

ISSN 2073-7599

Сельскохозяйственные машины и технологии

AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Том 18 N 4 2024

Vol. 18 N 4 2024

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL



4 2024





НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Основан в 2007 году

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

Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ для публика-
ции трудов соискателей ученых степе-
ней кандидата и доктора наук по специ-
альностям: 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

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

Охраняется законом РФ № 5351-1
«Об авторском праве и смежных правах»
от 9 июля 1993 года. Контент распростра-
няется под лицензией Creative Commons
Attribution 4.0 License. Нарушение закона
будет преследоваться в судебном порядке.

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

<http://www.vimsmit.com>
e-mail: smit@vim.ru

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

Выходит 4 раза в год
(Свободная цена)
Дата выхода в свет 13.12.2024
Формат 60 x 90/8. Объем 13,5 печ.л.
Тираж 500 экз
Отпечатано в типографии
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2024

Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайллов

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Яков Петрович Лобачевский (НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР)

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=369308

Алексей Семенович Дорохов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заместитель директора по на-
учно-организационной работе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская
Федерация, 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, Рос-
сийская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=626708

Юрий Анатольевич Иванов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, главный научный со-
трудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация,
https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=672993

Йошисукэ Кишида

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

Юрий Федорович Лачуга

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума Российской
академии наук, Москва, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=365637

Антонин Махалек

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

Владимир Дмитриевич Попов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного на-
правления Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=684252

Синьминь Лю

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

Жарылкасын Сарсембекович Садыков

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

Даврон Рустамович Норчаев

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

Юлия Сергеевна Ценц

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

Вячеслав Иванович Черноиванов

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

Роман Алексеевич Фандо

доктор исторических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Инсти-
тут истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук, Москва, Российская
Федерация, https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=124382



SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL
Founded in 2007

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

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

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

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

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

EXECUTIVE EDITORS:

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

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

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

<http://www.vimsmit.com>
e-mail: smit@vim.ru

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNologii]

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

EDITOR-IN-CHIEF

Andrey Yu. Izmaylov

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

EDITORIAL BOARD

Yakov P. Lobachevskiy (SCIENTIFIC EDITOR)

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

Aleksey S. Dorokhov

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

Mikhail N. Erokhin

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

Yuriy A. Ivanov

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

Yoshisuke Kishida

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

Yuriy F. Lachuga

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

Antonin Makhalek

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

Vladimir D. Popov

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

Xinmin Liu

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

Zharylkasyn S. Sadykov

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

Davron R. Norchaev

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

Yuliya S. Tsench

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

Vyacheslav I. Chernov

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

Roman A. Fando

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

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

Published 4 times a year (open price).

Publication date is 13.09.2024.

The format is 60 x 90/8. The volume is 13.5 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Лобачевский Я.П., Алдошин Н.В., Ценч Ю.С., Золотарев А.С. Теоретические аспекты оборота пласта в габаритах собственной борозды	4
Соловьёв С.В., Романенко В.Ю., Черников В.Г. Обоснование режимов работы самоходного оборачивателя лент льна на дистанционном управлении	10
Камбулов С.И., Божко И.В., Пархоменко Г.Г., Рыков В.Б., Подлесный Д.С. Накопление влаги при обработке паровых полей в летний период	17
Мударисов С.Г., Мифтахов И.Р. Методы глубокого обучения и технологии БПЛА идентификации заболеваний сельскохозяйственных растений	24
Юрочка С.С., Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Бердюгин П.С., Базаев С.О. Оценка стереокамер для цифрового мониторинга экстерьера коров	34
Бидеев С.И., Гулueva Л.Р. Способ увеличения площади травостоя горных кормовых угодий	41
Панкова Т.А., Кравчук А.В., Орлова С.С., Михеева О.В., Миркина Е.Н. Суммарное водопотребление люцерны в зависимости от активной поверхности почвы и биоклиматических коэффициентов	49
Новиков Э.В., Алтухова И.Н., Королева Е.Н., Безбабченко А.В. Обоснование режимов нового универсального способа сушки короткого льноволокна	55
Кульпина М.О., Чаплыгина Т.В., Степанов К.А., Блинов Н.Д. Технология предпосевного капсулирования колосьев с применением биоразлагаемых полимерных материалов ..	62
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ	
Московский М.Н., Беляков М.В., Ефременков И.Ю. Прибор фотолуминесцентного контроля зараженности семян фузариозом	71
Васильев С.А., Лимонов С.Е., Мишин С.А. Интеллектуальная полевая сенсорная станция для мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования в системе точного земледелия	79
Евдокимов А.П., Лещенко А.А. Определение теплофизических коэффициентов зерновоздушной смеси семян горчицы в условиях повышенной температуры	86
ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ	
Ценч Ю.С., Миронова А.В. Взаимосвязь парка сельскохозяйственной техники и площади пашни	94
Лысов А.К., Корнилов Т.В. Развитие технологий и средств механизации для защиты растений в Российской Федерации	100

