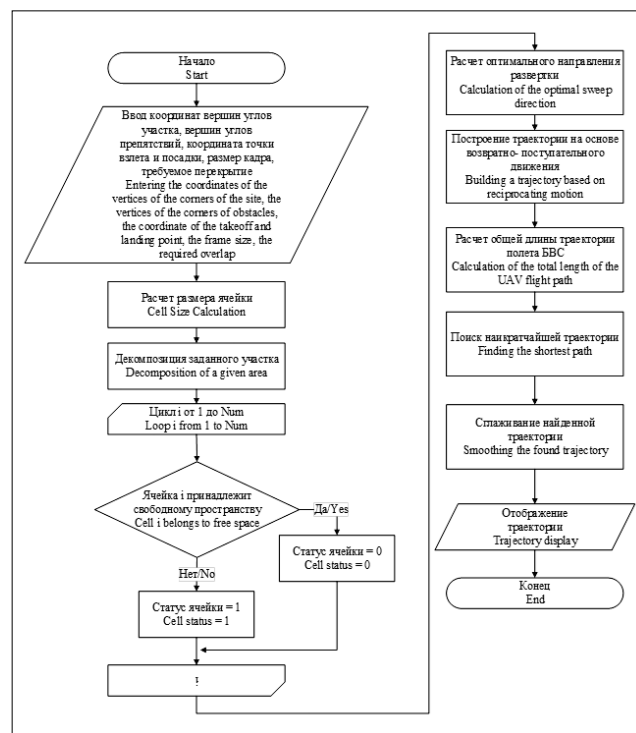


Рис. 5. Блок-схема алгоритма построения траектории БВС (Num – количество ячеек)

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for constructing the UAV trajectory (Num is the number of cells)

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Для проверки работоспособности разработанного алгоритма построения покрывающей траектории составили 6 экспериментов (табл. 1).

Для моделирования полета БВС по рассчитанным траекториям установлены следующие параметры:

| Входные данные для алгоритма / INPUT DATA FOR THE ALGORITHM |                                                                      |                                                              |                                                                                                 |                                   |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| № участка<br>Plot number                                    | Координаты взлета<br>и посадки<br>Takeoff and landing<br>coordinates | Площадь участка, м <sup>2</sup><br>Plot area, m <sup>2</sup> | Координаты вершин<br>препятствий на участке<br>The coordinates of the plot obstacle<br>vertices | Ширина кадра, м<br>Frame width, m |
| 1                                                           | [0, 0;<br>0, 125]                                                    | 10200                                                        | –                                                                                               | 5                                 |
| 2                                                           | [600, –600;<br>–550, 0]                                              | 950000                                                       | [–250, 0;<br>150, 0;<br>150, –100;<br>–250, –100]                                               | 100                               |

| Влияние расчета на оптимизацию траектории* / IMPACT OF CALCULATION ON TRAJECTORY OPTIMIZATION* |                      |                      |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Показатели / Parameters                                                                        | 1 вариант / Option 1 | 2 вариант / Option 2 | 3 вариант / Option 3 |
| Длина траектории, м / Trajectory length, m:<br>1 участок / plot 1<br>2 участок plot 2          | 2720<br>9850         | 2680<br>9531         | 2490<br>9300         |
| Время полета, с / Flight time, s:<br>1 участок / plot 1<br>2 участок / plot 2                  | 472<br>951           | 384<br>906           | 320<br>852           |

\*1 вариант – без дополнительного расчета направления оптимальной развертки; 2 вариант – с оптимальным направлением развертки, но без сглаживания; 3 вариант – с рассчитанным направлением оптимальной развертки и сглаживанием.  
\*Option 1 – without additional calculation of the optimal sweep direction; Option 2 – with the optimal sweep direction, but without smoothing; Option 3 – with the calculated direction of the optimal sweep and smoothing.

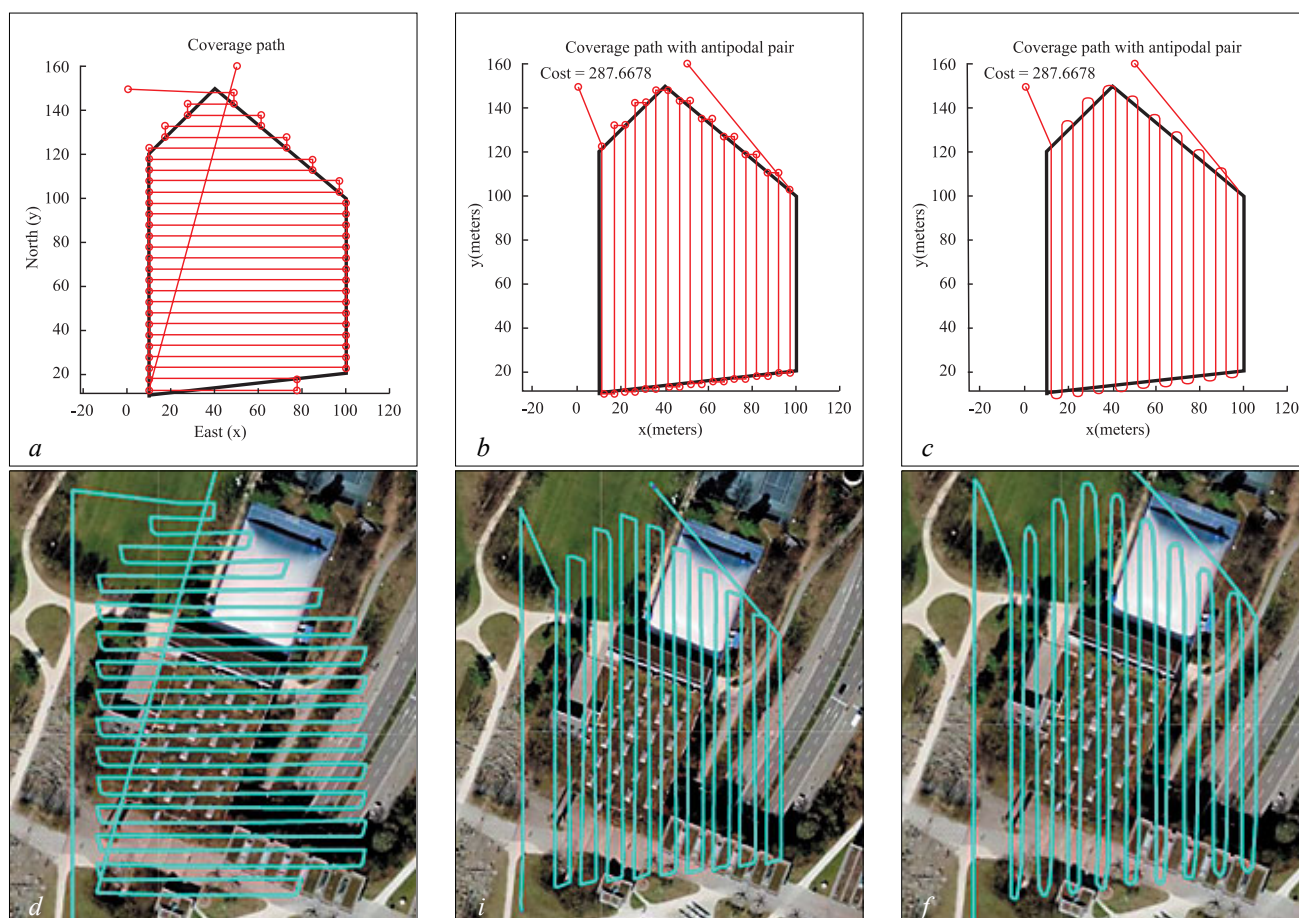


Рис. 6. Визуализация траекторий для первого эксперимента: а, б, с – результат построения траекторий; д, е, ф – фактическая траектория полета  
Fig. 6. Visualization of trajectories for the first experiment: а, б, с – the result of constructing trajectories; д, е, ф – actual flight path (taken from the UAV log files)

скорость – 7 м/с, высота полета – 35 и 95 м. В условиях экспериментов предусмотрены 3 варианта построения траектории (табл. 2, рис. 6):

- без дополнительного расчета направления оптимальной развертки;
- с оптимальным направлением развертки, но без сглаживания;
- с рассчитанным направлением оптимальной развертки и сглаживанием.

Применение разработанного алгоритма позволило сократить длину траектории на первом и втором участке на 9 и 6%, а время полета – на 32 и 10% соответственно (табл. 2). Визуально видно, что уменьшилось количество поворотов и сгладились их углы (рис. 6). Фактические траектории получены при помощи моделирования движения БВС в симуляторе Gazebo (рис. 7). Рассчитанные траектории, записанные в файл, направлялись на полетный контроллер модели. Отображенная траектория, вдоль которой двигается БВС, рассчитана предложенным выше алгоритмом.

Рассчитанная траектория соответствует всем выдвинутым требованиям к построению траектории по-

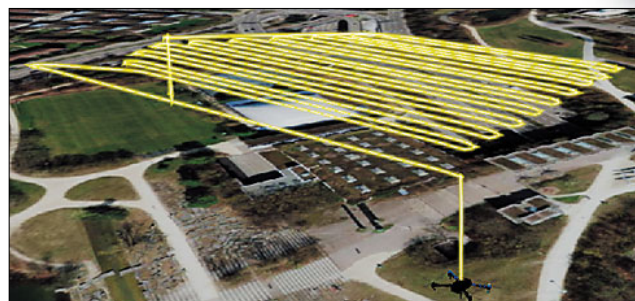


Рис. 7. Моделирование полета по траектории покрытия

Fig. 7. Simulation of UAV flight along the coverage trajectory

крытия: она непрерывна, имеет минимальное количество поворотов, сглажена, а также осуществима для БВС мультироторного типа.

**Выводы.** Предложили и протестировали алгоритм построения траектории покрытия для БВС мультироторного типа. Использовали его для расчета траектории покрытия на участке 200×30 м, что заняло менее 0,05 с. Применение разработанного алгоритма позволило сократить длину траектории на первом и втором участке на 9 и 6%, а время полета – на 32 и 10% соответственно.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамеш Бабу Н., Набоков В.И., Скворцов Е.А. Классификация и особенности робототехники в сельском хозяйстве // *Аграрный вестник Урала*. 2017. N2(156). С. 82-88.
2. Ардентов А.А., Бесчастный И.Ю., Маштаков А.П. Алгоритмы вычисления положения БПЛА с использованием системы машинного зрения // *Программные системы: теория и приложения*. 2012. N3. С. 23-38.
3. Vu Q., Raković M., Delic V., Ronzhin A. Trends in development of UAV-UGV cooperation approaches in precision agriculture. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2018. 213-221.
4. Ampatzidis Y., Partel V., Costa L. Agrovieview. Cloud-based application to process, analyze and visualize UAV-collected data for precision agriculture applications utilizing artificial intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. N174. 105457.
5. Meinen B.U., Robinson D.T. Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment*. 2020. N239. 111666.
6. Messina G., Modica G. Applications of UAV thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook. *Remote Sensing*. 2020. N12(9). 1491.
7. Islam S., Huang Q., Afghah F., Fule P., Razi A. Fire frontline monitoring by enabling uav-based virtual reality with adaptive imaging rate. 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE. 2019. 368-372.
8. Albuquerque C.K., Polimante S., Torre-Neto A., Prati R.C. Water spray detection for smart irrigation systems with Mask R-CNN and UAV footage. *IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (Metro-AgriFor)*. 2020. 236-240.
9. Асовский В.П., Кузьменко А.С., Худоленко О.В. Оценка показателей работ беспилотных мультикоптеров по внесению пестицидов и агрохимикатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N3. С. 55-62.
10. Deng L., Mao Z., Li X., Hu Z., Duan F., Yan Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2018. N146. 124-136.
11. Li X., Giles D.K., Niederholzer F.J., Andaloro J.T., Lang E.B., Watson L.J. Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection. *Pest management science*. 2021. 77(1). 527-537.
12. Севостьянова Н.Н., Лебедев И.В., Лебедева В.В., Ватаманюк И.В. Инновационный подход к автоматизированной фотоактивации посевных площадей посредством БПЛА с целью стимуляции роста культур // *Информатика и автоматизация*. 2021. Т. 20. N6. С. 1395-1417.
13. Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R. Adaptive multi-agent coverage control with obstacle avoidance. *IEEE Control Systems Letters*. 2021. N6. 944-949.
14. Nam L.H., Huang L., Li X.J., Xu J.F. An approach for coverage path planning for UAVs. IEEE 14th international workshop on advanced motion control (AMC). IEEE. 2016. 411-416.
15. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results. *Annals of mathematics and artificial intelligence*. 2001. 31(1). 113-126.
16. Cabreira T.M., Brisolara L.B., Ferreira Jr P.R. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. *Drones*. 2019. 3(1). 4.

17. Torres M., Pelta D.A., Verdegay J.L., Torres J.C. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction. *Expert Systems with Applications*. 2016. 55. 441-451.
18. Pham T.H., Bestaoui Y., Mammari S. Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture. *Work-shop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*. IEEE. 2017. 43-48.
19. Muñoz J., López B., Quevedo F., Monje C.A., Garrido S., Moreno L.E. Multi UAV Coverage Path Planning in Urban Environments. *Sensors*. 2021. 21(21). 7365.
20. Acevedo J.J., Arrue B.C., Maza I., Ollero A. Distributed approach for coverage and patrolling missions with a team of heterogeneous aerial robots under communication constraints. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. 10(1). 28.
21. Barrientos A., Colorado J., Cerro J.D., Martinez A., Rossi C., Sanz D., Valente J. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. *Journal of Field Robotics*. 2011. 28(5). 667-689.
22. Wang C., Liu P., Zhang T., Sun J. The adaptive vortex search algorithm of optimal path planning for forest fire rescue UAV. *IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*. 2018. 400-403.
23. Karur K., Sharma N., Dharmatti C., Siegel J.E. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Vehicles*. 2021. 3(3). 448-468.
24. Ценч Ю.С. Профессиональные стандарты как фактор сокращения дефицита квалифицированных кадров // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. 2014. Т. 67. №2. С. 62-65.
25. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №1(30). С. 191-197.
26. Курбанов Р.К., Костомахин М.Н., Захарова Н.И. и др. Рекомендации для легких беспилотных летательных аппаратов по сбору данных // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2018. №6. С. 47-53.
27. Артюшин А.А., Курбанов Р.К., Марченко Л.А., Захарова О.М. Выбор типоразмерного ряда беспилотных летательных аппаратов и полезной нагрузки для мониторинга сельскохозяйственных полей // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. №4(37). С. 36-43.
28. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20-22 октября 2020 года*. Rostov-on-Don: 2020. 012062.
29. Kurbanov R., Zakharova N., Sidorenko V., Vilyunov S. The Use of Vegetation Indices in Comparison to Traditional Methods for Assessing Overwintering of Grain Crops in the Breeding Process. *Advances in Artificial Systems for Power Engineering II: Conference proceedings, Москва, 17-19 декабря 2021 года*. Москва: Springer Nature Switzerland AG, 2022. 52-64.

## REFERENCES

1. Ramesh Babu N., Nabokov V.I., Skvortsov E.A. Klassifikatsiya i osobennosti robototekhniki v sel'skom khozyaystve [Classification and features of robotics in agriculture]. *Agrarnyy vestnik Urala*. 2017. №2(156). 82-88 (In Russian).
2. Ardentov A.A., Beschastnyy I.Yu., Mashtakov A.P. Algoritmy vychisleniya polozheniya BPLA s ispol'zovaniem sistemy mashinnogo zreniya [Algorithms for Evaluation Position and Orientation of UAV]. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya*. 2012. №3. 23-38 (In Russian).
3. Vu Q., Raković M., Delic V., Ronzhin A. Trends in development of UAV-UGV cooperation approaches in precision agriculture. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2018. 213-221(In English).
4. Ampatzidis Y., Partel V., Costa L. Agrovie. Cloud-based application to process, analyze and visualize UAV-collected data for precision agriculture applications utilizing artificial intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. №174. 105457 (In English).
5. Meinen B.U., Robinson D.T. Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment*. 2020. №239. 111666 (In English).
6. Messina G., Modica G. Applications of UAV thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook. *Remote Sensing*. 2020. №12(9). 1491 (In English).
7. Islam S., Huang Q., Afghah F., Fule P., Razi A. Fire frontline monitoring by enabling uav-based virtual reality with adaptive imaging rate. *53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. IEEE. 2019. 368-372 (In English).
8. Albuquerque C.K., Polimante S., Torre-Neto A., Prati R.C. Water spray detection for smart irrigation systems with Mask R-CNN and UAV footage. *IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*. 2020. 236-240 (In English).
9. Asovskiy V.P., Kuz'menko A.S., Khudolenko O.V. Otsenka pokazateley rabot bespilotnykh mul'tikopterov po vnesheniyu pestitsidov i agrokhimikatov [Evaluation of unmanned multicopters' performance indicators for pesticide and agrochemical application]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol.15. №3. 55-62 (In Russian).
10. Deng L., Mao Z., Li X., Hu Z., Duan F., Yan Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2018. №146. 124-136 (In English).
11. Li X., Giles D.K., Niederholzer F.J., Andaloro J.T., Lang E.B., Watson L.J. Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection. *Pest management science*. 2021. 77(1). 527-537 (In English).
12. Sevost'yanova N.N., Lebedev I.V., Lebedeva V.V., Vatamanuk I.V. Innovatsionnyy podkhod k avtomatizirovannoy fotoaktivatsii posevnykh ploshchadey posredstvom BPLA s tsel'yu stimulyatsii rosta kul'tur [An innovative approach to

- automated photo-activation of crop acreage using uavs to stimulate crop growth]. *Informatika i avtomatizatsiya*. 2021. Vol. 20. N6. 1395-1417 (In Russian).
13. Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R. Adaptive multi-agent coverage control with obstacle avoidance. *IEEE Control Systems Letters*. 2021. N6. 944-949 (In English).
  14. Nam L.H., Huang L., Li X.J., Xu J.F. An approach for coverage path planning for UAVs. IEEE 14th international workshop on advanced motion control (AMC). IEEE. 2016. 411-416 (In English).
  15. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results. *Annals of mathematics and artificial intelligence*. 2001. 31(1). 113-126 (In English).
  16. Cabreira T.M., Brisolara L.B., Ferreira Jr P.R. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. *Drones*. 2019. 3(1). 4 (In English).
  17. Torres M., Pelta D.A., Verdegay J.L., Torres J.C. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction. *Expert Systems with Applications*. 2016. 55. 441-451 (In English).
  18. Pham T.H., Bestaoui Y., Mammari S. Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture. Work-shop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems. IEEE. 2017. 43-48 (In English).
  19. Muñoz J., López B., Quevedo F., Monje C.A., Garrido S., Moreno L.E. Multi UAV Coverage Path Planning in Urban Environments. *Sensors*. 2021. 21(21). 7365 (In English).
  20. Acevedo J.J., Arrue B.C., Maza I., Ollero A. Distributed approach for coverage and patrolling missions with a team of heterogeneous aerial robots under communication constraints. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. 10(1). 28 (In English).
  21. Barrientos A., Colorado J., Cerro J.D., Martinez A., Rossi C., Sanz D., Valente J. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. *Journal of Field Robotics*. 2011. 28(5). 667-689 (In English).
  22. Wang C., Liu P., Zhang T., Sun J. The adaptive vortex search algorithm of optimal path planning for forest fire rescue UAV. IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. 2018. 400-403 (In English).
  23. Karur K., Sharma N., Dharmatti C., Siegel J.E. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Vehicles*. 2021. 3(3). 448-468. (In English).
  24. Tsench Yu.S. Professional'nye standarty kak faktor sokrashcheniya defitsita kvalifitsirovannykh kadrov [Professional standards as a factor in reducing the shortage of qualified personnel]. *Vestnik Chelyabinskoy gosudarstvennoy agroinzhenernoy akademii*. 2014. Vol. 67. N2. 62-65 (In Russian).
  25. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Tsifrovye tekhnologii v pochvoobrabotke [Digital technologies in tillage]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N1(30). 191-197 (In Russian).
  26. Kurbanov R.K., Kostomakhin M.N., Zakharova N.I., et al. Rekomendatsii dlya legkikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov po sboru dannykh [Recommendations for light unmanned aerial vehicles for data collection]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2018. N6. 47-53 (In Russian).
  27. Artyushin A.A., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Zakharova O.M. Vybory tiporazmernogo ryada bespilotnykh letatel'nykh apparatov i poleznoy nagruzki dlya monitoringa sel'skokhozyaystvennykh poley [Selection of a standard-sized range of unmanned aerial vehicles and payloads for monitoring agricultural fields]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N4(37). 36-43 (In Russian).
  28. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 october 2020*. Rostov-on-Don: 2020. 012062.
  29. Kurbanov R., Zakharova N., Sidorenko V., Vilyunov S. The Use of Vegetation Indices in Comparison to Traditional Methods for Assessing Overwintering of Grain Crops in the Breeding Process. *Advances in Artificial Systems for Power Engineering II: Conference proceedings, Moscow, 17-19 december 2021*. Moscow: Springer Nature Switzerland AG. 2022. 52-64.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Лебедева В.В. – литературный анализ, разработка теоретических предпосылок, обработка результатов экспериментов, доработка текста;

Лебедев И.В. – разработка программного обеспечения для движения БПЛА и построения траекторий покрытия, формирование общих выводов, проведение экспериментов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Lebedeva V.V. – literature review, development of theoretical premises, processing the experimental results, manuscript revision;

Lebedev I.V. – development of software for UAV movement and construction of coverage trajectories, formulating general conclusions, and conducting the experiments.