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Lobachevsky Ya.P., Sharov V.V., Aldoshin N.V., Tsench Yu.S., Zolotarev A.S. Theoretical aspects of soil layer turnover within the boundaries of its own furrow	4
Solovyov S.V., Romanenko V.Yu., Chernikov V.G. Development of remote-controlled self-propelled flax windrow turner	10
Kambulov S.I., Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Rykov V.B., Podlesny D.S. Moisture accumulation during summer tillage of fallow fields	17
Mudarisov S.G., Miftakhov I.R. Deep learning methods and UAV technologies for crop disease detection	24
Yurochka S.S., Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Berdyugin P.S., Bazaev S.O. Assessing stereo camera applicability for digital monitoring of cattle exterior	34
Bideev S.I., Gulueva L.R. A method of increasing the area of the herbage on mountain forage lands	41
Pankova T.A., Kravchuk A.V., Orlova S.S., Mikheeva O.V., Mirkina E.N. Total water consumption of alfalfa as a function of active soil surface and bioclimatic coefficients	49
Novikov E.V., Altukhova I.N., Koroleva E.N., Bezbabchenko A.V. Substantiation of drying modes for a new universal method of short flax fiber drying	55
Kulpina M.O., Chaplygina T.V., Stepanov K.A., Blinov N.D. Technology for pre-sowing encapsulation of ears using biodegradable polymer materials	62
DIGITAL TECHNOLOGIES. ARTIFICIAL INTELLIGENCE	
Moskovsky M.N., Belyakov M.V., Efremenkov I.Yu. Photoluminescent device for monitoring Fusarium infection in seeds	71
Vasiliev S.A., Limonov S.E., Mishin S.A. Intelligent field sensor station for monitoring agrophysical parameters and phenotyping in precision agriculture system	79
Evdokimov A.P., Leshchenko A.A. Thermophysical coefficients of mustard seeds grain-air mixture under high-temperature conditions	86
HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY	
Tsench Yu.S., Mironova A.V. Correlation between agricultural machinery fleet and arable land area	94
Lysov A.K., Kornilov T.V. Advancements in plant protection technologies and mechanization in the Russian Federation	100



Теоретические аспекты оборота пласта в габаритах собственной борозды

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

Владимир Васильевич Шаров
кандидат технических наук,
sharov_vv56@mail.ru;

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

Юлия Сергеевна Ценч,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimas@mail.ru;
Андрей Сергеевич Золотарев,
научный сотрудник,
e-mail: zl200@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Оборот пласта остается наиболее распространенным приемом основной обработки почвы. Высокой культуре земледелия в наибольшей степени удовлетворяет так называемая гладкая вспашка без образования свальных гребней и развальных борозд, которая выполняется оборотными плугами. *(Цель исследования)* Обосновать кинематику пласта при его обороте в собственную борозду без поперечного смещения. *(Материалы и методы)* При рассмотрении кинематики пласта принимается допущение, что он состоит из связанной упругой среды, в процессе оборота в габаритах собственной борозды претерпевает деформации, но не разрушается. Такое допущение вполне корректно, так как известно, что задерненный и влажный пласт вырезается из почвенного массива сплошной неразрывной лентой и, практически сохраняя свои геометрические размеры, оборачивается на 180°. При обосновании траектории пласта применяются классические методы теоретической механики. *(Результаты и обсуждения)* Рассмотрены уравнения движения точек пласта при его обороте в габаритах собственной борозды. Все точки поперечного сечения пласта в процессе оборота изменяют свое положение в пространстве. Процессы изменений перемещения, скорости и ускорения i -ой точки теоретического пласта происходят по плавным зависимостям, описываемым тригонометрическими функциями. Однако при значении угла поворота $\omega t = \pi/2$ происходит резкая смена направлений графиков перемещения, скорости и ускорения, что указывает на резко переменные нагрузки, которым подвергается пласт в области этой точки. Объясняется это сменой опорного ребра, относительно которого осуществляется вращение поперечного сечения пласта. Центр тяжести поперечного сечения движется с переменными скоростью и ускорением, что говорит о наличии инерционных сил, на преодоление которых потребуются определенная энергия. *(Выводы)* Величина затрачиваемой работы во многом будет зависеть от геометрических параметров пласта a , b и режимов его оборота ω . При обороте поперечного сечения пласта на угол $\omega t = \pi/2 - \gamma$ вертикальное ускорение центральной точки O принимает максимальное значение. В этом положении при определенных условиях возможен отрыв пласта от дна борозды. Исследование кинематики оборота почвенного пласта в собственную борозду позволило обнаружить новые явления, возникающие в процессе его движения и установить закономерности влияния геометрических параметров почвенного пласта на динамические характеристики.

Ключевые слова: гладкая вспашка, почвенный пласт, плуг, оборот пласта, собственная борозда, кинематика, скорость, ускорение, траектория.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Шаров В.В., Алдошин Н.В., Ценч Ю.С., Золотарев А.С. Теоретические аспекты оборота пласта в габаритах собственной борозды // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-4-9. EDN: ACQBLW.

Scientific article

Theoretical Aspects of Soil Layer Turnover Within the Boundaries of Its Own Furrow

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

Vladimir V. Sharov,
Ph.D.(Eng.),
sharov_vv56@mail.ru;

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

Yuliya S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: vimaspa@mail.ru;

Andrey S. Zolotarev,
researcher
e-mail: zl200@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that soil layer turnover remains the most widely used method of primary tillage. Among the existing techniques, smooth plowing without producing back ridges or furrows, which is achieved using reversible plows, best meets the high standards of modern agricultural practices. (*Research purpose*) The study aims to substantiate the kinematics of soil layer turnover within the boundaries of its own furrow without lateral displacement. (*Materials and methods*) In analyzing the kinematics, the soil layer is assumed to behave as a cohesive elastic substance undergoing deformation during turnover within its own furrow, without disintegration. This assumption is quite reasonable, as it is well-established that a sodded and moist layer can be extracted as a continuous, intact strip that retains its geometric dimensions when turned 180°. The trajectory of the layer is derived using classical methods of theoretical mechanics. (*Results and discussions*) The equations governing the motion of the soil layer points during turnover within its own furrow are analyzed. During this process, all points in the cross-section of the layer undergo spatial displacement. Changes in displacement, velocity, and acceleration of the i -th point of the hypothetical layer exhibit smooth dependencies described by trigonometric functions. However, at a rotation angle of $\omega t = \pi/2$, an abrupt change occurs in the trajectories of displacement, velocity and acceleration graphs, indicating sharply variable loads acting on the soil layer at this point. The abrupt change is attributed to a shift in the support rib which serves as the axis for the rotation of the soil layer's cross-section. The center of gravity of the cross-section moves with variable velocity and acceleration, which indicates the presence of inertial forces. Overcoming these forces requires a certain amount of energy. (*Conclusions*) The energy required largely depends on the geometric parameters of the layer a , b and its rotation modes (ω). When the layer cross-section rotates by an angle $\omega t = \pi/2 - \gamma$, the vertical acceleration of the central point (O) reaches its maximum value. Under certain conditions, the soil layer may detach from the furrow bottom in this position. The kinematics analysis of a soil layer turnover within the boundaries of its own furrow reveals new phenomena occurring during its motion to identifies the patterns of influence that the soil layer's geometric parameters exert on its dynamic characteristics.