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

31.05.2022

28.07.2022

## **Качество упрочняющей пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники**

**Роман Ярославович Казберов,**  
 младший научный сотрудник,  
 e-mail: kazberov.roman.y@yandex.ru;

**Сергей Петрович Тужилин,**  
 младший научный сотрудник,  
 e-mail: sptuzh@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим, что уровень механических свойств полимерных изделий, изготовленных с помощью традиционных технологий, выше, чем деталей, изготовленных 3D-печатью. Показали актуальность исследования различных способов упрочнения 3D-печатных изделий, например способа вакуумной пропитки в эпоксидных компаундах. (*Цель исследования*) Определить зависимость качества пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники от вязкости выбранного пропиточного эпоксидного компаунда. (*Материалы и методы*) Изменяли вязкость пропиточного эпоксидного компаунда, добавляя разбавители – ацетон и ДЭГ-1. Для измерения вязкости компаунда использовали ротационный вискозиметр. В качестве объектов пропитки выбрали шестерню привода магнето пускового двигателя трактора МТЗ и опору пальцев шнека жатки John Deere. Детали изготовили на 3D-принтере, работающем по технологии FDM. После пропитки проводили резку изделий в определенных сечениях для оценки наличия непролитых областей. Оценили количество смолы, затвердевшей на поверхности изделий. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что ацетон снижает вязкость в 2 раза эффективнее, чем ДЭГ-1. Поскольку стоимость ацетона меньше, последующие эксперименты проводили на нем. Для пропитки деталей сельскохозяйственной техники выбрали три уровня вязкости: высокий, соответствующий исходной вязкости эпоксидного компаунда 16 паскаль-секунд; средний – 8,8 паскаль-секунды, соответствующий введению 0,5 процента (по массе) ацетона; низкий – 6,5 паскаль-секунды, соответствующий введению 1,5 процента (по массе) ацетона. Выявили, что изделия, пропитанные компаундами с высокой и низкой вязкостью, содержали много пор в сечениях и большое количество компаунда на поверхности. (*Выводы*) По результатам пропитки определили лучшую композицию – с вязкостью эпоксидной смолы 8,8 паскаль-секунды, что соответствует содержанию 0,5 процента (по массе) ацетона. Доказали, что повышенная вязкость компаунда не позволяет ему эффективно проникать внутрь детали, при низкой вязкости, напротив, компаунд вытекает из детали после осуществления пропитки.

**Ключевые слова:** эпоксидные смолы, 3D-печать, вязкость эпоксидного компаунда, динамическая вязкость, АБС-пластик, полимеры.

**■ Для цитирования:** Казберов Р.Я., Тужилин С.П. Качество упрочняющей пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 48-54. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-48-54. EDN NRZQLS.

## **The Quality of Strengthening Impregnation of 3D-Printed Parts for Agricultural Machinery**

**Roman Ya. Kazberov,**  
 junior researcher,  
 e-mail: kazberov.roman.y@yandex.ru;

**Sergey P. Tuzhilin,**  
 junior researcher

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** It is noted that the level of mechanical properties of polymer products manufactured with the help of traditional technologies exceeds that of products made by 3D printing. The relevance of studying various methods of strengthening 3D printed products is shown, for example, the method of vacuum impregnation in epoxy compounds. (*Research purpose*) To determine the dependence between the quality of impregnation of 3D printed parts of agricultural machinery and the viscosity of the impregnating epoxy compound selected. (*Materials and methods*) The viscosity of the impregnating epoxy compound was changed by adding such diluents as acetone and DEG-1. The viscosity of the compound was measured by a rotational viscometer. The magneto drive pinion of the MTZ tractor starting engine and the auger pin support of the John Deere cutter bar were chosen

as the objects for impregnation. The components were produced by a 3D-printer using FDM technology. After impregnation, the products were cut in certain sections to assess the existence of unfilled areas. The amount of resin hardened on the product surface was estimated. (*Results and discussion*) It has been found that acetone reduces viscosity 2 times more efficiently than DEG-1. Since acetone cost is lower, it was used for the subsequent experiments. For the impregnation of agricultural machinery parts, three levels of viscosity were chosen: the high level, corresponding to the 16 pascal-seconds initial viscosity of epoxy compound; the average level of 8.8 pascal-seconds, corresponding to the injection of 0.5 percent of acetone (by weight); the low level of 6.5 pascal-seconds, corresponding to the injection of 1.5 percent acetone (by weight). It was found that products impregnated with high and low viscosity compounds contained many pores in cross sections and a large amount of compound on the surface. (*Conclusions*) Based on the results of impregnation, the best composition proves to be that with the epoxy resin viscosity of 8.8 pascal-seconds corresponding to 0.5 percent of acetone (by weight). It is proved that the higher compound viscosity does not allow it to effectively penetrate into the product, at a lower viscosity, on the contrary, the compound leaks out of the product after impregnation.

**Keywords:** epoxy resins, 3D printing, epoxy compound viscosity, dynamic viscosity, acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plastic, polymers.

■ **For citation:** Kazberov R.Ya., Tuzhilin S.P. Kachestvo uprochnyayushchey propitki 3D-pechatnykh detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [The quality of strengthening impregnation of 3d-printed parts for agricultural machinery]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 48-54 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-48-54. EDN NRZQLS.

Повышение надежности различных механических узлов сельхозтехники, а также обеспечение возможности быстрого ремонта этих узлов, особенно в условиях сезонной работы, остаются важной задачей [1]. Сельскохозяйственные машины сегодня во многом состоят из полимерных деталей. Традиционное производство изделий из полимерных и полимерных композиционных материалов занимает большое количество времени. Зачастую оно требует специальной оснастки, что увеличивает стоимость конечного продукта. Для ускорения и удешевления процесса изготовления полимерных деталей возможно применение аддитивных технологий [2-4].

Наиболее распространенная технология 3D-печати из полимерных материалов – FDM (*fused deposition modeling*). Она представляет собой метод создания детали путем послойного наплавления термопластичного полимера (рис. 1). К ее преимуществам относятся низкая стоимость и большой спектр применяемых материалов, что позволяет получать изделия с различными конечными свойствами. В качестве полимерных материалов применяют следующие их разновидности: ПЛА (полилактид), АБС (акрилонитрил-бутадиен-стирол), ПВХ (поливинилхлорид), ПА (полиамиды), ПК (поликарбонат), ПП (полипропилен) и другие [5, 6].

На сегодняшний день актуален вопрос изготовления 3D-печатных изделий, сопоставимых по свойствам с деталями, произведенными традиционными методами переработки пластмасс. В связи с этим проводятся исследования различных методов, способствующих повышению физико-механических свойств 3D-печатных изделий. К их числу можно отнести материаловедческий метод, заключающийся в разработке новых полимерных композиционных материалов

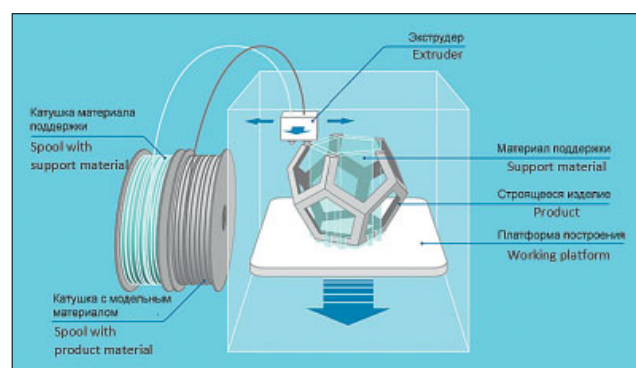


Рис. 1. Общая схема аддитивного полимерного производства  
Fig. 1. General diagram of additive polymer production

для 3D-печати [7-9]. Кроме того, существуют различные методы упрочняющей постобработки изделий. Один из них – вакуумная пропитка в полимерных компаундах [10-14].

**Цель исследования** – определение зависимости качества пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники от вязкости выбранного пропиточного эпоксидного компаунда.

**Материалы и методы.** Эпоксидные смолы обладают высоким комплексом прочностных, теплофизических, диэлектрических и адгезионных показателей, что в совокупности с технологическим удобством и экономической выгодой обусловило выбор эпоксидных олигомеров в качестве материала для пропитки 3D-печатных изделий. Вязкость эпоксидной композиции влияет на качество пропитки и количество пустот в конечном изделии. Как показали предыдущие исследования, чтобы улучшить качество пропитки, необходимо снизить вязкость эпоксидной смолы. Для этого использовали наиболее доступные на отечественном рынке разбавители, отно-

сящиеся к двум разным классам: инактивные и активные. Первые не способны химически встраиваться в структуру эпоксидной смолы в процессе отверждения. Поэтому возможно образование пор и микродефектов при испарении разбавителя во время экзотермической реакции отверждения, что снижает прочность материала. Активные разбавители содержат в своей химической структуре функциональные эпоксидные группы, что помогает им встраиваться в структуру отвержденного полимера с образованием химических связей [15-18].

В качестве инактивного разбавителя для эпоксидной смолы марки ЭД-20 выбрали ацетон, в качестве активного – ДЭГ-1 (табл. 1).

| Таблица 1<br>СОСТАВЫ ИССЛЕДУЕМЫХ СМЕСЕЙ<br>COMPOSITION OF MIXTURES UNDER STUDY |                                  |                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| №                                                                              | Состав<br>Composition            | Содержание разбавителя,<br>% по массе<br>Diluent content, % by weight |
| 1                                                                              | ЭД-20<br>ER-20                   | 0                                                                     |
| 2                                                                              | ЭД-20 + ацетон<br>ER-20+ acetone | 0,5                                                                   |
| 3                                                                              | ЭД-20 + ацетон<br>ER-20+ Acetone | 1,0                                                                   |
| 4                                                                              | ЭД-20 + ацетон<br>ER-20+ Acetone | 1,5                                                                   |
| 5                                                                              | ЭД-20 + ДЭГ-1<br>ER-20+ DEG-1    | 2,5                                                                   |
| 6                                                                              | ЭД-20 + ДЭГ-1<br>ER-20+ DEG-1    | 5,0                                                                   |

Динамическую вязкость измеряли ротационным вискозиметром *Rotavisc lo-vi* со шпинделем *SP-2* (рис. 2).

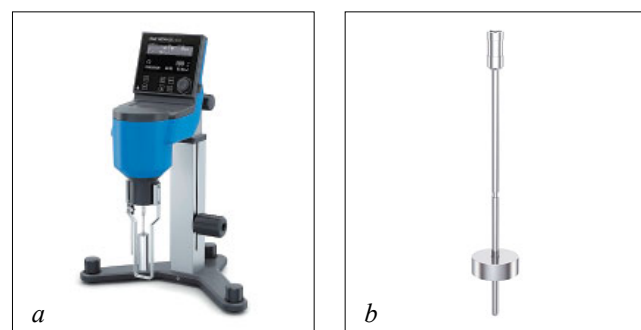


Рис. 2. Оборудование для измерения вязкости: а – ротационный вискозиметр *Rotavisc lo-vi*; б – шпиндель *SP-2*  
Fig. 2. Viscosity measurement equipment: a – *Rotavisc lo-vi* rotary viscometer; b – *SP-2* spindle

Смеси подготавливали с помощью лабораторных весов высокой точности *CAS XE 6000*. Навеску разбавителя помещали в массу эпоксидной смолы, тщательно распределяли по всему объему вручную, затем смесь дополнительно перемешивали и вакууми-

ровали в вакуумно-литьевой машине *KLM V400 A*. Убедившись, что в смеси отсутствуют пузыри воздуха, измеряли вязкость в режиме автоматического выбора скорости вращения шпинделя – для обеспечения минимальной погрешности при измерении.

В качестве объектов исследования выбрали шестерню привода магнето пускового двигателя трактора МТЗ и опору пальцев шнека жатки *John Deere* (рис. 3).

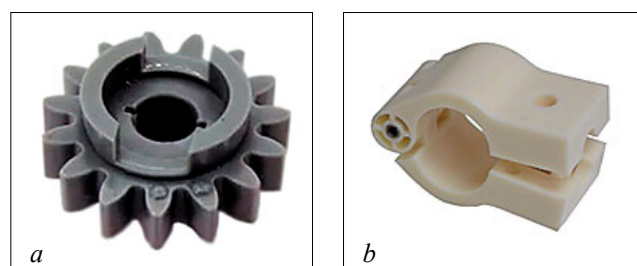


Рис. 3. Шестерня привода магнето (а) и опора пальцев шнека жатки *John Deere* (b)  
Fig. 3. Magneto drive pinion (a) and John Deere cutter bar auger pin support (b)

Каркасы опор пальцев шнека жатки изготавливали на 3D-принтере *TotalZ 250 G3*, каркасы шестерней – на 3D-принтере *Flying Bear Ghost 5* в определенном режиме печати (табл. 2). Материалом печати во всех случаях служил пластик *ABS*.

| Таблица 2<br>РЕЖИМ ПЕЧАТИ КАРКАСОВ ОПОР ПАЛЬЦЕВ/ШЕСТЕРНЕЙ ДЛЯ ПРОПИТКИ<br>PRINT MODE FOR IMPREGNATING PIN SUPPORT FRAMES/PINION FRAMES |                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Параметры / Parameter                                                                                                                  | Значение / Value |
| Количество периметров, шт.<br>Number of perimeters, pcs                                                                                | 2                |
| Заполнение, %<br>Filling, %                                                                                                            | 33               |
| Тип заполнения<br>Type of filling                                                                                                      | сетка<br>grid    |
| Температура сопла, °C<br>Nozzle temperature, °C                                                                                        | 240/245          |
| Температура стола, °C<br>Table temperature, °C                                                                                         | 100              |
| Скорость печати стенок, мм/с<br>Speed of printing side walls, mm/s                                                                     | 30               |
| Скорость печати заполнения, мм/с<br>Fill print speed, mm/s                                                                             | 40               |

Процесс пропитки 3D-печатных полимерных изделий состоял из следующих этапов:

- навеска смолы ЭД-20 с помощью лабораторных весов;
- вакуумизация смолы ЭД-20 в камере вакуумно-литьевой машины (рис. 4);
- навеска необходимого количества отвердителя и разбавителя;
- вмешивание в массу эпоксидной смолы отвердите-

- ля и разбавителя с помощью смесителя вакуумно-литьевой машины;
- повторная вакуумизация эпоксидной композиции;
- размещение в объеме эпоксидной композиции 3D-печатных полимерных образцов;
- вакуумизация образцов (3 цикла по 7 мин), между циклами каждый образец переворачивался на противоположную сторону для равномерной пропитки;
- вертикальное подвешивание образцов до полного отверждения эпоксидной смолы.



Рис. 4. Вакуумно-литьевая машина KLM V 400 A

Fig. 4. KLM V 400 vacuum casting machine

После пропитки образцы разрезали с помощью ручного отрезного станка *Labotom-3 Struerus* в соответствии со схемой (рис. 5).

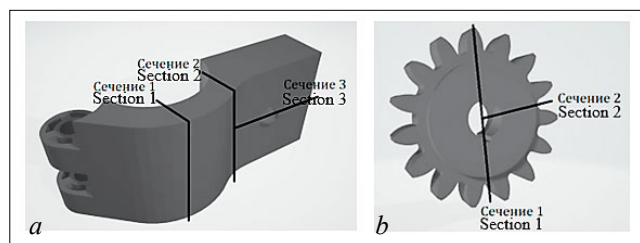


Рис. 5. Схема резки опоры пальца (a) и шестерни (b)

Fig. 5. Diagram of cutting the pin support (a) and pinion (b)

Качество полученных сечений оценивали по наличию непролитых областей и количеству эпоксидной смолы, затвердевшей вдоль стенок детали с внешней стороны.

**Результаты и обсуждение.** Получили зависимости вязкости эпоксидной смолы ЭД-20 от количества активного и неактивного разбавителей (рис. 6).

Вязкость исследуемой эпоксидной смолы ЭД-20 равна примерно 16 Па·с, что соответствует ее паспортным данным. Ацетон снижает ее примерно в 2 раза эффективнее, чем ДЭГ-1. При одинаковом содержании разбавителей в количестве 0,5 масс. % вязкость смеси с применением ДЭГ-1 составляет около 15 Па·с,

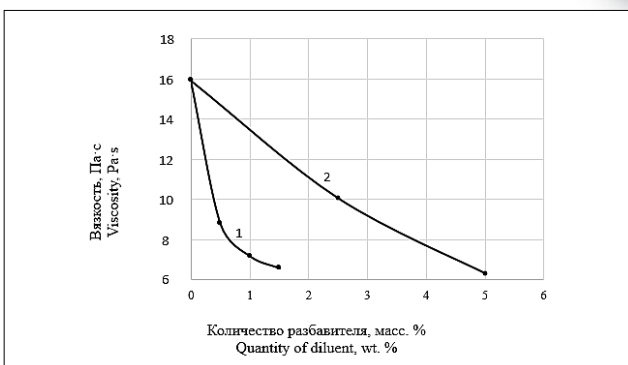


Рис. 6. Зависимость вязкости эпоксидной смолы ЭД-20 от введения различных разбавителей: 1 – ацетон; 2 – ДЭГ-1

Fig. 6 Dependence of viscosity of ED-20 epoxy resin on the injection of different thinners: a – acetone; b – DEG-1

то есть на 6% меньше, тогда как в варианте с ацетоном этот показатель равен 8,7 Па·с, или на 45% ниже.

С повышением содержания неактивного разбавителя (ацетона) его влияние на вязкость снижается. Так, при возрастании в 2 раза (с 0,5 до 1,0 масс. %) значение вязкости составляет уже 7,1 Па·с, что всего на 10% выше, чем при использовании 0,5 масс. % ацетона. Подобный эффект, вероятно, связан с ограниченной растворимостью эпоксидной смолы в ацетоне. Разбавление эпоксидной смолы ацетоном можно описать как процесс ограниченного набухания, то есть процесс взаимодействия олигомерной фракции с низкомолекулярной жидкостью (неактивным разбавителем), иначе говоря, как процесс, ограниченный стадией поглощения низкомолекулярного растворителя олигомерами.

В отличие от ацетона, зависимость вязкости эпоксидной смолы от массового содержания активного разбавителя (ДЭГ-1) линейна. В данном случае процесс представляет собой разбавление олигомерными низкомолекулярными фракциями. Однако этот метод требует большего содержания разбавителя для снижения вязкости до уровня, аналогичного при использовании неактивного разбавителя.

В результате исследования зависимости вязкости эпоксидного компаунда от введения разбавителей решено последующий эксперимент по исследованию качества пропитки полимерных изделий проводить при трех уровнях вязкости: низком, среднем и высоком (табл. 3). Вязкость пропиточного компаунда будет задаваться с помощью ацетона, более доступного в ценовом сегменте.

3D-печатные детали опор пальцев шнека жатки пропитали эпоксидными композициями с разным количеством разбавителя (рис. 7).

В первом варианте, без разбавителя, количество смолы во внутренних полостях изделия мало вследствие достаточно высокой первоначальной вязкости эпоксидной смолы. Все зеленые области находятся вдоль стенок изделия. Также можно отметить доста-

Таблица 3

Table 3

**Композиции для оценки качества пропитки  
3D-печатных полимерных изделий**  
**COMPOSITIONS FOR ASSESSING THE QUALITY OF IMPREGNATION  
OF 3D-PRINTED POLYMER PRODUCTS**

| Уровень вязкости<br>Viscosity level | Содержание<br>ацетона,<br>% по массе<br>Mass content<br>of diluent<br>(acetone), % | Вязкость<br>эпоксидной ком-<br>позиции, Па·с<br>Viscosity<br>of the epoxy<br>composition, Pa·s |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Высокий / High                      | 0                                                                                  | 16                                                                                             |
| Средний / Middle                    | 0,5                                                                                | 8,8                                                                                            |
| Низкий / Low                        | 1,5                                                                                | 6,5                                                                                            |

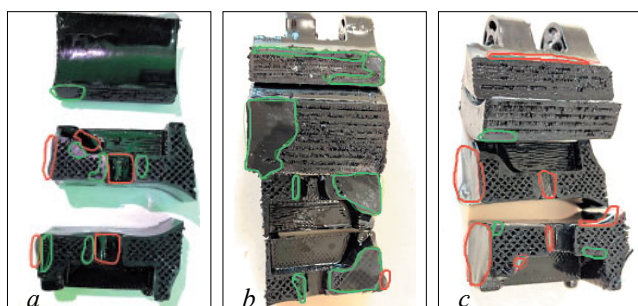


Рис. 7. Сечения 3D-печатных полимерных образцов типа опора пальцев, пропитанных эпоксидными композициями с разным количеством разбавителя, % по массе: а – 0; б – 0,5; с – 1,5 (красным отмечены области с большим количеством отвержденной смолы, не проникшей во внутренние полости изделия; зеленым – пропитанные полости изделия)

Fig. 7. Cross-sections of 3D-printed polymer samples of pin support type impregnated with epoxy compositions containing different amounts of diluent, % by weight: a – 0; b – 0.5; c – 1.5 (red marks show the areas with a large amount of cured resin that has not penetrated into the product internal cavities; green marks show the impregnated product cavities)

точно большое количество эпоксидной смолы, отвержденной на внешних поверхностях изделия.

Второй случай, с добавлением 0,5% ацетона по массе, показывает, что пропитанные области изделия находятся не только по границе стенки изделия, но и проникают вглубь детали, практически достигая середины сечения всей детали.

Третий вариант, с добавлением 1,5% ацетона по массе, характеризуется наименьшим среди всех исследуемых уровней вязкости пропиточных составов количеством эпоксидной композиции, проникшей во внутренние полости детали, а также наибольшим количеством эпоксидной смолы, отвержденной на внешних поверхностях (красные области). Вероятно, полученный эффект стал следствием низкой вязкости, способствующей вытеканию эпоксидной композиции из внутренних полостей изделия во время стадии отверждения.

Эксперимент повторили с образцами типа шестерня (рис. 8). Ни один из них не пропитался эпоксидной композицией. Причина, предположительно, заклю-

чается в повышенной плотности внешних стенок изделия в сравнении с образцами типа опора пальцев. При этом наблюдается схожая закономерность в количестве эпоксидной смолы, отвержденной на внешней поверхности изделия.

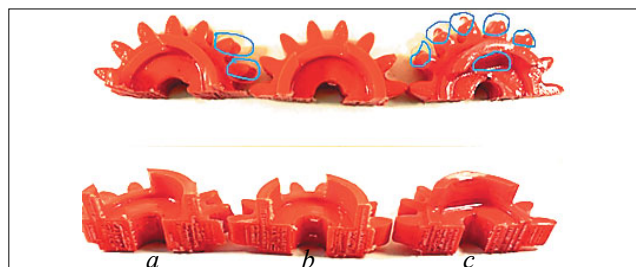


Рис. 8. Сечения 3D-печатных полимерных образцов типа шестерня, пропитанных эпоксидными композициями с разным количеством разбавителя, % по массе: а – 0; б – 0,5; с – 1,5 (синим отмечены области с большим количеством отвержденной смолы, не проникшей во внутренние полости изделия)

**Выводы.** На основе проведенного анализа 3D-печатных полимерных образцов типа опора пальцев и шестерня, пропитанных эпоксидными композициями с разным количеством разбавителя, можно сделать вывод, что наиболее оптимальна композиция с вязкостью эпоксидной смолы примерно 8,8 Па·с, что соответствует содержанию 0,5% ацетона по массе. Образцы, пропитанные этой композицией, характеризуются наибольшим количеством заполненных внутренних полостей, а также наименьшим количеством смолы, отвержденной на внешних плоскостях детали.

Деталь типа опора пальцев пропиталась значительно лучше, чем шестерня. Необходимо оптимизировать конфигурации изделия при его проектировании с учетом наиболее оптимальной толщины стенки для обеспечения качественной пропитки.

В дальнейшем планируется исследовать зависимость физико-механических свойств пропитанных 3D-печатных образцов от вида и количества используемого разбавителя.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Дорохов А.С., Свиридов А.С. Применение аддитивных технологий при техническом сервисе садовой техники // *Агроинженерия*. 2020. N6(100). С. 39-44.
3. Лопатина Ю.А., Свиридов А.С., Плохих А.И. Оценка возможности применения 3D-печати филаментом из вторичного сырья для изготовления деталей сельскохозяйственных машин и оборудования // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. N10. С. 58-64.
4. Свиридов А.С., Тузилин С.П., Лопатина Ю.А. Использование цифровой 3D-фермы в ремонтном производстве сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2019. N1(134). С. 93-99.
5. Лопатина Ю.А. Применение 3D-печати методом FDM при ремонте машин и оборудования // *Технический сервис машин*. 2019. N3(136). С. 40-45.
6. Краснящих К.А., Свиридов А.С. Применение быстрого прототипирования в АПК на примере опор скольжения // *Наука без границ*. 2018. N2(19). С. 51-55.
7. Berretta S., Davies R., Shyng Y.T., Wang Y., Ghita O. Fused Deposition Modelling of high temperature polymers: Exploring CNT PEEK composites. *Polymer Testing*. 2017. Vol. 63. 251-262.
8. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., Rodríguez G.P. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 148. 93-103.
9. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., Reverte J.M. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*. 2018. Vol. 68. 415-423.
10. Гончарова Ю.А. Исследование механических свойств композиционного материала на основе 3D-печатных каркасов, наполненных полимерным компаундом // *Агроинженерия*. 2022. N34. С. 65-70.
11. Filippova A.V., Lopatina Y.A., Sviridov A.S. Study of the tensile strength of a polymer composite material based on abs-plastic and impregnated in epoxy resin with different types of hardener. *Journal of physics: conference series*. 2021. 012015.
12. Лопатина Ю.А., Денисов В.А. Исследование пористости композитных конструкций на основе 3D-печатных каркасов, пропитанных эпоксидной смолой // *Технический сервис машин*. 2021. N1(142). С. 131-139.
13. Lopatina Y.A., Slavkina V.E. Development of a high strength polymeric composite material using 3D-printing and vacuum impregnation technology. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020. 012019.
14. Lopatina Y.A., Filippova A.V. Research of composition porosity based on 3d-printed frames and impregnated with epoxy resin. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020. 012031.
15. Dev S., Srivastava R. Experimental investigation and optimization of FDM process parameters for material and mechanical strength. *Materials Today: Proceedings*. 2020. 26. S2214785320311901.
16. Воробьев А. Эпоксидные смолы // *Компоненты и технологии*. 2003. N8(34). С. 170-173.
17. Мараховский К.М., Осипчик В.С., Панова Д.Н., Горшкова Е.А., Бичевый Л.С., Повернов П.А. Кинетика отверждения эпоксисинтетических связующих, модифицированных ДЭГ-1 // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2019. N1. С. 17-21.
18. Махин М.Н., Терехов А.В., Дмитриев Г.С., Махина Д.Н., Занавескин Л.Н., Хаджиев С.Н. Композиционные материалы: свойства полимерной матрицы на основе эпоксидной смолы и моноэпоксидного разбавителя – глицидилового эфира п-трет-бутилфенола // *Журнал прикладной химии*. 2018. N5. С. 749-754.

## REFERENCES

1. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Perspektivy razvitiya metodov i tekhnicheskikh sredstv zashchity sel'skokhozyaystvennykh rasteniy [Development prospects for methods and technical means of farm crop protection]. *Agroinzheneriya*. 2021. N1(101). 26-35 (In Russian).
2. Dorokhov A.S., Sviridov A.S. Primenenie additivnykh tekhnologiy pri tekhnicheskoy servise sadovoy tekhniki [Application of additive technologies in the technical service of garden equipment]. *Agroinzheneriya*. 2020. N6(100). 39-44 (In Russian).
3. Lopatina Yu.A., Sviridov A.S., Plokhikh A.I. Otsenka vozmozhnosti primeneniya 3D-pechati filamentom iz vtorichnogo syriya dlya izgotovleniya detaley sel'skokhozyaystvennykh mashin i oborudovaniya [Evaluation of the possibility of using 3d printing filament produced from secondary raw materials for the manufacturing parts for agricultural machinery and equipment]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2019. N10. 58-64 (In Russian).
4. Sviridov A.S., Tuzhilin S.P., Lopatina Yu.A. Ispol'zovanie tsifrovoy 3D-fermy v remontnom proizvodstve sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [The use of digital 3d-farm for use in the repair of agricultural machinery]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N1(134). 93-99 (In Russian).
5. Lopatina Yu.A. Primenenie 3D-pechati metodom FDM pri remonte mashin i oborudovaniya [Application of 3d printing by fdm method for repairing machinery and equipment]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N3(136). 40-45 (In Russian).
6. Krasnyashchikh K.A., Sviridov A.S. Primenenie bystrogo prototipirovaniya v APK na primere opor skol'zheniya [The application of rapid prototyping in agriculture on the example of sliding support]. *Nauka bez granits*. 2018. N2(19). 51-55.

- (In Russian).
7. Berretta S., Davies R., Shyng Y.T., Wang Y., Ghita O. Fused Deposition Modelling of high temperature polymers: Exploring CNT PEEK composites. *Polymer Testing*. 2017. Vol. 63. 251-262 (In English).
  8. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., Rodríguez G.P. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 148. 93-103 (In English).
  9. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., Reverte J.M. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*. 2018. Vol. 68. 415-423 (In English).
  10. Goncharova Yu.A. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv kompozitsionnogo materiala na osnove 3D-pechatnykh karkasov, napolnennykh polimernym kompaundom [Study of mechanical properties of a composite material based on 3D-printed frames filled with polymer compound]. *Agroinzheneriya*. 2022. N34. 65-70 (In Russian).
  11. Filippova A.V., Lopatina Y.A., Sviridov A.S. Study of the tensile strength of a polymer composite material based on abs-plastic and impregnated in epoxy resin with different types of hardener. *Journal of physics: conference series*. 2021. 012015 (In English).
  12. Lopatina Yu.A., Denisov V.A. Issledovanie poristosti kompozitnykh konstruktsiy na osnove 3D-pechatnykh karkasov, propitannykh epoksidnoy smoloy [Porosity of composite structures based on 3d-printed frames impregnated with epoxy resin]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2021. N1(142). 131-139 (In Russian).
  13. Lopatina Y.A., Slavkina V.E. Development of a high strength polymeric composite material using 3D-printing and vacuum impregnation technology. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020. 012019 (In English).
  14. Lopatina Y.A., Filippova A.V. Research of composition porosity based on 3d-printed frames and impregnated with epoxy resin. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020. 012031 (In English).
  15. Dev S., Srivastava R. Experimental investigation and optimization of FDM process parameters for material and mechanical strength. *Materials Today: Proceedings*. 2020. 26. S2214785320311901(In English).
  16. Vorob'ev A. Epoksidnye smoly [Epoxy resins]. *Komponenty i tekhnologii*. 2003. N8(34). 170-173 (In Russian).
  17. Marakhovskiy K.M., Osipchik V.S., Panova D.N., Gorshkova E.A., Bicheviy L.S., Povernov P.A. Kinetika otverzhdeniya epoksinovolachnykh svyazuyushchikh, modifitsirovannykh DEG-1 [Curing kinetics of epoxy-crosslinked binders modified with DEH-1]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2019. N1. 17-21 (In Russian).
  18. Makhin M.N., Terekhov A.V., Dmitriev G.S., Makhina D.N., Zanaevskiy L.N., Khadzhiev S.N. Kompozitsionnye materialy: svoystva polimernoy matritsy na osnove epoksidnoy smoly i monoepoksidnogo razbavitelya - glitsidilovogo efira p-tret-butylfenola [Composite materials: properties of polymeric matrix based on epoxy resin and monoepoxide diluent, p-tert-butylphenol glycidyl ether]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2018. N5. 749-754 (In Russian).

# Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

# Заявленный вклад соавторов:

Казберов Р.Я. – литературный анализ, формулирование основных направлений исследования, написание текста, формирование общих выводов;

Тужилин С.П. – изготовление образцов, обработка результатов исследования, доработка текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

# Coauthors' contribution:

Kazberov R.Ya. – literature review, formulating the key research concepts, writing the article manuscript, developing the main conclusions;

Tuzhilin S.P. – producing the samples, processing the research 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

13.06.2022

08.09.2022

## Эффективность фотOLUMИНЕСЦЕНТНОГО метода контроля гомогенности кормовых смесей в животноводстве

Михаил Владимирович Беляков<sup>1</sup>,

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: bmw20100@mail.ru;

Евгений Александрович Никитин<sup>1</sup>,

младший научный сотрудник,  
e-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru;

Игорь Юрьевич Ефременков<sup>2</sup>,  
бакалавр, e-mail: matiusharius@mail.ru

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

<sup>2</sup>Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Смоленск, Российская Федерация

**Реферат.** Провели анализ спектральных систем оценки для контроля гомогенности кормовых смесей. (*Цель исследования*) Изучить оптические люминесцентные свойства основных составляющих кормовых смесей в ультрафиолетовом и видимом диапазонах и разработать методику фотOLUMИНЕСЦЕНТНОГО контроля их качества. (*Материалы и методы*) Исследовали две группы компонентов кормовой смеси: гранулированный комбикорм и кукурузный силос. Спектральные характеристики измеряли на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама». Установили спектры возбуждения при синхронном сканировании и на их основе определили спектры фотOLUMИНЕСЦЕНЦИИ по ранее апробированной методике. (*Результаты и обсуждение*) В спектрах возбуждения компонентов выявили основные максимумы, соответствующие длине 362 нанометра и 424 нанометра. Определили, что все характеристики фотOLUMИНЕСЦЕНЦИИ одномодальные, а измеренные кривые для каждой длины волны возбуждения качественно схожи, но различаются количественно: например, различие потоков комбикорма и светлого силоса составляет 2,4 раза при длине 232 нанометра, 2,8 раза – при 424 и 3,8 раза – при 362 нанометрах. Рекомендовали использовать для возбуждения опытной пробы кормосмеси излучение длины волны 362 нанометра, а фотOLUMИНЕСЦЕНЦИЮ регистрировать в диапазоне 390-540 нанометров. Описали этапы методики экспресс-контроля качества смешивания: начальная градуировка по люминесценции комбикорма, пробоподготовка, возбуждение люминесценции смеси, регистрация потока люминесценции, усиление фотосигнала и его обработка по алгоритмам диагностики, после чего следует либо кормораздача, либо продолжение смешивания с повторным экспресс-контролем. (*Выводы*) Предложили методику оценки качества смешивания компонентов кормовой смеси, которая может быть реализована с помощью компактного спектрального прибора. Выявили, что использование предлагаемого метода в технологическом процессе приготовления кормовой смеси позволит снизить энергетические затраты на смешивание кормов. **Ключевые слова:** кормление крупного рогатого скота, гомогенность кормовых смесей, экспресс-контроль качества смешивания кормов, спектр возбуждения, спектр люминесценции, поток излучения.

■ **Для цитирования:** Беляков М.В., Никитин Е.А., Ефременков И.Ю. Эффективность фотOLUMИНЕСЦЕНТНОГО метода контроля гомогенности кормовых смесей в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 55-61. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-55-61. EDN FKFXWJ.

## Efficiency of the Photoluminescent Method for Monitoring the Homogeneity of Feed Mixtures in Animal Husbandry

Mikhail V. Belyakov<sup>1</sup>,

Dr.Sc.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: bmw20100@mail.ru;

Evgeniy A. Nikitin<sup>1</sup>,

junior researcher, e-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru;

Igor Yu. Efremenko<sup>2</sup>,  
bachelor's student, e-mail: matiusharius@mail.ru

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

<sup>2</sup>Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Russian Federation

**Abstract.** The spectral evaluation systems for controlling the feed mixtures homogeneity were analyzed. (*Research purpose*) To study the optical luminescent properties of the feed mixtures main components in the ultraviolet and visible range and develop a method for their photoluminescent quality control. (*Materials and methods*) Two groups of feed mixture components were studied:

granular compound feed and corn silage. The spectral characteristics were measured by Fluorat-02-Panorama spectrofluorimeter. The synchronous scanning helped to identify the excitation spectra and, on their basis, the photoluminescence spectra were determined according to a previously tested technique. (*Results and discussion*) The components excitation spectra revealed the main maxima of 362 nanometers and 424 nanometers. All the photoluminescence characteristics proved to be single-modal, for each excitation wavelength, the measured curves are qualitatively similar, but differ quantitatively: for example, the difference in the compound feed and light silage flows is 2.4 times at a length of 232 nanometers, 2.8 times at 424 nanometers and 3.8 times at 362 nanometers. It is advisable to use 362-nanometer wavelength radiation to excite the experimental sample of the feed mixture, and to record photoluminescence within the range of 390-540 nanometers. The method of express quality control of mixing includes the following stages: initial calibration by the compound feed luminescence, sample preparation, mixture luminescence excitation, the luminescence flux registration, photo signal amplification and processing according to diagnostic algorithms, followed by either feed distribution or sequel mixing with repeated express control. (*Conclusions*) The proposed method for assessing the quality of mixing the feed mixture components can be implemented using a compact spectral device. It was found that the use of the proposed method in the technological process of preparing the feed mixture will reduce the energy costs.

**Keywords:** cattle feeding, feed mixtures homogeneity, express control of the feed mixing quality, excitation spectrum, luminescence spectrum, radiation flux.

■ **For citation:** Belyakov M.V., Nikitin E.A., Efremkov I.Yu. Effektivnost' fotolyuminestsentnogo metoda kontrolya homogennosti kormovykh smesey v zhivotnovodstve [Efficiency of the photoluminescent method for monitoring the homogeneity of feed mixtures in animal husbandry]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 55-61 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-55-61. EDN FKFXWJ.

Процесс кормления сельскохозяйственных животных формируется из длинной цепочки последовательных технологических операций, выполняемых механизированными средствами, роботами, а также непосредственно человеком [1].

Контроль качества кормов, получаемых путем естественного выращивания (зеленая масса свежескошенной травы, сенаж, кукурузный силос и пр.), осуществляют несколькими способами. Классические методы «мокрой химии» включают отбор проб, пробоподготовку (измельчение, сушку и пр.), лабораторный анализ содержания протеина, жира, углеводов, сухого вещества, нейтрально- и кислотно-детергентной клетчатки. В последние 3 года среди коммерческих решений наибольшее распространение получают портативные анализаторы питательности кормов, такие как *Aurora NIR* или *Dinamica Generale* с автономной аккумуляторной системой. Их действие основано на сканировании спектральных характеристик заготавливаемого кормового сырья в полевых условиях [2-3]. Приборная база, основанная на спектрометрии отражения ближнего инфракрасного диапазона, достаточно функциональна. Подобные методы распространены в других индустриях, где необходимо отслеживать эффективность конвейерного производства, контролировать однородность потока порошкообразных смесей [4-5].

К недостаткам спектральных приборов стоит отнести ограниченность функционала, обусловленную возможностью использования только в специализированных помещениях. В летнее время интенсивность солнечного излучения может существенно повлиять на достоверность показателей спектрального анализа [6].

Применительно к кормлению крупного рогатого скота на животноводческих комплексах стоит отметить, что анализ питательности компонентов рациона – это лишь предварительные работы, направленные на составление рецепта полнорационных кормовых смесей. Гораздо важнее знать, что получает животное непосредственно на кормовом столе [7-9].

Проблема заключается в отсутствии автоматизированных систем, которые могли бы в режиме реального времени отслеживать эффективность смешивания кормовых смесей и выдавать рекомендации по режиму работы смесителей, тем самым обеспечивая энергоэффективность кормосмесителя, в том числе для роботизированных машин, работающих от аккумуляторных батарей [9, 10].

Ключевым индикатором питательности кормовой смеси выступает показатель сухого вещества. В кормах естественного происхождения высокий уровень влажности – до 70%. Чтобы сбалансировать содержание сухого вещества и повысить энергетическую ценность, вводят различные концентрированные комбикорма с уровнем влажности до 14%. При смешивании общий показатель сухого вещества в рационе составляет около 50% [11-13].

Отсутствие автоматических систем мониторинга однородности получаемого в смесителях рациона не позволяет контролировать качество смешивания, что может негативно сказаться на продуктивности и здоровье животных. Рацион должен быть сбалансирован и представлять собой однородную, многокомпонентную, однородную смесь [14-17].

Важно учитывать также влияние технологического оборудования для приготовления кормов на ферме. Например, на двух идентичных животноводче-

ских комплексах с равноценным генетическим потенциалом поголовья и рационом кормления разница в урожаях может составить 2,7% [18]. Одну ферму обслуживал прицепной миксер-раздатчик кормов, на другой ферме использовалась самоходная машина с системой самозагрузки.

Мы предложили использовать фотолюминесцентный метод для контроля гомогенности кормовых смесей в животноводстве – на примере экспериментальной проверки спектральных характеристик кукурузного силоса и комбикорма.

**Цель исследования** – изучить оптические люминесцентные свойства основных составляющих кормовых смесей в ультрафиолетовом и видимом диапазонах и разработать методику фотолюминесцентного контроля их качества.

**Материалы и методы.** В качестве компонентов кормовой смеси использовали концентрированные и объемистые корма. Первая группа представлена гранулированным комбикормом: размол пшеницы, размол кукурузы, шрот соевый, жмых рапсовый, влажность 13,5%. Вторая – кукурузным силосом урожая 2021 г. (Московская область), влажностью 69%.

Элементы кукурузного силоса разделили на две фракции:

- первая – светло-желтая стебельчатая часть;
- вторая – ярко-зеленая листовая часть.

Спектральные характеристики измеряли на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (рис. 1). Прибор соединен со светозащитной камерой системой кварцевых световодов и управляется от персонального компьютера с программным обеспечением *Panorama Pro*.

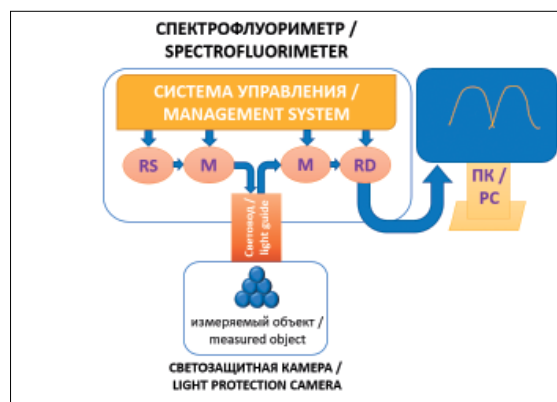


Рис. 1. Принципиальная схема измерительной установки:

RS – источник излучения; М – дифракционные монохроматоры; RD – приемник излучения

Fig. 1. Schematic diagram of the measuring unit: RS is the radiation source; M – diffraction monochromators; RD – radiation receiver

По ранее апробированной методике измерили спектры возбуждения (поглощения)  $\eta_s(\lambda)$  при синхронном сканировании и на их основе – спектры люминесценции  $\varphi_\lambda(\lambda)$  (рис. 2) [19].



Рис. 2. Измерение спектров фотолюминесценции

Fig. 2. Measuring the photoluminescence spectra

Синхронное сканирование предполагает одновременную перестройку монохроматоров каналов возбуждения и регистрации люминесценции при фиксированной величине их смещения, желательно близкой к стоксову сдвигу. В этом случае получается максимальная величина сигнала. По результатам измерений провели статистическую обработку, в том числе усреднение по 50 спектрам. В программе *Panorama Pro* вычислили интегральные параметры спектров  $H$  и  $\Phi$ :

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_s(\lambda) d\lambda; \quad (1)$$

$$\Phi = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \varphi_\lambda(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $H$  – интегральная поглощательная способность, отн.е. (относительные единицы);

$\eta_s(\lambda)$  – спектральная характеристика возбуждения, отн.е./нм;

$\lambda_1 \dots \lambda_2$  – границы рабочего спектрального диапазона возбуждения, нм;

$\Phi$  – поток фотолюминесценции, отн.е.;

$\varphi_\lambda(\lambda)$  – спектральная характеристика фотолюминесценции, отн.е./нм;

$\lambda_3 \dots \lambda_4$  – границы рабочего спектрального диапазона фотолюминесценции, нм.