Keywords: smooth plowing, soil layer, plow, soil layer turnover, own furrow, kinematics, velocity, acceleration, trajectory.

■ For citation: Lobachevsky Ya.P., Sharov V.V., Aldoshin N.V., Tsench Yu.S., Zolotarev A.S. Theoretical aspects of soil layer turnover within the boundaries of its own furrow. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 4-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-4-9. EDN: ACQBLW.

Эффективность земледелия в значительной степени зависит от системы обработки почвы. При рациональной обработке почвы улучшаются ее свойства, плодородие возрастает, урожайность сельскохозяйственных культур увеличивается. Нерациональные приемы обработки почвы могут привести в лучшем случае к снижению плодородия, в худшем – к разрушению и потере плодородного слоя в результате эрозии. В настоящее время площадь плодородных земель в мире, потерянных для сельскохозяйственного производства, составляет 20 млн км², что почти в 1,5 раза больше площади современной пашни (свыше 14 млн км²) [1]. Причем наибольшие потери произошли в последние 100-150 лет и они практически невосполнимы, так как для образования слоя почвы 20-25 см, по расчетам почвоведов, требуется от 2000 до 4000 лет.

Определение рациональной технологии обработки почвы с учетом почвенно-климатических и

агроландшафтных условий местности ставит актуальную задачу как перед учеными, создающими новые виды техники, так и перед сельскохозяйственными производителями в отношении правильного применения технологии [2, 3].

Наибольшее распространение в Российской Федерации получила отвальная вспашка (около 70% пашни). Основные задачи такой обработки почвы сводятся к подрезанию сорняков, обороту пласта, полной заделке пожнивных остатков, рыхлению пахотного слоя на заданную глубину, заделке растительной массы, минеральных и органических удобрений [4, 5]. Отвальной вспашке плугами общего назначения присущи значительные недостатки, в частности, высокая гребнистость и глыбистость поверхности пашни, наличие пустот (пазух) в обработанном слое почвы, невозможность регулирования степени крошения почвы, высокая энергоемкость процесса. Из-за смещения почвенных пластов в поперечном направлении на поле при

смежных проходах образуются свальные гребни и развальные борозды.

С позиции повышения культуры земледелия наиболее предпочтительна гладкая вспашка, без образования свальных гребней и развальных борозд. Такую операцию можно выполнять, например, оборотными плугами. Они имеют двойной набор рабочих органов, которые действуют попеременно. Это дает возможность улучшить качество вспашки (обеспечивают гладкую пахоту), но приводит к большому увеличению удельной массы плуга со всеми вытекающими отрицательными последствиями (значительное усложнение конструкции, более высокая удельная масса и стоимость плуга, снижение КПД, повышение эксплуатационных расходов) [6-8].

Также гладкую вспашку можно производить плугами с оборотом пласта на 180° и его укладкой не в соседнюю борозду, как при традиционном способе, а в свою собственную [9-11]. Схема оборота почвенного пласта такими плугами показана на рисунке 1.

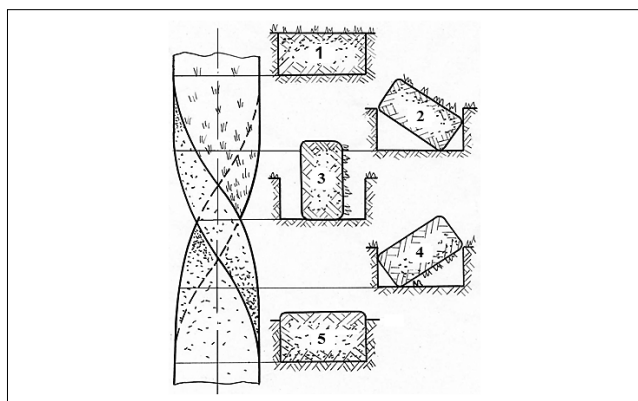


Рис. 1. Схема оборота почвенного пласта, с укладкой в собственную борозду: 1-5 – последовательные положения поперечного сечения пласта в процессе оборота
Fig. 1. Diagram of soil layer turnover within the boundaries of its own furrow: 1-5 – sequential positions of the layer's cross-section during the turnover process