**Результаты и обсуждение.** Визуальный анализ показывает, что гранулы комбикорма оптически более однородны, чем силос, составные части которого имеют различные оттенки – от белесого до зелено-коричневого цвета. Было принято решение измерять спектры комбикорма как единого объекта, а в силосе разделить его фракции, отобрав визуально наиболее темные (как правило, листья) и наиболее светлые (как правило, сердцевина стеблей). Остальные фракции по оптическим свойствам занимают промежуточное положение.

Качественно все спектры схожи. В них присутствуют небольшие пики с максимумами – 232 нм; 274; 485 и 528 нм. Основные максимумы приходятся на 362 и 424 нм, которые наряду с 232 и 485 нм отмечались ранее у большинства семян зерновых, зернобобовых и овощных растений [19–22]. Наиболее высокие и ярко выраженные пики соответствуют 232; 362 и 424 нм (рис. 3). Для количественной оценки отличия спектральных свойств возбуждения комбикорма

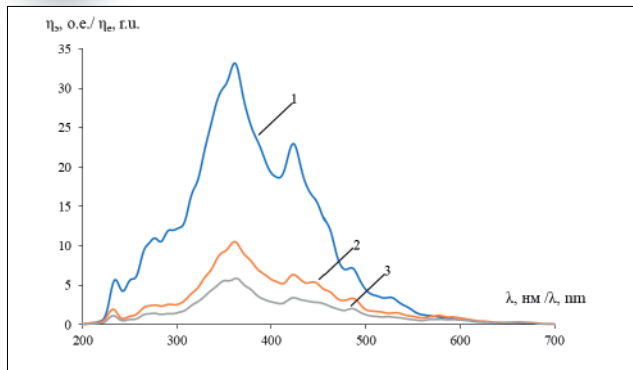


Рис. 3. Спектральные характеристики возбуждения: 1 – комбикорма, 2 – силоса светлого, 3 – силоса темного

Fig. 3. Spectral characteristics of excitation: 1 – compound feed, 2 – light silage, 3 – dark silage

и силоса по формуле (1) рассчитали интегральные поглощательные способности как во всем спектральном диапазоне, так и в отдельных его частях: 210-240 нм – для пика 232 нм, 300-410 нм – для пика 362 нм и 410-470 нм – для пика 424 нм (табл. 1).

Различие интегральных поглощательных способ-

| Таблица 1<br>Table 1<br>ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ<br>КОМБИКОРМА И РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ СИЛОСА<br>INTEGRAL PARAMETERS OF THE EXCITATION SPECTRA FOR COMPOUND<br>FEED AND VARIOUS SILAGE FRACTIONS |                                                 |         |         |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Виды корма<br>Types of feed                                                                                                                                                                                     | Спектральный диапазон, нм<br>Spectral range, nm |         |         |         |
|                                                                                                                                                                                                                 | полный<br>full                                  | 210-240 | 300-410 | 410-470 |
| Комбикорм<br>Compound feed                                                                                                                                                                                      | 3957                                            | 73      | 2363    | 1202    |
| Силос светлый<br>Light silage                                                                                                                                                                                   | 1715                                            | 27      | 690     | 362     |
| Силос темный<br>Dark silage                                                                                                                                                                                     | 497                                             | 17      | 396     | 199     |

ностей комбикорма и светлой части силоса довольно значительно – 2,3 раза для всего спектра, в диапазоне 210-240 нм – в 2,7 раза, в диапазоне 300-410 нм – в 3,4 раза, в диапазоне 410-470 нм – в 3,3 раза. Между светлой и темной фракциями силоса отличие составляет 3,4 раза для всего спектра, а для его частей – 1,6-1,8 раза.

На следующем этапе измерили спектральные характеристики фотолюминесценции при возбуждении излучением с длиной волн 232 нм, 362 и 424 нм (рис. 4).

Как видим, все полученные характеристики одно-модальные. Для каждой длины волны возбуждения измеренные кривые качественно схожи, но различаются количественно. По формуле (2) вычислили интегральные потоки фотолюминесценции  $\Phi_\lambda$  для различных длин волн возбуждения (табл. 2).

Различие люминесцентных потоков светлых и темных фракций силоса составляет 2,3 раза, комбикорма и светлого силоса – 2,4-3,8 раза. С учетом того, что

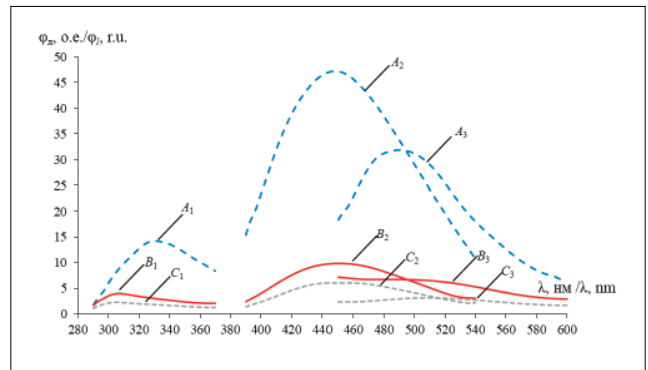


Рис. 4. Спектральные характеристики фотолюминесценции: комбикорма ( $A_1, A_2, A_3$ ), силоса светлого ( $B_1, B_2, B_3$ ) и силоса темного ( $C_1, C_2, C_3$ ) в диапазонах 232 нм, 362 и 424 нм соответственно

Fig. 4. Spectral characteristics of photoluminescence for compound feed ( $A_1, A_2, A_3$ ), light silage ( $B_1, B_2, B_3$ ) and dark silage ( $C_1, C_2, C_3$ ) in the ranges of 232 nm, 362 and 424 nm, respectively

| Таблица 2<br>Table 2<br>ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ<br>КОМБИКОРМА И РАЗЛИЧНЫХ СИЛОСНЫХ ФРАКЦИЙ<br>INTEGRAL PARAMETERS OF THE LUMINESCENCE SPECTRA<br>OF COMPOUND FEED AND VARIOUS SILAGE FRACTIONS |                                                          |      |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------|------|
| Виды корма<br>Types of feed                                                                                                                                                                                          | Длина волны возбуждения, нм<br>Excitation wavelength, nm |      |      |
|                                                                                                                                                                                                                      | 232                                                      | 362  | 424  |
| Комбикорм<br>Compound feed                                                                                                                                                                                           | 819                                                      | 4620 | 2519 |
| Силос светлый<br>Light silage                                                                                                                                                                                        | 347                                                      | 1204 | 901  |
| Силос темный<br>Dark silage                                                                                                                                                                                          | 150                                                      | 525  | 390  |

силос будет состоять из смешанных фракций, то соотношение потоков вырастет до 6-8 раз. Таким образом целесообразно использовать для возбуждения опытной пробы кормосмеси излучение длины волны 362 нм, а фотолюминесценцию регистрировать в диапазоне 390-540 нм.

Методику экспресс-контроля качества смешивания можно представить схематично (рис. 5):

1. Первоначально проводят градуировку путем измерения напряжения  $U_0$  при регистрации потока фотолюминесценции от чистого комбикорма. Последующую градуировку осуществляют по мере необходимости, например при замене комбикорма на другой вид.

2. Затем опытную пробу смеси кормов помещают в темную светонепроницаемую камеру. Возможно встраивание процесса экспресс-диагностики в технологические процессы кормораздачи для непрерывного контроля ее эффективности.

3. Следующий шаг – возбуждение фотолюминесценции компонентов корма излучением узкого спектрального диапазона с максимумом  $\lambda=362$  нм в течение 20 мкс.

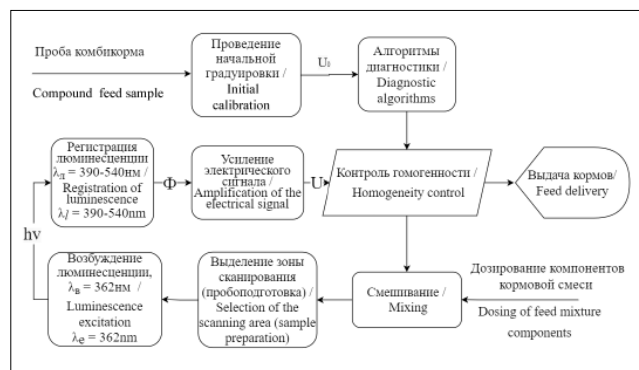


Рис. 5. Методика экспресс-контроля качества смешивания  
Fig. 5. The method for the express control of mixing quality

4. Регистрируется сигнал, пропорциональный потоку фотолюминесценции  $\Phi$  в спектральном диапазоне 390-540 нм. Процесс происходит 2-3 с с усреднением результата.

5. Полученный фотосигнал (фотонапряжение  $U$ , фототок  $I$ ), пропорциональный потоку  $\Phi$ , проходит через усилитель и поступает в микропроцессор, где обрабатывается с учетом имеющегося в его памяти исходного значения  $U_0$  по соответствующим алгоритмам диагностики.

6. По результатам определения качества смешивания принимается решение о дальнейших действиях: кормораздача или продолжение смешивания с повторным экспресс-контролем.

Несмотря на то, что люминесцентные характеристики силоса и комбикорма качественно схожи, имеется возможность анализа качества смешивания кормов по величине потока фотолюминесценции на основе априорно полученных данных. Такая методика экспресс-контроля включает возбуждение на 362 нм и регистрацию фотолюминесценции в диапазоне 390-540 нм с последующим сравнением фотосигнала с сигналом чистого комбикорма и определением его доли в смеси.

### Выводы

1. Предлагаемая методика оценки качества смешивания компонентов кормовой смеси может быть реализована в виде компактного спектрального прибора и вычислителя с программным обеспечением для автоматизированной обработки и интерпретации спектров фотолюминесценции в диапазоне 390-540 нм.

2. Использование предлагаемого метода в технологическом процессе приготовления кормовой смеси позволит снизить энергетические затраты на вращение смешивающего рабочего органа в миксере-раздатчике, при сохранении качества смешивания.

3. Сформированный задел теоретических и экспериментальных основ позволит реализовать более надежные и точные технологические решения, выступающие в качестве датчика обратной связи в автоматизированных и роботизированных машинах по приготовлению многокомпонентных смесей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Shurygin B., Solovchenko A., Chivkunova O., Solovchenko O., Dorokhov A., Smirnov I., Khort D., Astashev M.E. Comparison of the non-invasive monitoring of fresh-cut lettuce condition with imaging reflectance hyperspectrometer and imaging pam-fluorimeter. *Photonics*. 2021. 8(10). 425.
- Burmistrov D.E., Ignatenko D.N., Lednev V.N., Gudkov S.V., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Nikitin E.A., Lobachevsky Y.P., Zvyagin A.V. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*. 2021. 8(12). 551.
- Fountas S., Carli G., Sorensen C.G., Tsiropoulos Z., Cavalaris C., Vatsanidou A., Liakos B., Canavari M., Wiebensohn J., Tisserie B. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and electronics in agriculture*. 2015. 115. 40-50.
- Дорохов А.С., Бельшикина М.Е. Агроклиматическая характеристика регионов нечерноземной зоны российской федерации и оценка пригодности для возделывания современных раннеспелых сортов сои // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. N3(55). С. 34-39.
- Zi L., Cong X., Peng Y., Chen X. RGB-D Saliency Object Detection Based on Adaptive Manifolds Filtering. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. 586. 174-181.
- Bezen R., Edan Y., Halachmi I. Computer vision system for measuring individual cow feed intake using RGB-D camera and deep learning algorithms. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. 172. 105345.
- Muller A.F., Rukin I., Falldorf C., Bergmann R.B. Multicolor Holographic Display of 3D Scenes Using Referenceless Phase Holography (RELPH). *Photonics*. 2021. 8(7). 247.
- Zhou W.L., Yuan C.L. Model of Image Color Difference and Partial Based On RGB Color Distribution Measuring. *International journal of grid and distributed computing*. 2016. 9(8). 231-239.
- Rego G., Ferrero F., Valledor M., Campo J.C., Forcada S., Royo L.J., Soldado A. A portable IoT NIR spectroscopic system to analyze the quality of dairy farm forage. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. 175. 105578.
- Buza M.H., Holden L.A., White R.A., Ishler V.A. Evaluating the effect of ration composition on income over feed cost and milk yield. *Journal of dairy science*. 2014. 97(5). 3073-3080.
- Bargo F., Muller L.D., Delahoy J.E., Cassidy T.W. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of dairy science*. 2002. 85(7). 1777-1792.
- Bloch V., Levit H., Halachmi I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows. *Journal of dairy research*. 2019. 86(1). 34-39.
- Krawczel P.D., Klaiber L.M., Thibeau S.S., Dann H.M. Tech-

nical note: Data loggers are a valid method for assessing the feeding behavior of dairy cows using the Calan Broad-bent Feeding System. *Journal of dairy science*. 2012. 95(8). 4452-4456.

14. Самохвалов А.А., Вейко В.П., Леднев В.Н., Першин С.М., Федоров А.Н., Парфенов В.А., Кирцидели И.Ю., Щеголихин А.Н. Лазерная экспресс-диагностика микромицетов-биодеструкторов // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2017. N9. С. 71-77.
15. Першин С.М., Брысев А.П., Гришин М.Я., Леднев В.Н., Бункин А.Ф., Клопотов Р.В. Реконструкция нелинейного профиля давления ультразвукового пучка в воде по сигналам лидара комбинационного рассеяния // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2021. Т. 85. N6. С. 863-868.
16. Yanykin D.V., Burmistrov D.E., Simakin A.V., Ermakova J.A., Gudkov S.V. Effect of up-converting luminescent nanoparticles with increased quantum yield incorporated into the fluoropolymer matrix on solanum lycopersicum growth. *Agronomy*. 2022. 12(1). 108.
17. Sharapov M.G., Gudkov S.V., Lankin V.Z. Hydroperoxide-reducing enzymes in the regulation of free-radical processes. *Biochemistry (Moscow)*. 2021. 86(10). 1256-1274.
18. Grinberg M.A., Balalaeva I.V., Gromova E., Sinitsyna Y., Sukhov V., Vodeneev V., Gudkov S.V. Effect of chronic  $\beta$ -Radiation on long-distance electrical signals in wheat and their role in adaptation to heat stress. *Environmental and Experimental Botany*. 2021. 184. 104378.
19. Bashilov A.M., Efremenko I.Y., Belyakov M.V., Lavrov A.V., Gulyaev A.A., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I., Boyko A.A. Determination of Main Spectral and Luminescent Characteristics of Winter Wheat Seeds Infected with Pathogenic Microflora. *Photonics*. 2021. 8. 494.
20. Simakin A.V., Ivanyuk V.V., Gudkov S.V., Dorokhov A.S. Photoconversion fluoropolymer films for the cultivation of agricultural plants under conditions of insufficient insolation. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. 10. N22. 1-10.
21. Ivanyuk V.V., Shkirin A.V., Belosludtsev K.N., et al. Influence of fluoropolymer film modified with nanoscale photoluminophor on growth and development of plants. *Frontiers in Physics*. 2020. 8. 1-6.
22. Semenova N.A., Smirnov A.A., Grishin A.A., et al. The effect of plant growth compensation by adding silicon-containing fertilizer under light stress conditions. *Plants*. 2021. 10. N7. 1287.

## REFERENCES

1. Shurygin B., Solovchenko A., Chivkunova O., Solovchenko O., Dorokhov A., Smirnov I., Khort D., Astashev M.E. Comparison of the non-invasive monitoring of fresh-cut lettuce condition with imaging reflectance hyperspectrometer and imaging pam-fluorimeter. *Photonics*. 2021. 8(10). 425 (In English).
2. Burmistrov D.E., Ignatenko D.N., Lednev V.N., Gudkov S.V., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Nikitin E.A., Lobachevsky Y.P., Zvyagin A.V. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*. 2021. 8(12). 551 (In English).
3. Fountas S., Carli G., Sorensen C.G., Tsiropoulos Z., Cavalari C., Vatsanidou A., Liakos B., Canavari M., Wiebensohn J., Tisserye B. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and electronics in agriculture*. 2015. 115. 40-50 (In English).
4. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E. Agroklimatecheskaya kharakteristika regionov nechernozemnoy zony rossiyskoy federatsii i otsenka prigodnosti dlya vozdeleyvaniya sovremennykh rannesplykh sortov soi [Agroclimatic characteristics of regions of the non-black soil zone of the russian federation and suitability estimation for cultivation of modern early soybean varieties]. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2021. N3(55). 34-39 (In Russian).
5. Zi L., Cong X., Peng Y., Chen X. RGB-D Saliency Object Detection Based on Adaptive Manifolds Filtering. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. 586. 174-181 (In English).
6. Bezen R., Edan Y., Halachmi I. Computer vision system for measuring individual cow feed intake using RGB-D camera and deep learning algorithms. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. 172. 105345 (In English).
7. Muller A.F., Rukin I., Falldorf C., Bergmann R.B. Multicolor Holographic Display of 3D Scenes Using Referenceless Phase Holography (RELPH). *Photonics*. 2021. 8(7). 247 (In English).
8. Zhou W.L., Yuan C.L. Model of Image Color Difference and Partial Based On RGB Color Distribution Measuring. *International journal of grid and distributed computing*. 2016. 9(8). 231-239 (In English).
9. Rego G., Ferrero F., Valledor M., Campo J.C., Forcada S., Royo L.J., Soldado A. A portable IoT NIR spectroscopic system to analyze the quality of dairy farm forage. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. 175. 105578 (In English).
10. Buza M.H., Holden L.A., White R.A., Ishler V.A. Evaluating the effect of ration composition on income over feed cost and milk yield. *Journal of dairy science*. 2014. 97(5). 3073-3080 (In English).
11. Bargo F., Muller L.D., Delahoy J.E., Cassidy T.W. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of dairy science*. 2002. 85(7). 1777-1792 (In English).
12. Bloch V., Levit H., Halachmi I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows. *Journal of dairy research*. 2019. 86(1). 34-39 (In English).
13. Krawczel P.D., Klaiber L.M., Thibeau S.S., Dann H.M. Technical note: Data loggers are a valid method for assessing the feeding behavior of dairy cows using the Calan Broad-

- bent Feeding System. *Journal of dairy science*. 2012. 95(8). 4452-4456 (In English).
14. Samokhvalov A.A., Veyko V.P., Lednev V.N., Pershin S.M., Fedorov A.N., Parfenov V.A., Kirtsideli I.Yu., Shchegolikhin A.N. Lazernaya ekspress-diagnostics mikromitsetov-biodestruktorov [Laser express-diagnostics of micro-mycetes-biodestructors]. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2017. N9. 71-77 (In Russian).
  15. Pershin S.M., Brysev A.P., Grishin M.Ya., Lednev V.N., Bunkin A.F., Klopotov R.V. Rekonstruktsiya nelineynogo profilya davleniya ul'trazvukovogo puchka v vode po signalam lidara kombinatsionnogo rasseyaniya [Reconstructing the nonlinear pressure profile of an ultrasonic beam in water using raman lidar signals]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2021. Vol. 85. N6. 863-868 (In Russian).
  16. Yanykin D.V., Burmistrov D.E., Simakin A.V., Ermakova J.A., Gudkov S.V. Effect of up-converting luminescent nanoparticles with increased quantum yield incorporated into the fluoropolymer matrix on solanum lycopersicum growth. *Agronomy*. 2022. 12(1). 108 (In English).
  17. Sharapov M.G., Gudkov S.V., Lankin V.Z. Hydroperoxide-reducing enzymes in the regulation of free-radical processes. *Biochemistry (Moscow)*. 2021. 86(10). 1256-1274 (In English).
  18. Grinberg M.A., Balalaeva I.V., Gromova E., Sinitsyna Y., Sukhov V., Vodenev V., Gudkov S.V. Effect of chronic  $\beta$ -Radiation on long-distance electrical signals in wheat and their role in adaptation to heat stress. *Environmental and Experimental Botany*. 2021. 184. 104378 (In English).
  19. Bashilov A.M., Efremkov I.Y., Belyakov M.V., Lavrov A.V., Gulyaev A.A., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I., Boyko A.A. Determination of Main Spectral and Luminescent Characteristics of Winter Wheat Seeds Infected with Pathogenic Microflora. *Photonics*. 2021. 8. 494 (In English).
  20. Simakin A.V., Ivanyuk V.V., Gudkov S.V., Dorokhov A.S. Photoconversion fluoropolymer films for the cultivation of agricultural plants under conditions of insufficient insolation. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. 10. N22. 1-10 (In English).
  21. Ivanyuk V.V., Shkirin A.V., Belosludtsev K.N., et al. Influence of fluoropolymer film modified with nanoscale photoluminophor on growth and development of plants. *Frontiers in Physics*. 2020. 8. 1-6 (In English).
  22. Semenova N.A., Smirnov A.A., Grishin A.A., et al. The effect of plant growth compensation by adding silicon-containing fertilizer under light stress conditions. *Plants*. 2021. 10. N7. 1287 (In English).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Беляков М.В. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, обработка результатов исследований, доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ;

Никитин Е.А. – обзор литературы, получение исследуемых образцов, формулирование основных направлений исследования, визуализация;

Ефремов И.Ю. – проведение измерений и расчетов, обработка результатов исследований, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Belyakov M.V. – scientific guidance, formulating the main research directions, development of the theoretical premises, research results processing, manuscript revision,, formulating general conclusions and literature review;

Nikitin E.A. – literature review, obtaining test samples, formulating the main directions of the research, visualization;

Efremkov I.Yu. – measurements and calculations, research results processing, visualization.

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

07.02.2022

26.04.2022

## Влияние субклинического и клинического мастита на процесс молокоотдачи коров ярославской породы

Дмитрий Юрьевич Павкин,  
кандидат технических наук,  
e-mail: dimqaqa@mail.ru;  
Артем Рустамович Хакимов,  
аспирант, младший научный сотрудник,  
e-mail: arty.hv@gmail.com;

Федор Евгеньевич Владимиров,  
научный сотрудник,  
e-mail: fvladimirov21@gmail.com;  
Сергей Сергеевич Юрочка,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: yurochkaSR@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Проанализировали процесс доения здоровых коров и с заболеванием мастита по таким параметрам, как средний разовый удой, скорость молокоотдачи, длительность доения, для оценки различий между ними и необходимости использовать отличные от стандартных методы доения. (*Цель исследования*) Изучить влияние мастита на молокоотдачу коров и разработать рекомендации по доению заболевших животных. (*Материалы и методы*) Сформировали три группы животных по результатам теста на мастит: первая – здоровые, вторая – с субклиническим маститом, третья – с клинической формой заболевания. Провели контрольные дойки для сбора данных. Результаты скорости молокоотдачи фиксировали каждые 15 секунд доения. (*Результаты и обсуждение*) Выявили значительные различия между группами в скорости молокоотдачи (1,90; 0,89 и 0,49 килограмма в минуту соответственно) и продолжительности доения (281; 375 и 294 секунды). (*Выводы*) Определили, что в случае субклинического мастита доение наиболее продолжительное (в среднем 375 секунд). Отметили смещение пика скорости молокоотдачи со второй минуты доения на третью по сравнению со здоровыми животными. Выявили, что в случае клинического мастита длительность доения (295 секунд) меньше, чем при субклиническом, но при этом практически отсутствует пик скорости молокоотдачи. Подтвердили необходимость смещать режим интенсивного доения животного с субклиническим маститом на 30-45 секунд, а также использовать щадящий режим доения для коров с клиническим маститом.

**Ключевые слова:** производство молока, доение коров, продолжительность доения, мастит, скорость молокоотдачи.

■ **Для цитирования:** Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Владимиров Ф.Е., Юрочка С.С. Влияние субклинического и клинического мастита на процесс молокоотдачи коров ярославской породы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 62-66. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-62-66. EDN YEHYGC.

## Research Into the Influence of Clinical and Subclinical Mastitis on the Milk Flow Rate of the Yaroslavl Breed Cows

Dmitriy Yu. Pavkin,  
Ph.D.(Eng.), e-mail: dimqaqa@mail.ru;  
Artem R. Khakimov,  
Ph.D. student (Eng.), junior researcher,  
e-mail: arty.hv@gmail.com;

Fedor E. Vladimirov,  
researcher, e-mail: fvladimirov21@gmail.com;  
Sergey S. Yurochka,  
junior researcher, e-mail: yurochkaSR@gmail.com

**Abstract.** The process of milking healthy cows and those with mastitis is analyzed in terms of such parameters as average one-time milk yield, milk flow rate, milking duration to assess their differences and the need to use alternative milking methods. (*Research purpose*) To study the impact of mastitis on the milk yield of cows and develop recommendations for milking diseased animals. (*Materials and methods*) Three groups of animals were formed according to the mastitis test results: the first group included healthy cows, the second one those with subclinical mastitis, and the third one included the cows with the clinical form of the disease. The data were collected by control milkings and the milk flow rate results were recorded every 15 seconds. (*Results and discussion*) The results revealed significant differences for the tree groups, both in the rate of milk flow (1.90; 0.89 and 0.49 kilograms per minute, respectively) and the duration of milking (281; 375 and 294 seconds, respectively). (*Conclusions*) The longest milking duration is detected in the case of subclinical mastitis, (375 seconds on average). There is a shift in the peak of the milk flow rate from the second minute of milking to the third in comparison with healthy animals. In the case of clinical mastitis,

the milking duration (295 seconds) proves to be less than the subclinical one, while there is practically no peak in the rate of milk flow. It is confirmed that there is a necessity to shift the intensive milking mode by 30-45 seconds for an animal with subclinical mastitis, as well as to use a gentle milking mode for cows with clinical mastitis.

**Keywords:** milk production, milk yield, milking of cows, milking duration, mastitis, milk flow rate.

**For citation:** Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Vladimirov F.E., Yurochka S.S. Vliyaniye subklinicheskogo i klinicheskogo mastita na protsess molokoотdachi korov yaroslavskoy porody [Research into the influence of clinical and subclinical mastitis on the milk flow rate of the Yaroslavl breed cows]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 62-66 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-62-66. EDN YEHYGC.

**Р**астущий мировой спрос на молочные продукты вызывает необходимость увеличения среднего надоя молока на одну корову [1-3]. Важно отслеживать не только объемы удоев, скорость молокоотдачи, параметры производимого молока, но и общее состояние животных, обеспечив своевременное и эффективное лечение [4-5].

Мастит – наиболее распространенное заболевание, которое влияет на продуктивность животных и качество молока [6]. Около 60-70% всех противомикробных препаратов, применяемых на молочных фермах, используют для профилактики и лечения мастита [7]. Его раннее обнаружение, проводимое быстрым автоматическим мониторингом, может стать способом повышения эффективности фермы [8]. Мастит наносит наибольший ущерб хозяйству, поскольку молоко становится непригодным к употреблению [9-11]. Это заболевание непосредственно влияет на технические характеристики и гигиеническое качество молока, опосредованно изменяя его внутренние качества, увеличивая количество соматических клеток [12-13].

Клинический мастит характеризуется внезапным началом с покраснением и отеком вымени. Молоко пораженной четверти содержит хлопья или сгустки, может иметь водянистую консистенцию. Субклинический мастит, напротив, характеризуется отсутствием видимых признаков в молоке или вымени [14]. Тем не менее, заболевание приводит к снижению выработки молока (хотя и не так сильно, как в клинических случаях) и увеличению вероятности плоскоклеточного рака [15]. Субклинический мастит встречается в 15-40 раз чаще, чем клиническая форма, и его продолжительность выше [16]. Кроме того, эту форму заболевания труднее обнаружить, а инфицированное животное служит резервуаром возбудителей, распространяющих инфекцию вымени среди животных в стаде.

Следствие заболевания маститом – сокращение удоев и скорости молокоотдачи, при неправильном и несвоевременном лечении сниженный удой остается навсегда. Лечение мастита в основном включает использование антибиотиков, хотя к этим препаратам добавляют глюкокортикоиды, такие как преднизолон [17]. Они помогают повысить целостность гемато-мо-

лочного барьера и восстановить сниженное качество молока, вызванное маститом [18].

**Цель исследования** – изучение влияния заболевания коров маститом на скорость молокоотдачи и определение целесообразности использования щадящего режима доильной установки.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Исследование проводили в октябре 2021 г. в помещении с привязным содержанием 250 коров ярославской породы. Кормление – с кормового стола, смешанным рационом в соответствии с периодом лактации. Температура воды для питья 15°C. Утренняя дойка проводилась с 5:00 до 8:00, вечерняя – с 17:00 до 19:00. Средний разовый удой учитывали по 2 утренним и 2 вечерним дойкам. Заболевшие животные выявлены ветврачом на основании осмотра и теста на мастит.

Сформировали 3 группы животных на 5-6 мес. лактации:

- первая (контроль), здоровые животные – 11 гол., средний разовый удой 8,9 кг;
- вторая, с субклиническим маститом – 8 гол., удой 5,4 кг;
- третья, с клиническим маститом – 7 гол., удой 2,5 кг.

Доение – с применением вакуумной линии, выдающей стабильно 47+1 кПа в качестве уровня номинального вакуумметрического давления, с перепадом не более ±2,5 кПа. Для каждой группы использовали отдельные доильные ведра ДАС-2В. Объем надоев молока учитывали через каждые 15 с.

Скорость молокоотдачи определяли по формуле:

$$\Delta V_m = \frac{Q_{\Delta t}}{t},$$

где  $\Delta V_m$  – скорость молокоотдачи;

$Q_{\Delta t}$  – удой молока в промежуток времени, кг;

$t$  – время доения, с.

Для повышения наглядности графики результатов измерений для всех групп построили в общих координатах (*рисунок*). Вид кривых позволяет визуально оценить как изменение скорости молокоотдачи, так и отличия в длительности доения.

Поскольку исследование направлено на изучение скорости молокоотдачи коров в реальных условиях молочной фермы, животных не заражали маститом, а исследовали только заболевших по естественным причинам.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Результаты контрольной группы приняты за образец нормальных удоев и скорости молокоотдачи (рисунок).

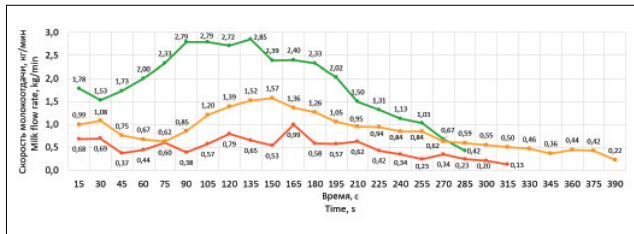


Рис. Средняя скорость молокоотдачи: — первая группа (контроль); — вторая (субклинический мастит); — третья (клинический мастит)

Fig. Average milk flow rate: — the first group (healthy or control group); — the second group (subclinical mastitis); — the third group (clinical mastitis)

Первой отметкой результатов измерения скорости молокоотдачи стала 15-я секунда, затем каждые 15 с до 285-й секунды для большинства. У двух животных из группы доение завершилось за 255 и 270 с. Среднее время доения в первой группе составило 281 с. В среднем 88% разового удоя здоровое животное отдает за первые 4 мин доения. Средний разовый удой — 8,9 кг, скорость молокоотдачи — 1,9 кг/мин (дисперсия 0,30, стандартное отклонение 0,530 кг/мин).

помощью критерия Стьюдента при уровне значимости  $p < 0,05$  при сравнении двух пар выборок (здоровые — субклиника, степени свободы  $df=19$ ; здоровые — клиника, степени свободы  $df=16$ ) и показала для обоих случаев  $t \ll t_{кр}$ , чем подтвердила нулевую гипотезу о достоверности различий между выборками.

Определено значительное влияние мастита на скорость молокоотдачи относительно здоровых животных: для субклинического мастита падение средней скорости молокоотдачи составило 53%, для клинического — 74%, средняя длительность доения увеличивается, соответственно, до 133 и 105% от нормы.

С учетом различий в скорости молокоотдачи лучше доить больных животных по алгоритму, отличному от стандартного при обслуживании здоровых коров. Нет необходимости в применении режима интенсивного доения доильной установки. Для животных из второй группы режим интенсивного доения оправдан, но должен быть короче и смещен относительно контроля на 30-45 секунд, что подтверждено расчетом процентных показателей скорости молокоотдачи первых четырех минут (таблица) и наглядно видно на графическом изображении (рисунок).

У животных первой группы в 1-ю минуту доения после первого 15-секундного этапа скорость молокоотдачи незначительно снижается, затем начинается резкий рост и вход в пик интенсивности. Он длится

| Таблица                                                  | СКОРОСТЬ МОЛОКООТДАЧИ, % ОТ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ / MILK FLOW RATE, % OF THE MAXIMUM VALUE |                          |                          |                          | Table |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| Группы<br>Groups                                         | 1-я минута<br>1st minute                                                                    | 2-я минута<br>2nd minute | 3-я минута<br>3rd minute | 4-я минута<br>4th minute |       |
| 1-я (контроль) / 1st (healthy or control group)          | 66                                                                                          | 100                      | 94                       | 56                       |       |
| 2-я (субклинический мастит) / 2nd (subclinical mastitis) | 61                                                                                          | 71                       | 100                      | 66                       |       |
| 3-я (клинический мастит) / 3rd (clinical mastitis)       | 80                                                                                          | 86                       | 100                      | 71                       |       |

В первую минуту скорость молокоотдачи составляет 1,76 кг/мин, затем растет до пиковой 2-й минуты доения с показателем 2,66 кг/мин, далее снижается до 2,49 кг/мин на 3-й минуте и резко падает на 4-й минуте до 1,49 кг/мин, после чего опускается до 0.

В группе с субклиническим маститом 91% среднего разового удоя животное отдает в первые 5 мин. Средний разовый удой составил 5,4 кг, скорость молокоотдачи — 0,89 кг/мин, минимальные значения внутри группы 80%, максимальные — 136% (дисперсия 0,16, стандартное отклонение 0,373 кг/мин).

В первую минуту скорость молокоотдачи равна 0,87 кг/мин, на 2-й минуте увеличивается до 1,02 кг/мин, на 3-й — достигает пика 1,43 кг/мин и затем снижается до 0,95 кг/мин на 4-й минуте доения.

В группе с клиническим маститом 92% удоев животное отдает за первые 4 мин. Средний разовый удой — 2,5 кг, скорость молокоотдачи — 0,49 кг/мин (дисперсия 0,03, стандартное отклонение 0,18 кг/мин).

Проверка достоверности результатов проведена с

около 2 мин и значительно (на 40-50%) превосходит показатели до и после пика. После 4-й минуты доения скорость молокоотдачи резко, менее чем за минуту, падает до 0.

У второй группы выявлен более короткий пик скорости молокоотдачи — длительностью около 1 мин. Скорость молокоотдачи на пике на 30-40% превышает этот показатель до и после пика. После 4-й минуты она постепенно снижается в течение 2 мин и более.

У третьей группы не выявлено выраженного пика скорости молокоотдачи. Она примерно одинакова в первые 3 мин и затем постепенно снижается в последующие 2 мин.

Установлено, что переход на основной режим доения (частота пульсаций  $60 \text{ мин}^{-1}$ ; соотношение тактов сосание/сжатие 70:30) допустим для животных с субклиническим маститом на меньший период — со 2-й по 4-ю минуты доения. У коров с клинической формой мастита рекомендуется применять ща-

дящий режим доения ( $60 \text{ мин}^{-1}$ ; 50:50).

**Выводы.** Провели подробный анализ процесса доения маститных коров с оценкой скорости молокоотдачи каждые 15 сек. Выявили, что длительность доения коров с субклиническим маститом (в среднем 375 сек) значительно превышает таковую у коров с клиническим маститом (в среднем 294 сек). Определили, что для животных с субклиническим маститом необходимо смещать режим интенсивного доения на 30-45 сек, а также применять его с меньшей длитель-

ностью. Для животных с клиническим маститом интенсивное доение не рекомендуется, поскольку отсутствует фаза интенсивной молокоотдачи и может быть нанесен лишний вред вымени животного.

*Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации на право получения гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук – МК-2513.2022.4.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Ignatenko D.N., Nikitin E.A., Lednev V.N., Lobachevsky Y.P., Gudkov S.V., Zvyagin A.V. Application of Optical Quality Control Technologies in the Dairy Industry: An Overview. *Photonics*. 2021. 8. 551.
2. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Рузин С.С., Тарасова Е.И. Контроль и управление при почетвертном машинном доении коров // *Агроинженерия*. 2020. N4(98). С. 15-20.
3. Visioli F., Strata A. Milk, Dairy Products, and Their Functional Effects in Humans: A Narrative Review of Recent Evidence. *Advances Nutrition*. 2014. 5. 131-143.
4. Aernouts B., Polshin E., Lammertyn J., Saeys W. Visible and near-infrared spectroscopic analysis of raw milk for cow health monitoring: Reflectance or transmittance? *Journal of Dairy Science*. 2011. 94. 5315-5329.
5. Evangelista C., Basiricò L., Bernabucci U. An Overview on the Use of Near Infrared Spectroscopy (NIRS) on Farms for the Management of Dairy Cows. *Agriculture*. 2021. 11. 296.
6. Jamali H., Barkema H.W., Jacques M., Levallée-Bourget E., Malouin F., Saini V., Stryhn H., Dufour S. Invited review: Incidence, risk factors, and effects on clinical mastitis recurrence in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2018. 101. 4729-4746.
7. Stevens M., Piepers S., De Vlieghe S. Mastitis prevention and control practices and mastitis treatment strategies associated with the consumption of (critically important) antimicrobials on dairy herds in Flanders, Belgium. *Journal of Dairy Science*. 2016. 99. 2896-2903.
8. Hovinen M., Siivonen J., Taponen S., Hanninen, L. Detection of Clinical Mastitis with the Help of a Thermal Camera. *Journal of Dairy Science*. 2008. 91. 12. 4592-4598.
9. Bezman D., Lembierskiy-Kuzin L., Katz G., Merin U., Leitner G. Influence of intramammary infection of a single gland in dairy cows on the cow's milk quality. *Journal of Dairy Research*. 2015. 82. 304-311.
10. Sánchez-Macías D., Morales-delaNuez A., Torres A., Hernández-Castellano L.E., Jiménez-Flores R., Castro N., Argüello A., Effects of somatic cells to carpine milk on cheese quality. *International Dairy Journal*. 2013. 29. 61-67.
11. Sánchez-Macías D., Hernández-Castellano L.E., Morales-delaNuez A., Herra-Chávez B., Argüello A., Castro N. Somatic cells: A potential tool to accelerate low-fat goat cheese ripening. *International Dairy Journal*. 2020. 102.
12. Halasa T., Huijps K., Østerås O., Hogeveen H. Economic effects of bovine mastitis management: A review. *Veterinary Quarterly*. 2007. 29. 18-31.
13. Воробьева С.С. Количество соматических клеток в молоке ярославских чистопородных коров в зависимости от удоя молока и скорости молокоотдачи // *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2019. N3(28). С. 78-82.
14. Ruegg P. 100-Year Review: Mastitis detection, management, and prevention. *Journal of Dairy Science*. 2017. 100. 10381-10397.
15. Kul E., Şahin A., Atasever S. The effects of somatic cell count on milk yield and milk composition in Holstein cows. *Veterinarski arhiv*. 2019. 89. 143-154.
16. Seegers H., Fourichon C., Beaudeau F. Review article: Production effects related to mastitis and mastitis economics in dairy cattle herds. *Veterinary Research*. 2003. 34. 475-491.
17. Sipka A.A., Gurjar A., Klaessig S., Duhamel G.E., Skidmore A., Swinkels J., Cox P., Schukken Y. Prednisolone and cefapirin act synergistically in resolving experimental Escherichia coli mastitis. *Journal of Dairy Science*. 2013. 95. 4406-4418.
18. Wall S.K., Hernández-Castellano E., Ahmadpour A., Bruckmaier R.M., Wellnitz O. Differential glucocorticoid-induced closure of the blood-milk barrier during lipopolysaccharide- and lipoteichoic acid-induced mastitis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2016. 99. 7544-7553.

### REFERENCES

1. Burmistrov D.E., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Ignatenko D.N., Nikitin E.A.; Lednev V.N., Lobachevsky Y.P., Gudkov S.V., Zvyagin A.V. Application of Optical Quality Control Technologies in the Dairy Industry: An Overview. *Photonics*. 2021. 8. 551 (In English).
2. Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Ruzin S.S., Tarasova E.I. Kontrol' i upravlenie pri pochetvertnom mashinnom doenii korov [Monitoring and controlling machine cow milking by udder quarters]. *Agroinzheneriya*. 2020. N4(98). 15-20 (In Russian).

3. Visioli F., Strata A. Milk, Dairy Products, and Their Functional Effects in Humans: A Narrative Review of Recent Evidence. *Advances Nutrition*. 2014. 5. 131-143 (In English).
4. Aernouts B., Polshin E., Lammertyn J., Saeys W. Visible and near-infrared spectroscopic analysis of raw milk for cow health monitoring: Reflectance or transmittance? *Journal of Dairy Science*. 2011. 94. 5315-5329 (In English).
5. Evangelista C., Basiricò L., Bernabucci U. An Overview on the Use of Near Infrared Spectroscopy (NIRS) on Farms for the Management of Dairy Cows. *Agriculture*. 2021. 11. 296 (In English).
6. Jamali H., Barkema H.W., Jacques M., Levallée-Bourget E., Malouin F., Saini V., Stryhn H., Dufour S. Invited review: Incidence, risk factors, and effects on clinical mastitis recurrence in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2018. 101. 4729-4746 (In English).
7. Stevens M., Piepers S., De Vliegher S. Mastitis prevention and control practices and mastitis treatment strategies associated with the consumption of (critically important) antimicrobials on dairy herds in Flanders, Belgium. *Journal of Dairy Science*. 2016. 99. 2896-2903 (In English).
8. Hovinen M., Siivonen J., Taponen S., Hanninen, L. Detection of Clinical Mastitis with the Help of a Thermal Camera. *Journal of Dairy Science*. 2008. 91. 12. 4592-4598 (In English).
9. Bezman D., Lembierskiy-Kuzin L., Katz G., Merin U., Leitner G. Influence of intramammary infection of a single gland in dairy cows on the cow's milk quality. *Journal of Dairy Research*. 2015. 82. 304-311 (In English).
10. Sánchez-Macías D., Morales-delaNuez A., Torres A., Hernández-Castellano L.E., Jiménez-Flores R., Castro N., Argüello A., Effects of somatic cells to carpine milk on cheese quality. *International Dairy Journal*. 2013. 29. 61-67 (In English).
11. Sánchez-Macías D., Hernández-Castellano L.E., Morales-delaNuez A., Herra-Chávez B., Argüello A., Castro N. Somatic cells: A potential tool to accelerate low-fat goat cheese ripening. *International Dairy Journal*. 2020. 102 (In English).
12. Halasa T., Huijps K., Østerås O., Hogeveen H. Economic effects of bovine mastitis management: A review. *Veterinary Quarterly*. 2007. 29. 18-31 (In English).
13. Vorob'eva S.S. Kolichestvo somaticheskikh kletok v moloche yarovskikh chistopородnykh korov v zavisimosti ot udoya moloka i skorosti molokootdachi [The number of somatic cells in milk of yarovsk purebred cows depending on milk yield and milk-return rate]. *Agrarnyy vestnik Verkhnevolsk'ya*. 2019. N3(28). 78-82 (In Russian).
14. Ruegg P. 100-Year Review: Mastitis detection, management, and prevention. *Journal of Dairy Science*. 2017. 100. 10381-10397 (In English).
15. Kul E., Şahin A., Atasever S. The effects of somatic cell count on milk yield and milk composition in Holstein cows. *Veterinarski arhiv*. 2019. 89. 143-154 (In English).
16. Seegers H., Fourichon C., Beaudeau F. Review article: Production effects related to mastitis and mastitis economics in dairy cattle herds. *Veterinary Research*. 2003. 34. 475-491 (In English).
17. Sipka A.A., Gurjar A., Klaessig S., Duhamel G.E., Skidmore A., Swinkels J., Cox P., Schukken Y. Prednisolone and cefapirin act synergistically in resolving experimental *Escherichia coli* mastitis. *Journal of Dairy Science*. 2013. 95. 4406-4418 (In English).
18. Wall S.K., Hernández-Castellano E., Ahmadpour A., Bruckmaier R.M., Wellnitz O. Differential glucocorticoid-induced closure of the blood-milk barrier during lipopolysaccharide- and lipoteichoic acid-induced mastitis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2016. 99. 7544-7553 (In English).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Павкин Д.Ю. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;

Хахимов А.Р. – литературный анализ, обработка результатов исследования, формирование текста и общих выводов;

Владимиров Ф.Е. – исследование молокоотдачи маститных коров, доработка текста и общих выводов;

Юрочка С.С. – исследование молокоотдачи маститных коров, доработка текста, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Pavkin D.Yu. – scientific guidance, formulating the research main directions;

Khakimov A.R. – literature review, processing of the research results, formatting general conclusions;

Vladimirov F.E. – investigating the milk flow rate and yield of mastitis cows, finalizing the manuscript and general conclusions;

Yurochka S.S. – investigating the milk flow rate and yield of mastitis cows, finalizing the manuscript, visualization.