Таким образом осуществляется гладкая вспашка без свальных гребней и развальных борозд. Данный способ особенно привлекателен при обработке задерненных почв, когда пласт необходимо обернуть сплошной неразрывной лентой дерниной вниз, чтобы облегчить последующую поверхностную обработку почвы [6]. При этом центр тяжести поперечного сечения пласта в процессе оборота не смещается в поперечном направлении. Такая технология предполагает выигрыш по затратам энергии в сравнении с традиционной вспашкой на 12-15% и в наибольшей степени проявляется при высокой рабочей скорости (до 9-12 км/ч).

Эффективность работы таких плугов во многом определяется выбором их рациональных конструк-

тивно-технологических параметров. Прежде всего это параметры почвенного пласта и его кинематика [5-7].

Цель исследования. Изучить и обосновать кинематику пласта при его полном (на 180°) обороте в собственную борозду без поперечного смещения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Земледельческая механика как наука составляет представление о почве, как о физическом теле с комплексом физико-механических свойств. Это положение, уже ставшее общепринятым, позволяет при рассмотрении вопросов механического движения почвенного пласта в процессе вспашки применять классические законы теоретической механики, которая наряду с математикой и физикой служит научной основой современной сельскохозяйственной техники [8-10].

При рассмотрении кинематики связного пласта предполагается, что в процессе оборота в габаритах собственной борозды он состоит из упругой сплошной среды и не разрушается (Шаров В.В. Оборота пласта без поперечного и продольного смещения (кинематика). Совершенствование рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных машин; сб. науч. трудов. М.: МИИСП, 1986. 138 с.; Лобачевский Я.П. Разработка технологических основ создания фронтальных плугов для гладкой вспашки; автореф. дисс. ... техн. наук. М., 1987. 16 с.).

Такое допущение вполне корректно, так как известно, что задерненный и влажный пласт вырезается из почвенного массива сплошной неразрывной лентой и оборачивается на 180° , практически сохраняя свои геометрические размеры [12, 13].

Рассмотрим процесс оборота почвенного пласта, вырезанного с трех сторон и закручиваемого на угол π рад (180°) на расстоянии S (рис. 2). Вначале (от 0 до $\pi/2$) пласт почвы поворачивается, опираясь на ребро DD' , которое лежит на дне борозды, и перемещается в плоскости XAY . Обернувшись на $\pi/2$ рад, пласт становится на дно борозды боковой гранью $D'C'$. Дальнейшее вращение (от $\pi/2$ до π) происходит, когда пласт опирается на ребро $C'C$, расположенное на дне борозды.

Процесс оборота пласта в заданной системе координат с целью обеспечения рациональности затрат энергии и некоторых упрощений при выводе математических зависимостей должен удовлетворять условиям:

1. Центр тяжести пласта (точка O) не должен смещаться по оси X ;
2. Почвенный пласт вращается, не отрываясь от дна борозды;
3. В процессе оборота форма поперечного сечения пласта остается неизменной.