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

30.05.2022

02.08.2022

## Портативный микропроцессорный колориметр для определения стабильности развития растений

Сергей Анатольевич Ракутько,  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Елена Николаевна Ракутько,  
научный сотрудник

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

**Реферат.** Показали, что по величине флуктуирующей асимметрии можно судить о стабильности развития растений. Отметили недостатки оценки физиологического состояния растений – как визуальной, так и с помощью созданного ранее измерителя цвета. (*Цель исследования*) Разработать устройство для определения стабильности развития растений по результатам измерения цветовых характеристик их листьев. (*Материалы и методы*) Апробировали прибор на растениях огурца, выращиваемых под различным спектром. Измеряли цвет поверхности на втором и третьем листьях в порядке их появления на растении, слева и справа от центральной жилки: у вершины листа, в месте раздвоения вторых жилок второго порядка, у основания листа. При измерениях подносили прибор к листу. Описали принцип работы микропроцессорного колориметра. (*Результаты и обсуждение*) Выявили, что асимметрия значений цветовых координат симметричных точек поверхности листа огурца носит флуктуирующий характер и может быть использована для оценки стабильности развития растений. Определили, что различия в качестве световой среды влияют на биометрические параметры растений, проявляются в асимметрии цветовых координат симметричных точек поверхности листа, причем большим значениям показателей роста (у растений в лучших условиях световой среды) соответствуют меньшие значения флуктуирующей асимметрии. (*Выводы*) Доказали, что разработанный колориметр компактен и эргономичен, прост в изготовлении, недорогой, удобен в эксплуатации и может быть использован в полевых условиях. Прибор позволяет выявить различия стабильности развития растений, выращиваемых под разными источниками света. В условиях эксперимента определили, что в красном диапазоне величина флуктуирующей асимметрии под светодиодами составила 0,0301 относительной единицы, под натриевыми лампами – 0,0471; в зеленом диапазоне – 0,0228 и 0,0305; в синем – 0,0253 и 0,0416 относительной единицы соответственно.

**Ключевые слова:** растениеводство, колориметр, цвет листа, RGB, пигменты, цветовые координаты, стабильность развития растений, флуктуирующая асимметрия.

■ **Для цитирования:** Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Портативный микропроцессорный колориметр для определения стабильности развития растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 67-73. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-67-73. EDN AMSJMF.

## Portable Microcontroller-Based Colorimeter For Determining Plant Development Stability

Sergey A. Rakutko,  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Elena N. Rakutko,  
researcher

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

**Abstract.** It was shown that the magnitude of fluctuating asymmetry can be used to assess the plant development stability. The shortcomings of the plant physiological state assessment were pointed out, both the visual one and that using the previously created colorimeter. (*Research purpose*) The study aimed to develop a device for determining the plant development stability by measuring the leaf color. (*Materials and methods*) The device was tested on cucumber plants grown under different spectra. The surface color was measured on the second and third leaves in the order of their emergence on the plant, to the left and right of the central vein:

at the top of the leaf, at the bifurcation of the second veins of the second order, at the base of the leaf. During measurements, the device was brought to the leaf. The principle of the microcontroller-based colorimeter operation was described. (*Results and discussion*) The asymmetry of the values of the color coordinates of the symmetrical points on the cucumber leaf surface was found to be fluctuating and can be used to assess the plant development stability. The differences in the light environment quality, affecting the plant biometric parameters, are manifested in the asymmetry of the color coordinates of the symmetrical points on the leaf surface and the higher values of growth parameters (in plants under better light environment conditions) correspond to lower values of fluctuating asymmetry. (*Conclusions*) The developed colorimeter was proved to be compact and ergonomic, easy to manufacture, inexpensive, easy to operate and applicable to the field usage. The device enables to identify differences in the development stability of the plants grown under different light sources. The experimental conditions revealed that the fluctuating asymmetry values were 0.0301 relative units under LEDs and 0.0471 relative units under sodium lamps in the red range. In the green range they were 0.0228 and 0.0305, in the blue one 0.0253 and 0.0416 relative units, respectively.

**Keywords:** crop production, colorimeter, leaf color, RGB, pigments, color coordinates, plant development stability, fluctuating asymmetry

■ **For citation:** Rakutko S.A., Rakutko E.N. Portativnyy mikroprotsessornyy kolorimetr dlya opredeleniya stabil'nosti razvitiya rasteniy [Portable microcontroller-based colorimeter for determining plant development stability]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 0-0 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-0-0. EDN AMSJMF.

На рост и развитие растений влияют многие факторы окружающей среды: интенсивность и спектр излучения, условия питания, температура, влажность и т.д. По стабильности их развития судят о способности точно следовать программе, заложенной в генотипе. Индикатором стабильности развития на макроуровне служит флуктуирующая асимметрия (ФА), заключающаяся в незначительных и случайных отклонениях параметров билатеральных (зеркальных) морфологических структур. Уровень ФА минимален при оптимальных условиях среды и возрастает при любых стрессовых воздействиях [1].

От условий окружающей среды зависят оптические свойства тканей растений, особенно в листьях [2]. Они отражают структуру и расположение клеток, органелл, определяющих важнейшие физиологические процессы дыхания, респирации и фотосинтеза. Их исследование необходимо для понимания процессов, протекающих в растениях в период роста и развития. Оптические свойства листа зависят от содержания в нем пигментов, коррелирующих с другими биометрическими показателями. В зависимости от окружающих условий изменяются геометрические размеры клеток, морфология ассимиляционных тканей, содержание и соотношение основных пигментов фотосинтеза (хлорофиллов и каротиноидов), различным образом организуются фотосинтетические мембраны (хлоропласты теневого и светового типа) [3]. Их изучение в качестве диагностических признаков состояния растения представляет немаловажный интерес [4].

Ранее нами был предложен метод оценки стабильности развития растений с использованием ФА оптической плотности листьев. Выявлены значимые раз-

личия ФА оптической плотности листьев кабачка (*Cucurbita pepo* var. *Giromontina*) в отдельных спектральных диапазонах в зависимости от применяемого при выращивании растений облучения [5]. Оценка состояния растения по оптическим свойствам имела меньшую дисперсию данных и была более надежной по сравнению с другими биометрическими параметрами [6].

Цвет органов растений, особенно листьев и цветков, – наглядный индикатор физиологического состояния [7]. Цвет привлекает насекомых – опылителей и разносчиков семян [8, 9]. По нему судят о недостатке или избытке питательных веществ в почве. Например, хорошо известна избыточная экспрессия каротиноидов и антоцианов в растениях, если в почве повышена концентрация соли [10].

Вариации цвета растений характеризуют генетическую изменчивость внутри популяций и таксонов и между ними, что позволяет использовать этот параметр при проверке эволюционных гипотез в филогенетических рамках [11, 12].

Кроме того, хроматические изменения листьев и цветов свидетельствуют о болезнях растений, в том числе грибковых и бактериальных [13].

Традиционно физиологическое состояние растений оценивали по внешним признакам, визуально. Однако определение цвета и его оттенков человеческим глазом крайне ненадежно и зависит от опыта и способностей наблюдателя. Задачу облегчили оптические приборы и новые технологии [14]. Объективно параметры цвета определяют с помощью колориметров или спектрофотометров [15]. Характеристики цвета задают цветовыми координатами в различных цветовых системах [16].

Разработанный ранее измеритель цвета имел не-

которые недостатки:

- ограниченную функциональность, связанную с невозможностью передачи результатов измерений по беспроводному каналу;
- недостаточное удобство в работе (эргономичность) устройства;
- неудовлетворительную точность измерений в связи с возможностью засветки датчика цвета от внешнего излучения, проникающего сквозь корпус, при проведении измерений в светокультуре под мощными светильниками;
- затрудненность позиционирования датчика цвета в заданную область поверхности.

В наших экспериментах на примере растений томата (*Lycopersicon esculentum* Mill) выявлено влияние условий освещения растений на стабильность их развития, оцениваемую по ФА билатеральных признаков. В качестве последних использовали геометрические размеры и содержание хлорофилла в симметричных участках листовой пластины [17-19].

**Цель исследования** – разработка устройства для определения стабильности развития растений по результатам измерения цветовых характеристик листьев.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования выбрали партенокарпический гибрид огурца (*Cucumis Sativus* L.) F<sub>1</sub> Кураж. Сравнительный эксперимент проводили в ноябре-декабре 2020 г. в двух зонах лабораторного помещения, разделенных светонепроницаемой шторой. С помощью автоматической системы управления поддерживали параметры: температуру воздуха 23-25°C, влажность воздуха 65-72%. Влажность субстрата в горшочках 75-80% обеспечивали дозированным поливом. В качестве субстрата использовали верховой торф, нейтрализованный мелом до pH 6,0 и заправленный удобрениями до уровней элементов питания, мг/л: NO<sub>3</sub> – 240, NH<sub>4</sub> – 12, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 60, K<sub>2</sub>O – 300, Ca – 180, Mg – 80, Mn – 0,50, Mo – 0,05, Cu – 0,05. Сеянцы огурца пикировали в контейнеры объемом 1 л. Расстановку рассады проводили через 14 дней после появления всходов (25 растений на 1 м<sup>2</sup>). Рассаду подкармливали растворами удобрений K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> и Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Концентрацию питательного раствора удобрений поддерживали в пределах ЕС 1,8-2,5 мСм/см.

Фактором, обеспечивающим различие качества световой среды, стал спектр излучения. Использовали облучатели с натриевыми лампами (типа ДНаЗ) и светодиодами (СД). У натриевых ламп большая доля потока находится в желто-зеленой области при наличии существенной доли теплового излучения. У СД-источников излучение сосредоточено в синем и красном диапазонах. Фотонную облученность на уровне верхушек растений поддерживали одинаковой изменением высоты подвеса облучателей.

Значение показателя ФА для билатерального признака

$T_i$  (в качестве которых принимали RGB координаты) вычисляли по формуле:

$$FA_{T_i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|T_{ij}^L - T_{ij}^R|}{(T_{ij}^L + T_{ij}^R)},$$

где  $FA_{T_i}$  – показатель ФА для билатерального признака  $T_i$ ;

$N$  – количество измерений;

$j$  – номер точки измерения;

$T_{ij}^L$  – значение признака  $T_i$  слева билатеральной структуры  $j$ -го растения;

$T_{ij}^R$  – значение признака  $T_i$  справа билатеральной структуры  $j$ -го растения.

Измеряли цвет поверхности на втором и третьем листьях в порядке их появления на растении, слева и справа от центральной жилки: у вершины листа, в месте раздвоения вторых жилок второго порядка, у основания листа.

Использовали по 20 растений, выращиваемых под каждым источником света. Данные обрабатывали методами математической статистики ( $p < 0,05$ ) с использованием пакетов программ Excel 2003 и Statistica 6.0. Статистическая обработка результатов оценки ФА включала проверку данных с учетом факторов:

- нормальность распределения величины разницы между билатеральными признаками;
- присутствие направленной асимметрии и антиасимметрии;
- зависимость величины асимметрии признака от его размера;
- сравнение уровня ФА у растений, выращиваемых при различном спектре облучения.

Конструкция измерителя цвета достаточно проста (рис. 1). Алгоритм управляющей программы позволяет изменять функционал (назначение) кнопок клавиатуры для каждого из режимов работы устройства. Все электронные компоненты смонтированы на стойках на внутренней поверхности корпуса и на разделительной пластине из светонепроницаемого материала, размещенной внутри корпуса, и электрически соединены монтажными проводами в соответствии с логикой их совместной работы. Для доступа к внутренним электронным компонентам корпус и ручка выполнены с возможностью разъема в горизонтальной плоскости.

В автономном режиме работы используется питание от батареи GB (рис. 2). «Плюс» питания подается на вход VIN микропроцессора A1 типа Arduino Nano. Стабилизированное напряжение для питания дисплея A2 и датчика цвета A4 снимается с его выхода 5V, напряжение для питания блютуза A3 – с выхода 3V3. Общим проводом является «минус», он подается на вход Gnd микропроцессора и других электронных компонентов. Линия данных SDA последовательной асимметричной шины I2C подключена к цифровому выходу D4 микропроцессора, линия синхронизации SCL

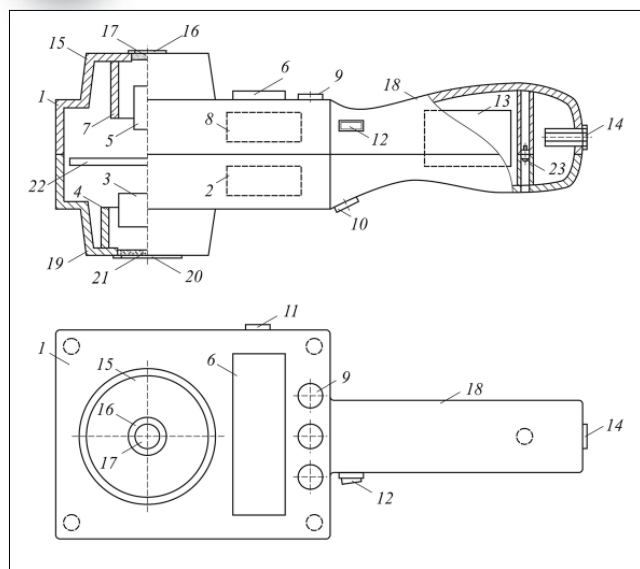


Рис. 1. Устройство колориметра: 1 – корпус; 2 – микропроцессор; 3 – датчик цвета; 4 – экран датчика цвета; 5 – индикатор цвета; 6 – дисплей; 7 – экран индикатора цвета; 8 – блютуз; 9 – клавиатура; 10 – кнопка; 11 – USB-разъем; 12 – выключатель питания; 13 – батарея автономного питания; 14 – разъем внешнего питания; 15 – верхний выступ; 16 – отверстие; 17 – диффузно пропускающий материал; 18 – ручка; 19 – нижний выступ; 20 – нижнее отверстие; 21 – прозрачный материал; 22 – разделительная пластина из светонепроницаемого материала; 23 – болтовые соединения

Fig. 1. The design of the colorimeter: 1 – body; 2 – microprocessor; 3 – colour sensor; 4 – color sensor screen; 5 – color indicator; 6 – display; 7 – color indicator screen; 8 – bluetooth; 9 – keyboard; 10 – button; 11 – USB connector; 12 – power switch; 13 – autonomous battery; 14 – external power connector; 15 – upper ledge; 16 – hole; 17 – diffuse transmissive material; 18 – handle; 19 – lower ledge; 20 – bottom hole; 21 – transparent material; 22 – separating plate made of opaque material; 23 – bolted connections

– к выходу D5. Для отображения текстовой информации использован дисплей типа LCD1602. Символы выводятся в две строки, по 16 символов в строке, их размер – 5×8 пикселей. Встроенная подсветка включается при подаче питания на пины модуля. В качестве датчика цвета использован модуль TCS34725, который содержит светочувствительные элементы для измерения красной, зеленой и синей составляющей потока света, отраженного от поверхности. Источником для освещения поверхности служит светодиод, расположенный на модуле и управляемый с аналогового выхода A0 микропроцессора. Для передачи информации на внешние устройства использован модуль блютуз типа HC 05. Управление им происходит по асинхронному протоколу шины UART, по линиям RXD и TXD микропроцессора (пины D2 и D3). Индикатор цвета A6 выполнен на базе трехцветного светодиода типа MCDL-5013RGB. Цвет его свечения задается путем изменения интенсивности свечения отдельных каналов с помощью регуляторов широт-

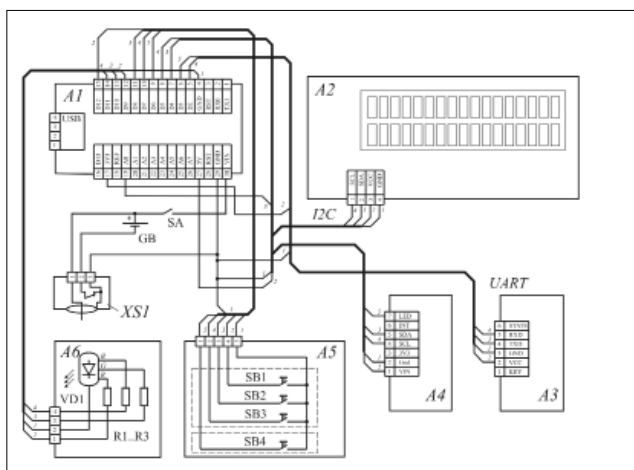


Рис. 2. Схема колориметра: A1 – микропроцессор; A2 – дисплей; A3 – блютуз; A4 – датчик цвета; A5 – клавиатура; A6 – индикатор цвета; XS1 – разъем питания; GB – батарея питания

Fig. 2. The electric diagram of the colourimeter: A1 – microprocessor; A2 – display; A3 – bluetooth; A4 – color sensor; A5 – keyboard; A6 – color indicator; XS1 – power connector; GB – power battery

но-импульсной модуляции от цифровых выходов D10-D12 микропроцессора. Управление устройством осуществляется через клавиатуру A5, подключенную к пирам D6, D7, D8 и D12.

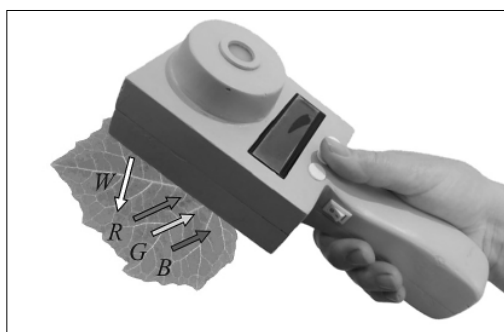


Рис. 3. Работа с устройством  
Fig. 3. Work with the device

При измерениях оператор держит устройство за ручку (рис. 3). Прибор подносят нижним выступом корпуса к поверхности, цвет которой необходимо определить.

В соответствии с алгоритмом работы управляющей программы, загруженной предварительно в микропроцессор через USB-разъем, срабатывает датчик цвета. Информация о цвете поверхности после математической обработки в микропроцессоре отображается на дисплее в численном виде (значения RGB) и передается через блютуз на внешнее устройство. Из полученных RGB-составляющих синтезируется цвет свечения индикатора цвета. Управление режимами работы осуществляется с помощью клавиатуры и кнопки. Экраны индикатора, датчика цвета и разделительная пластина препятствуют попаданию параз-

итной засветки на датчик цвета. При необходимости электрическое питание устройство получает через разъем внешнего питания.

Ориентировочная стоимость основных комплектующих по ценам *AliExpress* (без затрат на изготовление корпуса) составляет €15.

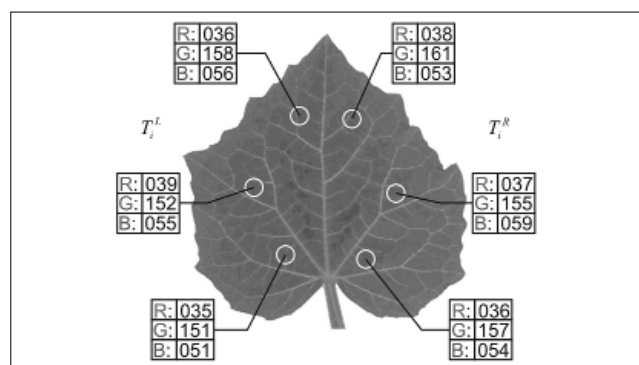


Fig. 4. Пример экспериментальных данных

Fig. 4. An example of experimental data

Экспериментальные данные свидетельствуют об *RGB*-составляющих цвета в областях поверхности листа, расположенных симметрично относительно его центральной жилки (рис. 4).

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Природа источников освещения в светокультуре влияет на развитие и состояние растений (таблица).

При практически одинаковом количестве листьев на стебле растения под натриевыми лампами более вытянуты, имеют меньшую толщину стебля, цвет листьев светло-зеленый. Под СД растения имеют большую сырую массу и содержание сухого вещества, цвет листьев визуально имеет более насыщенный зеленый оттенок, что свидетельствует о большем содержании хлорофилла и лучшем состоянии.

Статистический анализ показал, что значения

*RGB*-координат распределены по нормальному закону. Однако различия между группами статистически не значимы. Следовательно, сами значения *RGB*-координат, полученные с помощью колориметра, не информативны для оценки влияния качества световой среды на растения. Анализ распределения значений асимметрии *RGB*-координат ( $T_{il}^L - T_{il}^R$ ) показал, что они распределены по нормальному закону. Направленность асимметрии, оцененная по критерию Уилкоксона, отсутствует. Антисимметрия (судя по величине эксцесса) у анализируемых признаков не выявлена. Совокупность этих критериев свидетельствует, что асимметрия анализируемых признаков носит флуктуирующий характер. Наличие зависимости между величиной асимметрии признака и его средним размером определяли с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Для обоих типов источников света и всех анализируемых признаков статистически значимая размер-зависимость отсутствует. Различия между ФА, оцененные по *U*-критерию Манна-Уитни, статистически значимы, причем меньшие значения ФА наблюдаются у растений, обладающих лучшими биометрическими параметрами, выращенных в более благоприятных условиях световой среды.

### Выводы

1. Выявили, что асимметрия значений цветовых координат симметричных точек поверхности листа огурца носит флуктуирующий характер и может быть использована для оценки стабильности развития растений.

2. Различия в качестве световой среды, приводящие к расхождению биометрических параметров растений проявляются в асимметрии цветовых координат симметричных точек поверхности листа, причем большим значениям показателей роста (у растений в лучших условиях окружающей среды) соответствуют меньшие значения ФА.

| ХАРАКТЕРИСТИКИ 25-ДНЕВНЫХ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА, ВЫРАЩЕННЫХ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА<br>PARAMETERS OF 25-DAY-OLD CUCUMBER PLANTS GROWN UNDER DIFFERENT LIGHT SOURCES |                                 |                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Параметры<br>Parameter                                                                                                                                                 | Натриевые лампы<br>Sodium lamps | Светодиоды<br>LED |
| Количество листьев, шт. / Number of leaves, pcs                                                                                                                        | 5,9                             | 5,8               |
| Высота растения, мм / Plant height, mm                                                                                                                                 | 283                             | 149               |
| Диаметр стебля, мм / Stem diameter, mm                                                                                                                                 | 6,32                            | 8,51              |
| Сырая масса растения, г / Wet weight of plant, g                                                                                                                       | 23,87                           | 31,14             |
| Сухое вещество, % / Dry matter, %                                                                                                                                      | 5,80                            | 7,82              |
| Красная составляющая цвета, отн. ед. / Red colour component, rel. units                                                                                                | 37,1                            | 45,4              |
| Зеленая составляющая цвета, отн. ед. / Green colour component, rel. units                                                                                              | 153,0                           | 179,7             |
| Синяя составляющая цвета, отн. ед. / Blue colour component, rel. units                                                                                                 | 55,5                            | 68,2              |
| Величина флуктуирующей асимметрии, отн. ед. / Fluctuating asymmetry value, rel. unit:                                                                                  |                                 |                   |
| по красной компоненте / by the red component                                                                                                                           | 0,0471                          | 0,0301            |
| по зеленой компоненте / by the green component                                                                                                                         | 0,0305                          | 0,0228            |
| по синей компоненте / by the blue component                                                                                                                            | 0,0416                          | 0,0253            |

3. Разработанный на основе микроконтроллера *Arduino Nano* и датчика цвета *TCS34725* колориметр имеет компактную и эргономичную конфигурацию, прост в изготовлении, удобен в эксплуатации, доступен по стоимости. Его можно использовать для полевого анализа.

4. С помощью разработанного прибора определи-

ли различия стабильности развития растений огурца, выращиваемых под разными источниками света. В красном диапазоне величина ФА под светодиодами составляет 0,0301 отн. ед., под натриевыми лампами – 0,0471; в зеленом диапазоне – 0,0228 и 0,0305; в синем – 0,0253 и 0,0416 отн. ед. соответственно.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Palmer A.R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of non-normal distributions and power of statistical tests. *Acta Zoologica Fennica*. 1992. 191. 57-72.
- Rahaman M., Chen D., Gillani Z., Klukas C., Chen M. Advanced phenotyping and phenotype data analysis for the study of plant growth and development. *Frontiers in Plant Science*. 2015. 6. 1-15.
- Мерзляк М.Н. Спектры отражения листьев и плодов при нормальном развитии, старении и стрессе. *Физиология растений*. 1997. Т. 44. №5. С. 707-716.
- Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge: Cambridge University Press. 2019.
- Rakutko S., Rakutko E., Avotins A., Apse-Apsitis P. Method and device for measuring stability of plant development by fluctuating asymmetry of optical density of leaves. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 18th International Scientific Conference*. 2019. 1263-1268.
- Rakutko S., Rakutko E., Mishanov A. Measuring device for optical properties of plant leaves. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 20th International Scientific Conference*. 2021. 187-193.
- Chen D., Neumann K., Friedel S., Kilian B., Chen M., Altmann T., Klukas C. Dissecting the phenotypic components of crop plant growth and drought responses based on high-throughput image analysis. *Plant Cell*. 2014. 26. 4636-4655.
- Kevan P.G. Floral colors through the insect eye: What they are and what they mean. In *Handbook of Experimental Pollination Biology*. New York: Van Nostrand Reinhold Company. 1983. 3–30.
- Yamazaki K. Colors of young and old spring leaves as a potential signal for ant-tended hemipterans. *Plant Signaling and Behavior*. 2008. 3. 984-985.
- Borghesi E., González-Miret M.L., Escudero M.L., Malorgio F., Heredia F.J., Meléndez-Martínez A.J. Effects of Salinity Stress on Carotenoids, Anthocyanins, and Color of Diverse Tomato Genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. 59. 11676-11682.
- Valenta K., Kalbitzer U., Razaifandimby D., Omeja P., Ayasse M., Chapman C.A., Nevo O. The evolution of fruit colour: Phylogeny, abiotic factors and the role of mutualists. *Scientific reports*. 2018. 8. 14302.
- Ougham H., Thomas H., Archetti M. The adaptive value of leaf colour. *New Phytologist*. 2008. 179. 9-13.
- Matsunaga T.M., Ogawa D., Taguchi-Shiobara F., Ishimoto M., Matsunaga S., Habu Y. Direct quantitative evaluation of disease symptoms on living plant leaves growing under natural light. *Breeding Science*. 2017. 67. 316-319.
- Batinić B., Bajić J., Dedijer S., et al. Colorimetric fiber-optic sensor based on reflectance spectrum estimation for determining color of printed samples. *Opt Quant Electron*. 2020. 52. 342.
- Pathare P.B., Opara U.L., Al-Said F.A. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. 6. 36-60.
- Sanmartín P., Gambino M., Fuentes E., Serrano M. A Simple, Reliable, and Inexpensive Solution for Contact Color Measurement in Small Plant Samples. *Sensors*. 2020. 20(8). 2348.
- Rakutko S.A., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 17th International Scientific Conference*. 2018. 186-191.
- Ivanyuk V.V., Shkirin A.V., Belosludtsev K.N., et al. Influence of fluoropolymer film modified with nanoscale photoluminophor on growth and development of plants. *Frontiers in Physics*. 2020. 8. 1-6.
- Simakin A.V., Ivanyuk V.V., Gudkov S.V., Dorokhov A.S. Photoconversion fluoropolymer films for the cultivation of agricultural plants under conditions of insufficient insolation. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. 10. N22. 1-10.

### REFERENCES

- Palmer A.R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of non-normal distributions and power of statistical tests. *Acta Zoologica Fennica*. 1992. 191. 57-72 (In English).
- Rahaman M., Chen D., Gillani Z., Klukas C., Chen M. Advanced phenotyping and phenotype data analysis for the study of plant growth and development. *Frontiers in Plant Science*. 2015. 6. 1-15 (In English).
- Merzlyak M.N. Spektry otrazheniya list'ev i plodov pri normal'nom razvitií, starenii i stresse [Reflection spectra of

- leaves and fruits during normal development, aging and stress.]. *Fiziologiya rasteniy*. 1997. Vol. 44. N5. 707-716 (In Russian).
4. Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge: Cambridge University Press. 2019 (In English).
  5. Rakutko S., Rakutko E., Avotins A., Apse-Apsitis P. Method and device for measuring stability of plant development by fluctuating asymmetry of optical density of leaves. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 18th International Scientific Conference*. 2019. 1263-1268 (In English).
  6. Rakutko S., Rakutko E., Mishanov A. Measuring device for optical properties of plant leaves. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 20th International Scientific Conference*. 2021. 187-193 (In English).
  7. Chen D., Neumann K., Friedel S., Kilian B., Chen M., Altmann T., Klukas C. Dissecting the phenotypic components of crop plant growth and drought responses based on high-throughput image analysis. *Plant Cell*. 2014. 26. 4636-4655 (In English).
  8. Kevan P.G. Floral colors through the insect eye: What they are and what they mean. In *Handbook of Experimental Pollination Biology*. New York: Van Nostrand Reinhold Company. 1983. 3-30 (In English).
  9. Yamazaki K. Colors of young and old spring leaves as a potential signal for ant-tended hemipterans. *Plant Signaling and Behavior*. 2008. 3. 984-985 (In English).
  10. Borghesi E., González-Miret M.L., Escudero M.L., Malorgio F., Heredia F.J., Meléndez-Martínez A.J. Effects of Salinity Stress on Carotenoids, Anthocyanins, and Color of Diverse Tomato Genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. 59. 11676-11682 (In English).
  11. Valenta K., Kalbitzer U., Razafimandimby D., Omeja P., Ayasse M., Chapman C.A., Nevo O. The evolution of fruit colour: Phylogeny, abiotic factors and the role of mutualists. *Scientific reports*. 2018. 8. 14302 (In English).
  12. Ougham H., Thomas H., Archetti M. The adaptive value of leaf colour. *New Phytologist*. 2008. 179. 9-13 (In English).
  13. Matsunaga T.M., Ogawa D., Taguchi-Shiobara F., Ishimoto M., Matsunaga S., Habu Y. Direct quantitative evaluation of disease symptoms on living plant leaves growing under natural light. *Breeding Science*. 2017. 67. 316-319 (In English).
  14. Batinić B., Bajić J., Dedijer S., et al. Colorimetric fiber-optic sensor based on reflectance spectrum estimation for determining color of printed samples. *Opt Quant Electron*. 2020. 52. 342 (In English).
  15. Pathare P.B., Opara U.L., Al-Said F.A. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. 6. 36-60 (In English).
  16. Sanmartín P., Gambino M., Fuentes E., Serrano M. A Simple, Reliable, and Inexpensive Solution for Contact Color Measurement in Small Plant Samples. *Sensors*. 2020. 20(8). 2348 (In English).
  17. Rakutko S.A., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. Engineering for Rural Development. *Proceedings of 17th International Scientific Conference*. 2018. 186-191 (In English).
  18. Ivanyuk V.V., Shkirin A.V., Belosludtsev K.N., et al. Influence of fluoropolymer film modified with nanoscale photoluminophor on growth and development of plants. *Frontiers in Physics*. 2020. 8. 1-6 (In English).
  19. Simakin A.V., Ivanyuk V.V., Gudkov S.V., Dorokhov A.S. Photoconversion fluoropolymer films for the cultivation of agricultural plants under conditions of insufficient insolation. *Applied Sciences* (Switzerland). 2020. 10. N22. 1-10 (In English).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Ракутько С.А. – научное руководство, статистический анализ, черновое написание статьи;

Ракутько Е.Н. – анализ научных источников, обработка результатов измерений, окончательный текст статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Rakutko S.A. – research supervision, statistical analysis, article drafting;

Rakutko E.N. – literature review, measurement results processing, finalizing the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

04.04.2022

12.05.2022

## Разработка алгоритма роботизированного устройства точного внесения средств защиты растений

**Максим Арифович Мирзаев,**  
аспирант, младший научный сотрудник,  
e-mail: mirza.pochta@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что широкий спектр методик и инструментов для идентификации растений ограничен в реальных агротехнических задачах. Отметим, что параметры изображений сильно отличаются в прикладных решениях. (*Цель исследования*) Разработать алгоритм распознавания культурных растений роботизированным устройством, основанный на современном методе глубокого обучения с использованием сверточной нейронной сети *R-CNN*. (*Материалы и методы*) Создали роботизированное устройство для дифференцированного внесения средств защиты растений, которое способно распознавать полезную культуру и сорную растительность, определять площадь обработки по координатам центра и радиусу. Для обнаружения сельскохозяйственной культуры (белокочанной капусты) выбрали сегментирующие нейронные сети *Mask R-CNN* и *Deeplabv3 plus*. Алгоритм на основе данных сетей обнаруживает, сегментирует и позиционирует растения на основе набора данных, собранных в форматах «изображение – маска» и *COCO dataset*. Набор данных формировали путем аэросъемки с помощью беспилотного воздушного судна. Исходные изображения получили от веб-камеры *Xiaovv HD Web USB* с углом съемки 150 градусов, разрешением *Full HD 1080P* и веб-камеры *Logitech C270* с разрешением *HD 720p*. Обученную нейронную сеть для роботизированного устройства установили на платформу *Nvidia Jetson AGX Xavier*. (*Результаты и обсуждение*) В результате оценки точности модели на тестовых данных получили следующие значения: количество найденных растений – 98 процентов, точность выделения контура – 94 процента. (*Выводы*) Доказали, что обученную нейронную сеть можно применять к любым выращиваемым культурам, учитывая неоднородность их расположения на поле, типы почвы, количество сорной растительности. По итогу модель обучили извлекать координаты ограничительной рамки и местоположение объекта (капусты) по пикселям с требуемой точностью как для синтетических, так и для реальных данных.

**Ключевые слова:** дифференцированное внесение средств защиты растений, обучение нейронной сети, *Mask R-CNN*, *Deeplabv3 plus*, точное земледелие, распознавание растений.

■ **Для цитирования:** Мирзаев М.А. Разработка алгоритма роботизированного устройства точного внесения средств защиты растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 74-80. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-74-80. EDN JLDWMP.

## Developing an Algorithm for Robotic Precision Application of Crop Protection Products

**Maksim A. Mirzaev,**  
Ph.D. student, junior researcher,  
e-mail: mirza.pochta@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The existing range of plant identification methods and tools is considered limited in real agrotechnical tasks. The image parameters tend to differ significantly in applied solutions. (*Research purpose*) To develop an algorithm for crop plant recognition by a robotic device using a state-of-the-art convolutional neural network (R-CNN) and deep learning technology. (*Materials and methods*) A robotic device has been developed for variable rate application of plant protection products able to recognize both useful crops and weeds, determine the area of processing, namely the coordinates of the processing center and the processing radius. Mask R-CNN and Deeplabv3 plus segmenting neural networks were chosen for crop (white head cabbage) detection. The network-based algorithm detects, segments, and positions plants based on a dataset collected in the image-mask and COCO dataset formats. The data set was formed by aerial photography using an unmanned aircraft. The original images are taken by

Xiaovv HD Web USB 150 degree Full HD 1080P webcam and Logitech C270 HD 720p webcam. The trained neural network for the robotic device was installed on the Nvidia Jetson AGX Xavier platform. (*Results and discussion*) As a result of assessing the accuracy of the model on the test data, the following values were obtained: the number of plants detected is 98 percent, the accuracy of contour detection is 94 percent. (*Conclusions*) It is proved that the trained neural network can be applied to any cultivated crops, taking into account the heterogeneity of their location in the field, soil types, and the percentage of weeds. As a result, the model is trained to extract the bounding box coordinates and the object (cabbage) location by pixels with the required accuracy for both synthetic and real data.

**Keywords:** variable rate application of plant protection products, neural network training, Mask R-CNN, Deeplabv3 plus, precision farming, plant recognition.

**■ For citation:** Mirzaev M.A. Razrabotka algoritma robotizirovannogo ustroystva tochnogo vneseniya sredstv zashchity rasteniy [Developing an algorithm for robotic precision application of crop protection products]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 74-80 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-74-80. EDN JLDWMP.

**Ш**ирокий спектр методик и инструментов для идентификации растений ограничен в реальных агротехнических задачах. В абсолютном большинстве представленных решений важную роль играют параметры изображений, а они сильно отличаются в прикладных решениях. Зачастую в роботизированном устройстве расположение камер, освещение, параметры камеры и входные данные на алгоритм разнятся с существующими наборами данных для подобных задач. Поэтому актуальны сбор данных напрямую с роботизированного устройства и обучение алгоритма, специализированного под конкретную задачу. Разработанный алгоритм позволяет распознавать изображения культур и рассчитывать дозу внесения агрохимических средств, а также регулировать их расход в зависимости от площади опрыскивания.

Уже есть наработки по данному алгоритму на основе метода обработки контура. Однако качество этого алгоритма не превышает 90%, что неприемлемо для реальных задач, поскольку в работе задействованы нейронные сети.

**Цель исследования** – разработать алгоритм распознавания культурных растений роботизированным устройством, основанный на современном методе глубокого обучения с использованием сверточной нейронной сети *R-CNN*.

**Материалы и методы.** Роботизированное устройство для дифференцированного внесения средств защиты растений обеспечивает распознавание полезной культуры и сорной растительности, определяет площадь обработки по координатам центра и радиусу (рис. 1).

Основная задача роботизированного устройства при дифференцированном внесении – правильно определить площадь обработки.

Разработанный алгоритм позволяет распознавать изображения культур, рассчитывать дозу внесения агрохимических средств, регулировать их расход в зависимости от площади опрыскивания (рис. 2) [1].



Рис. 1. Автономный полевой робот для дифференцированного внесения агрохимических средств в полевых условиях

Fig. 1. Autonomous field robot for variable rate application of agrochemicals in the field

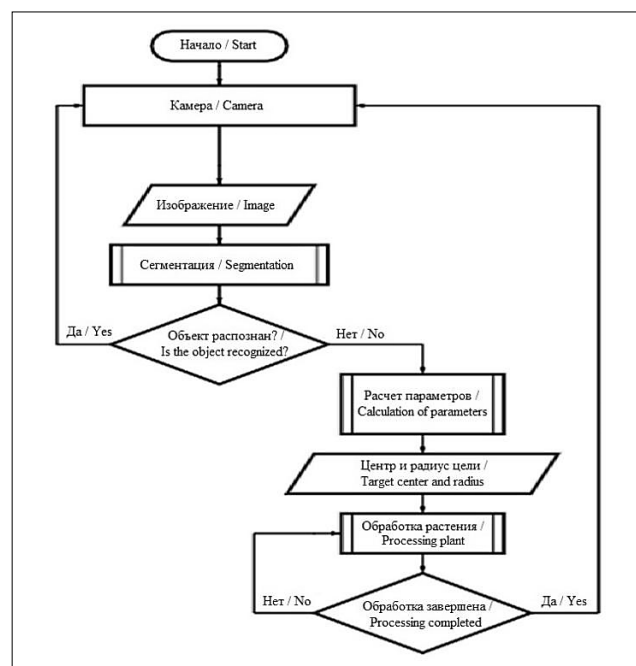


Рис. 2. Принцип работы алгоритма

Fig. 2. Algorithm operating principle

Для сегментации исходных изображений с камер Xiaovv HD Web USB с углом съемки 150° и разреше-

нием *Full HD 1080P* и веб-камеры *Logitech C270* с разрешением *HD 720p* за основу выбрали сегментирующие нейронные сети *Mask R-CNN* и *Deeplabv3 plus*.

*Mask R-CNN* представляет собой сверточную нейронную сеть (*CNN*) для сегментации изображений. Модель обнаруживает объекты на изображении и генерирует высококачественную маску сегментации для каждого экземпляра [2].

*DeepLab* – библиотека компьютерного зрения на *TensorFlow2*. Она предоставляет унифицированную и современную кодовую базу *TensorFlow* для задач плотной маркировки пикселей, включая, помимо прочего, семантическую сегментацию, сегментацию экземпляров, паноптическую сегментацию видео с учетом оценочного значения глубины каждого пикселя изображения [3].

Глубокая разметка относится к решению проблем компьютерного зрения путем присвоения прогнозируемого значения для каждого пикселя изображения с помощью глубокой нейронной сети. Модель *Panoptic-DeepLab* в составе библиотеки достигла 68,0% *PQ*, или 83,5% *mIoU* при проверке на датасете *Cityscapes* [4].

Поскольку роботизированное устройство движется с постоянной скоростью и необходимо обеспечить захват всей рабочей области, применили метод сшивания фото и видео в режиме реального времени.

Сшивание изображений и видео – процесс объединения нескольких фотографий/видео с перекрывающимися полями обзора для создания сегментированной панорамы или изображения/видео с высоким разрешением. Обычно его выполняют с использованием компьютерного программного обеспечения, позволяющего точно перекрыть изображения/видео для получения бесшовных результатов.

Для обучения нейронной сети использовали наборы данных в двух форматах – «изображение – маска» и *COCO dataset*. Подход основан на методике *Coco image (dataset)* [5]. Задача по распознаванию полезной культуры и сорной растительности упрощена: для полезной культуры собран датасет, а нежелательной растительностью определена любая другая культура, не распознанная как полезная. Тем самым исключена необходимость в подготовке дополнительных датасетов на многообразие сорной растительности, при сохранении высокого качества обработки.

Обученную нейронную сеть для роботизированного устройства установили на платформу искусственного интеллекта для автономных машин *Nvidia Jetson AGX Xavier*. Она ориентирована для проектов в сфере машинного зрения, робототехники, автопилотов для транспорта, где требуются высокочастотные вычисления поточного видео и графики [6].

Модули *Nvidia Jetson* – это компактные платы, содержащие на борту все компоненты полноценного компьютера: процессор, видеоадаптер, оперативную память, *USB*-контроллеры и т.д. Они предназначены для

встраивания в другие платы (*carrier board*), разработанные под конкретные задачи [7].

Обучение нейронной сети и тестирование обученной модели проходят в несколько этапов.