Для получения уравнения i -ой точки пласта в координатной форме зафиксируем неподвижную прямоугольную систему координат $AXYZ$ в точке

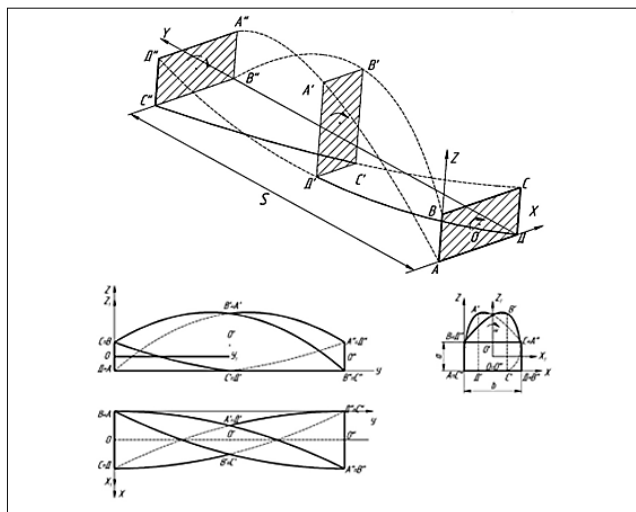


Рис. 2. Кинематика теоретического пласта при обороте в собственную борозду

Fig. 2. Kinematics of the hypothetical layer during soil layer turnover within its own furrow

А (рис. 2). Ось Y примем по направлению движения и расположим на дне борозды. Ось X перпендикулярна направлению движения и также находится на дне борозды. Ось Z совпадает с начальным положением боковой грани пласта AB .

Подвижную систему координат $OX_1Y_1Z_1$ расположим в центре тяжести поперечного сечения пласта O , при этом она будет перемещаться относительно неподвижной системы координат $AXYZ$ со скоростью V , а их соответствующие оси будут оставаться параллельными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ. Уравнение траектории i -ой точки пласта в подвижной системе координат $OX_1Y_1Z_1$ при выбранном направлении вращения выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} X_i &= R_i \cos(\varphi - \omega t), \\ Y_i &= 0, \\ Z_i &= R_i \sin(\varphi - \omega t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R_i – расстояние от начала координат O до искомой i -ой точки пласта в его поперечном сечении, м; φ – угол в системе $OX_1Y_1Z_1$ между осью X_1 и радиусом R_i , рад; ω – мгновенное значение угловой скорости, c^{-1} ; t – текущее значение времени, с.

Система уравнений (1) описывает окружность с радиусом R_i .

Начальная точка системы координат $OX_1Y_1Z_1$ движется относительно неподвижной декартовой системы координат $AXYZ$ согласно условию 1 только по осям Y и Z .

Перемещение по оси Z :

$$Z = \frac{d}{2} \sin(\omega t \pm \gamma), \quad (2)$$

где ωt – угол поворота поперечного сечения пласта ($0 < \omega t < \pi$), рад; γ – угол между диагональю попе-

речного сечения пласта и его основанием, рад; d – диагональ поперечного сечения пласта, м.

Перемещение по оси Y является функцией от угла оборота поперечного сечения пласта:

$$Y = \frac{S}{\pi} \cdot \alpha, \quad (3)$$

где угол α изменяется в интервале $0 \leq \alpha \leq \pi$; S – расстояние, на котором происходит закрутка пласта на π рад, м.

Приняв $\alpha = \omega t$ и $S = \mu \cdot b$, получаем:

$$Y = \frac{\mu \cdot b}{\pi} \cdot \omega t. \quad (4)$$

Координата центра тяжести пласта по оси X остается постоянной, и в нашем случае $X = b/2$, где b – ширина почвенного пласта.

Таким образом, начало координат системы $OX_1Y_1Z_1$ движется относительно неподвижной системы $AXYZ$ по траектории, описываемой системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} X &= b/2 \\ Y &= \frac{\mu \cdot b}{\pi} \cdot \omega t \\ Z &= \frac{d}{2} \cdot \sin(\omega t \pm \gamma) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где угол поворота находится в интервале $0 \leq \omega t \leq \pi$, при этом угол γ положительный от 0 до $\pi/2$ и отрицательный от $\pi/2$ до π .

Уравнения траектории любой точки пласта в неподвижной системе координат $AXYZ$ получим по известным в математике правилам:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{b}{2} + R_i \cos(\varphi - \omega t) \\ Y &= \frac{\mu b}{\pi} \cdot \omega t \\ Z &= \frac{d}{2} \sin(\omega t \pm \gamma) + R_i \sin(\varphi - \omega t) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Система уравнений (6) описывает траекторию любой точки пласта при его обороте 0 до π рад.