Сбор данных для нейронной сети по идентификации растений. На территории Агрофирмы «Поиск» (Московская область) в качестве тренировочных данных собраны более 3000 изображений капусты и около 1000 изображений других культур (рис. 3). Такой набор данных нужен для достижения требуемой точности распознавания искомых параметров растений. Сбор данных для капусты осуществляли непосредственно с роботизированного устройства, а также с помощью беспилотного летательного судна, с последующей нормализацией изображений под требования записывающего оборудования на роботизированном устройстве. В итоге удалось вдвое увеличить набор данных, при этом уменьшить зависимость от условий освещения и камеры и сохранить базовые параметры, такие как ракурс и культура.



Рис. 3. Изображения капусты для обучения алгоритма  
Fig. 3. Cabbage patch images for training the algorithm

Разработка программного инструмента для подготовки данных. Программное обеспечение для автоматизации процесса подготовки данных позволяет упростить работу по выделению целевого сегмента исходного изображения. Программа написана на языке программирования *Python*, среда разработки – *Google Collaboratory* [8].

Программное обеспечение для разметки данных автоматизирует процессы:

- обработку собранных тренировочных данных для сегментационной нейронной сети;
- формирование обучающей маски изображения по очищенному от фона изображению;
- создание топологии директорий и обучающих файлов для тренировки сегментационной нейронной сети.

Разметка данных для обучения сегментационной нейронной сети глубокого обучения. Вручную, с использованием алгоритма выделения контура, подготовили тестовый набор данных. Это помогло упростить работу ручной обработки и повысить качество автоматического выделения контура (без ручной обработки этот метод не позволяет получить результат требуемого качества).

При обработке растений методом дифференцированного внесения агрохимических средств необходимо обеспечить распознавание полезной культуры и сорной растительности, определить площадь обработки, а именно координаты центра, радиуса и контура в системе отсчета роботизированного устройства. Эти параметры рассчитываются индивидуально для каждого растения.

Обозначенный контур дает возможность отделить интересующее растение от фона и других объектов, а также определить его положение и границы (рис. 4) [9]. При этом ни один из элементов не выходит за рамки обозначенного контура.

Контур растения помогает сократить площадь обработки и расход агрохимических средств вследствие их точечного внесения, а также повысить экономическую эффективность опрыскивания. Кроме того, внедрение такой технологии снижает уровень загрязнения сельскохозяйственных угодий и, соответственно, улучшает качество продукции.



Рис. 4. Определение целевой области растения

Fig. 4. Determining the plant target area

Поскольку растения различаются по форме, опрыскиваемый объем агрохимических средств при дифференцированном методе определяли как цилиндр с радиусом минимальной возможной окружности, включающей растение полностью, а высота цилиндра соответствует расположению крайней точки капусты (рис. 5) [10].

Работа системы дифференцированного внесения средств защиты растения основывается на радиусе и центре окружности. Радиус окружности выделенного контура рассчитывается для каждого растения индивидуально исходя из совокупности параметров системы «растение – устройство» [11]:

$$r = \left(h + \frac{h_0}{2}\right) \tan\left(\gamma - \frac{\beta}{2}\right) + r_0, \quad (1)$$

где  $r_0$  – радиус растения, м;

$h$  – высота форсунки относительно центральной

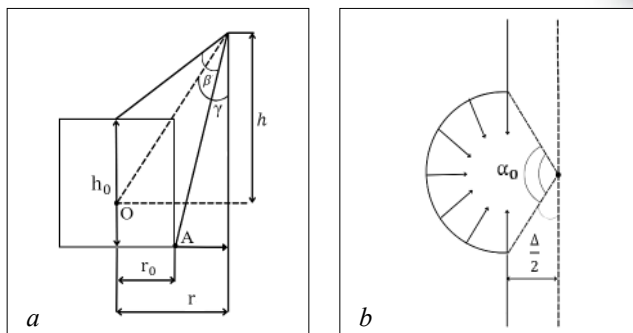


Рис. 5. Принцип работы системы внесения средств защиты растения: а – определение опрыскиваемого объема для обрабатываемой полевой культуры; б – взаимосвязь направления и траектории движения форсунки; О – центральная точка опрыскивания; А – крайняя точка границ обработки растения;  $\beta$  – угол распыла форсунки;  $\gamma$  – угол наклона форсунки;  $h$  – высота форсунки относительно центральной точки опрыскивания О;  $h_0$  – высота растения,  $r_0$  – радиус растения;  $r$  – радиус окружности

Fig. 5. The operation principle of the system for applying plant protection products: a – determining the volume to spray for the crop being treated; b – the relationship of the direction and trajectory of the nozzle movement; O – the central spraying spot; A – the extreme point of the plant treatment boundaries;  $\beta$  – the nozzle spray angle;  $\gamma$  – the nozzle tilt angle;  $h$  – the nozzle height against the central spraying spot O;  $h_0$  – the height of the plant,  $r_0$  – the radius of the plant;  $r$  – the radius of the circle

точки опрыскивания О, м;

$h_0$  – высота растения, м;

$\gamma$  – угол наклона форсунки, рад;

$\beta$  – угол распыла, рад.

Учитывая, что в начальный момент времени выполнения опрыскивания рабочий орган был уже отклонен, уравнение для угла поворота форсунки принимает вид:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{t_0} t + \frac{\pi - \alpha_0}{2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол поворота форсунки, рад;

$\alpha_0$  – угол дуги опрыскивания одного растения одной форсункой, рад;

$t_0$  – время опрыскивания одного растения, с.

В уравнениях для координат принимаем во внимание значение угла поворота форсунки и его зависимость от траектории движения [12]:

$$x = r \sin\left(\frac{\alpha_0}{t_0} t + \frac{\pi - \alpha}{2}\right), \quad (3)$$

$$y = r \cos\left(\frac{\alpha_0}{t_0} t + \frac{\pi - \alpha}{2}\right) - vt, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость движения роботизированного устройства, км/ч.

Для нахождения объекта и сегментации внутри найденных ограничивающих рамок был задан один класс – капуста. Однако обученную нейронную сеть можно применить к любой сельскохозяйственной культуре. Для этого достаточно одного пролета над

целевым полем с помощью беспилотного летательного судна для сбора данных.

Капуста выделялась масками попиксильно и автоматически обводился контур найденных масок для каждого растения. Это позволило получить точные маски белокачанной капусты (рис. 6).

В дальнейшем на основе собранных растений капусты без фона создавали синтетический датасет.

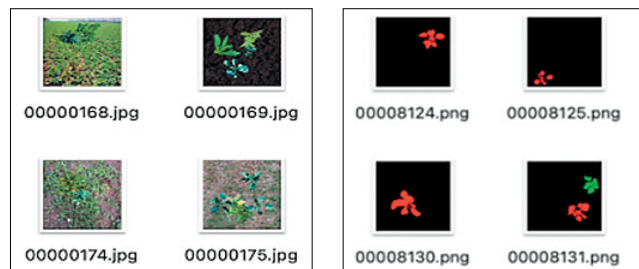


Рис. 6. Выделение границ белокачанной капусты  
Fig. 6. Highlighting the boundaries of white cabbage

**Обучение нейронной сети.** Система компьютерного зрения устройства необходима, чтобы обеспечивать функциональные возможности и отвечать определенным техническим характеристикам. Алгоритм должен преобразовать полученные с камеры данные в режиме реального времени, сегментировать входное изображение и выдать результат в точной маске для последующей обработки, а также классифицировать тип объекта с точностью не менее 95% [13].

Скорость распознавания образов – не больше 0,2 с на одно изображение [14]. Такой темп обработки обусловлен максимальной скоростью роботизированного устройства, достаточной для того, чтобы получить точное местоположение целевой области в любой момент времени.

Ввиду относительной простоты задачи, так как на данном этапе нейронная сеть обучается распознавать одну культуру (для других видов полезных культур предполагается использования данной методики, но уже с соответствующими новыми данными), и требований к быстродействию системы использованы архитектуры *Deeplabv3 plus* и *Mask-CNN*, оптимальные по скорости и точности. Нейросеть доработана под задачу классификации полезной культуры и сорной растительности и обучена на подготовленных ранее данных [15].

При обучении применяли практику случайного разделения датасета на 3 части – обучающую, валидационную и тестовую. Модель оценивается по качеству на валидационной выборке, а по завершении проходит финальное испытание на тестовых данных, которые были от нее закрыты в процессе обучения [16].

Количество данных для обучения составило:

16000 элементов – обучающий набор (искусственный);

4000 элементов – валидационный набор, используемый для оценки качества во время обучения (искусственный);

500 элементов – тестовые: 250 – одно растение в кадре, 250 – несколько растений в кадре (реальный набор) (рис. 7).



Рис. 7. Моделирование данных для обучения модели с целью применения в разных условиях: а – фон с малым числом сорной растительности; б – фон со средним числом сорной растительности; с – фон с большим количеством сорной растительности

Fig. 7. Data modelling to train the model for application in different conditions: a – a background sample with a small number of weeds; b – a background sample with an average number of weeds; c – a background sample with a large amount of weeds

Тестовые данные с разным количеством сорной растительности на фоне и различным типом почвы используются для проверки работы алгоритма при любых условиях. Для каждого уникального случая применения роботизированного устройства обязательно обучение алгоритма в привязке к обрабатываемой культуре. Обучение алгоритма при возможности следует проводить на фоне, близком к реальному, но при отсутствии такой возможности – на различных фонах.

Полученные данные подтверждают использование разработанного алгоритма на многих сельскохозяйственных культурах, выращиваемых на неоднородных почвенно-растительных покровах.

Обучение проводили на 5 эпохах (наилучшие результаты). Размер тренировочного пакета данных – 32 изображения.

**Результаты и обсуждение.** Как показало тестирование модели для определения точности распознавания растений среди сорной растительности, модель

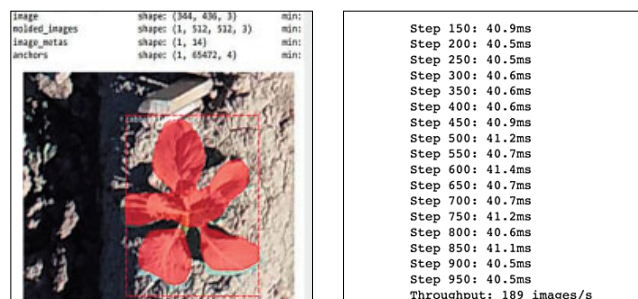


Рис. 8. Результат работы алгоритма на реальных данных: а – реальные данные; б – скорость выполнения алгоритма

Fig. 8. The algorithm output based on the actual data: a – actual data; b – algorithm execution speed

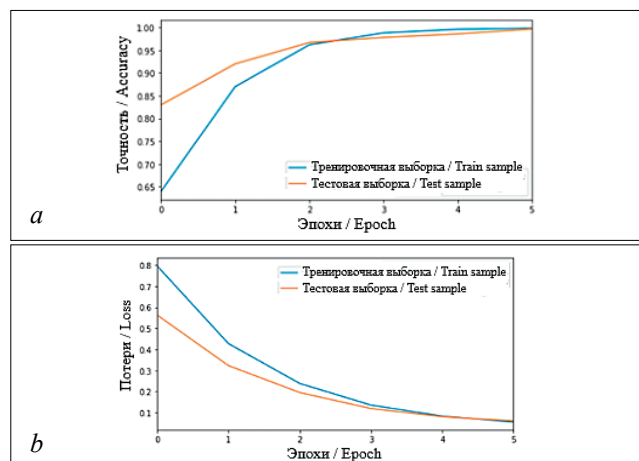


Рис. 9. Динамика точности (а) и потерь (б) на тренировочных и тестовых данных в процессе обучения

Fig. 9. Dynamics of accuracy (a) and loss (b) on training and test data during training

обучилась извлекать координаты ограничительной рамки и местоположение объекта (капусты) по пикселям с требуемой точностью – как для синтетических, так и для реальных данных.

Далее измеряли скорость распознавания, где наилучшим образом показала себя модель на основе *Deeplabv3 plus* (160 мс на изображение против 720 мс для *Mask R-CNN*). Выбранную модель подготовили к инференсу и получили результаты скорости распознавания на сервере *GoogleCollaboratory* с GPU (рис. 8).

Графики точности и потерь при обучении выбранной архитектуры на тренировочных и тестовых дан-

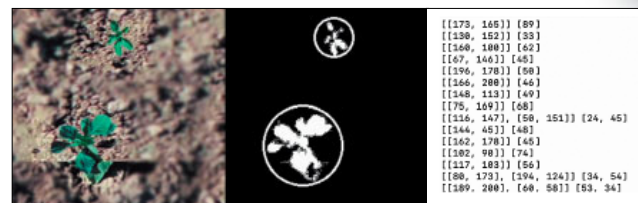


Рис. 10. Координаты центра окружности и радиуса, необходимые для обработки растения

Fig. 10. The circle center and radius coordinates required for processing the plant

ных наглядно показывают, что оптимальное количество эпох для обучения набора данных – 5, далее процесс обучения выходит на плато без улучшений алгоритма, что указывает на его переобучение (рис. 9).

Количество распознанных растений составило 98%, точность выделения контура – 94%, а 6% части растения не выделяется правильно на указанных данных. Однако это не влияет существенно на результат обучения, поскольку распознанная часть растения использовалась для описания окружности, соответствующей площади обработки культуры (рис. 10).

**Выводы.** В результате оценки модели на тестовых данных получили следующие значения: количество найденных растений – 98%, точность выделения контура – 94%.

Обученная нейронная сеть может быть применима к любым выращиваемым культурам, с учетом неоднородности их расположения на поле, независимо от типов почвы и количества сорной растительности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мирзаев М.А. Проектирование автономного полевого робота для дифференцированного внесения агрохимических средств // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N4(45). С. 131-136.
2. Zhao K., et al. Building extraction from satellite images using mask R-CNN with building boundary regularization. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops*. 2018. 247-251.
3. Weber M., et al. Deeplab2: A tensorflow library for deep labeling. arXiv preprint arXiv:2106. 09748v1. 2021.
4. Wang H., et al. Max-deeplab: End-to-end panoptic segmentation with mask transformers. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2021. 5463-5474.
5. Caesar H., Uijlings J., Ferrari V. Coco-stuff: Thing and stuff classes in context. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018. 1209-1218.
6. Jeon J., et al. Run your visual-inertial odometry on NVIDIA Jetson: Benchmark tests on a micro aerial vehicle. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6. N3. 5332-5339.
7. Hossain S., Lee D. Deep learning-based real-time multiple-object detection and tracking from aerial imagery via a flying robot with GPU-based embedded devices. *Sensors*. 2019. Vol. 19. N15. 3371.
8. Carneiro T., et al. Performance analysis of google collaboratory as a tool for accelerating deep learning applications. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. 61677-61685.
9. Meyer G.E., Neto J.C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and electronics in agriculture*. 2008. Vol. 63. N2. 282-293.
10. Демин Е.Е. и др. Аналитические исследования технических параметров самоходных опрыскивателей // *Аграрный научный журнал*. 2021. N12. С. 112-114.
11. Балабанов В.И. и др. Технологии, машины и оборудование для координатного (точного) земледелия. М.: Росинформагротех. 2016. 240 с.
12. Лысов А.К., Воробьев Н.И. Вычисление с помощью математической модели траекторий движения распыляемых аэрозольных капель // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. N2(107). С. 96-106.
13. Бредихин А.И. Алгоритмы обучения сверточных нейронных сетей // *Вестник Югорского государственного университета*. 2019. N1(52). С. 41-54.
14. Henaff O. Data-efficient image recognition with contrastive

predictive coding. *International Conference on Machine Learning*. PMLR. 2020. 4182-4192.

15. Bardou D., Zhang K., Ahmad S. M. Classification of breast cancer based on histology images using convolutional neural networks. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. 24680-24693.

16. Polyzotis N., Zinkevich M., Roy S., Breck E., Whang S. Data Validation for Machine Learning. *Proceedings of Machine Learning and Systems*. 2019.

## REFERENCES

1. Mirzaev M.A. Proektirovanie avtonomnogo polevogo robota dlya differentsirovannogo vneseniya agrokhimicheskikh sredstv [Design of an autonomous field robot for differentiated application of agrochemical agents]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021. Vol. 68. N4(45). 131-136 (In Russian).
2. Zhao K., et al. Building extraction from satellite images using mask R-CNN with building boundary regularization. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops*. 2018. 247-251 (In English).
3. Weber M., et al. Deeplab2: A tensorflow library for deep labeling. arXiv preprint arXiv:2106.09748v1. 2021 (In English).
4. Wang H., et al. Max-deeplab: End-to-end panoptic segmentation with mask transformers. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2021. 5463-5474 (In English).
5. Caesar H., Uijlings J., Ferrari V. Coco-stuff: Thing and stuff classes in context. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018. 1209-1218 (In English).
6. Jeon J., et al. Run your visual-inertial odometry on NVIDIA Jetson: Benchmark tests on a micro aerial vehicle. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6. N3. 5332-5339 (In English).
7. Hossain S., Lee D. Deep learning-based real-time multiple-object detection and tracking from aerial imagery via a flying robot with GPU-based embedded devices. *Sensors*. 2019. Vol. 19. N15. 3371 (In English).
8. Carneiro T. et al. Performance analysis of google colab as a tool for accelerating deep learning applications. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. 61677-61685 (In English).
9. Meyer G.E., Neto J.C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and electronics in agriculture*. 2008. Vol. 63. N2. 282-293 (In English).
10. Demin E.E., et al. Analiticheskie issledovaniya tekhnicheskikh parametrov samodvizhushchikhsya opryskivately [Analytical studies of technical parameters of self-propelled sprayers]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2021. N12. 112-114 (In Russian).
11. Balabanov V.I., et al. Tekhnologii, mashiny i oborudovanie dlya koordinatnogo (tochnogo) zemledeliya [Technologies, machines and equipment for coordinate (precision) farming]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2016. 240 (In Russian).
12. Lysov A.K., Vorob'ev N.I. Vychislenie s pomoshchyu matematicheskoy modeli traektorii dvizheniya raspylyaemykh aerosol'nykh kapel' [Calculation of droplets trajectories of a sprayed aerosol with the use of mathematical model]. *Agro-EkoInzheneriya*. 2021. N2(107). 96-106 (In Russian).
13. Bredikhin A.I. Algoritmy obucheniya svertochnykh neyronnykh setey [Training algorithms for convolutional neural networks]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019. N1(52). 41-54 (In Russian).
14. Henaff O. Data-efficient image recognition with contrastive predictive coding. *International Conference on Machine Learning*. PMLR. 2020. 4182-4192 (In English).
15. Bardou D., Zhang K., Ahmad S. M. Classification of breast cancer based on histology images using convolutional neural networks. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. 24680-24693 (In English).
16. Polyzotis N., Zinkevich M., Roy S., Breck E., Whang S. Data Validation for Machine Learning. *Proceedings of Machine Learning and Systems*. 2019 (In English).

## 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

07.06.2022  
06.09.2022

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал «Сельскохозяйственные машины и технологии» входит в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук.

Журнал включен в систему Российского индекса цитирования и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству *AGRIS*. Электронные версии журнала размещаются на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки.

Статьи, направляемые в журнал для публикации, должны соответствовать основной тематике журнала.

Статьи, поступившие в редакцию, проходят двойное слепое рецензирование. Отрицательная рецензия является основанием для отказа в публикации.

Редакция принимает рукописи и электронные версии статей, набранные в Word шрифтом 14 пт. через 1,5 интервала, объемом 15-20 страниц.

Приведенные в статье формулы должны иметь пояснения и расшифровку всех входящих в них величин с указанием единиц измерения в СИ. Графические материалы должны быть приложены в виде отдельных файлов: фотографии – *jpg* или *tif* с разрешением 300 dpi, графики, диаграммы – в *eps* или *ai*. Все графические материалы, рисунки и фотографии должны быть пронумерованы, подписаны и иметь ссылку в тексте.

Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны символами в редакторе формул *Microsoft Word* без использования специальных редакторов. Не допускается набор: часть формулы символами, а часть в редакторе формул. Если формулы заимствованы из других источников, то не следует приводить в них подробных выводов: авторы формул это уже сделали, повторять их не следует. Ссылки на обозначения формул обязательны. Статья должна содержать не более 10 формул, 3-4 иллюстрации, 3-4 таблицы, размер таблиц не более 1/2 страницы.

В каждой статье должны быть указаны следующие данные:

- название статьи;
- фамилия, имя и отчество автора(ов) полностью;
- e-mail автора(ов), контактный телефон;
- место работы автора(ов) (аббревиатуры не допускаются), почтовый адрес;
- ученая степень, ученое звание автора(ов);

- реферат (объем 200-250 слов);

- ключевые слова;

- библиографический список.

Статью следует структурировать, обязательно указав следующие разделы:

- Введение (актуальность);

- Цель исследования;

- Материалы и методы;

- Результаты и обсуждение;

- Выводы.

Библиографический список (не менее 20 источников из них 3-4 иностранных, входящих в базу данных *Web of Science*, за последние 5 лет) следует оформлять по ГОСТ Р 7.05-2008.

Реферат

Реферат – это самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы.

Объем реферата – 200-250 слов.

Нельзя использовать в реферате аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

На английский язык следует перевести:

- название статьи;

- фамилию, имя, отчество (полностью);

- ученая степень, ученое звание, место работы автора (ов);

- реферат и ключевые слова;

- библиографический список.

Машинный перевод недопустим!

В конце рукописи необходимо указать фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. Приводится на русском и английском языках.

Рукопись статьи должна быть подписана лично авторами. Автор несет юридическую и иную ответственность за содержание статьи.

Несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

**Подписку на журнал**  
можно оформить в агентстве «Урал-Пресс»  
на сайте: [www.ural-press.ru](http://www.ural-press.ru),  
а также в редакции журнала.

Индекс издания **66060**

**КОНТАКТЫ:**

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01  
[www.vimsmit.com](http://www.vimsmit.com) e-mail: [smit@vim.ru](mailto:smit@vim.ru)