Определим скорость и ускорение точек почвенного пласта. Скорость какой-либо точки пласта равна производной по времени от уравнения, описывающего ее траекторию (6):

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= R_i \cdot \omega \cdot \sin(\varphi - \omega t) \\ \dot{Y} &= \frac{\mu b}{\pi} \cdot \omega \\ \dot{Z} &= \frac{d}{2} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t \pm \gamma) - R_i \cdot \omega \cdot \cos(\varphi - \omega t) \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Модуль скорости i -ой точки пласта:

$$\begin{aligned} V_i &= \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2} = \\ &= \omega \cdot \sqrt{R_i^2 + \frac{\mu^2 \cdot b^2}{\pi^2} + \frac{d^2}{4} \cdot \cos^2(\omega t \pm \gamma) - d \cdot R_i \cos(\omega t \pm \gamma) \cdot \cos(\varphi - \omega t)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Направление вектора скорости определяется с помощью направляющих косинусов

$$\cos(\overline{V_i, X}) = \frac{\dot{X}}{V_i}; \cos(\overline{V_i, Y}) = \frac{\dot{Y}}{V_i}; \cos(\overline{V_i, Z}) = \frac{\dot{Z}}{V_i}. \quad (9)$$

Взяв производную по времени от скорости i -ой точки пласта (7) получим ее ускорение:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X} &= -R_i \cdot \omega^2 \cdot \cos(\varphi - \omega t) \\ \ddot{Y} &= 0 \\ \ddot{Z} &= -\frac{d}{2} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t \pm \gamma) - R_i \cdot \omega^2 \cdot \sin(\varphi - \omega t) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Модуль вектора ускорения точки равен:

$$\begin{aligned} W_i &= \sqrt{\ddot{X}^2 + \ddot{Y}^2 + \ddot{Z}^2} = \\ &= \omega \cdot \sqrt{R_i^2 + \frac{d^2}{4} \cdot \sin^2(\omega t \pm \gamma) + d \cdot R_i \sin(\omega t \pm \gamma) \cdot \sin(\varphi - \omega t)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Направляющие косинусы вектора ускорения определяются:

$$\cos(\overline{W_i, X}) = \frac{\ddot{X}}{W_i}; \cos(\overline{W_i, Y}) = \frac{\ddot{Y}}{W_i}; \cos(\overline{W_i, Z}) = \frac{\ddot{Z}}{W_i}. \quad (12)$$

Для наглядности представления процесса оборота пласта приведем кинематические диаграммы характерных точек пласта A, B, C, D и O в продольно-вертикальной плоскости (рис. 3).

Значения перемещений, скоростей и ускорений точек определялись уравнениями:

$$\begin{aligned} S_o &= d / 2 \cdot \sin(\omega t \pm \gamma); S_{ABCD} = d \cdot \sin(\pm \alpha) \cdot \cos \omega t; \\ V_o &= d / 2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t \pm \gamma); V_{ABCD} = d \cdot \omega \cdot \sin(\pm \alpha) \cdot \sin \omega t; \\ J_o &= -d / 2 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t \pm \gamma); J_{ABCD} = d \cdot \omega^2 \cdot \sin(\pm \alpha) \cdot \cos \omega t. \end{aligned}$$

Анализ выражений (6), (7), (10) и приведенной диаграммы показывает, что все точки поперечного сечения пласта с началом оборота испытывают возмущение и изменяют свое положение в пространстве. Процессы изменений перемещения, скорости и ускорения i -ой точки теоретического пласта происходят по плавным зависимостям, описываемым тригонометрическими функциями. Однако при $\omega t = \pi/2$ происходит резкая смена направлений графиков перемещения, скорости и ускорения, что говорит о резко переменных нагрузках, которым подвергается пласт в области этой точки. Объясняется

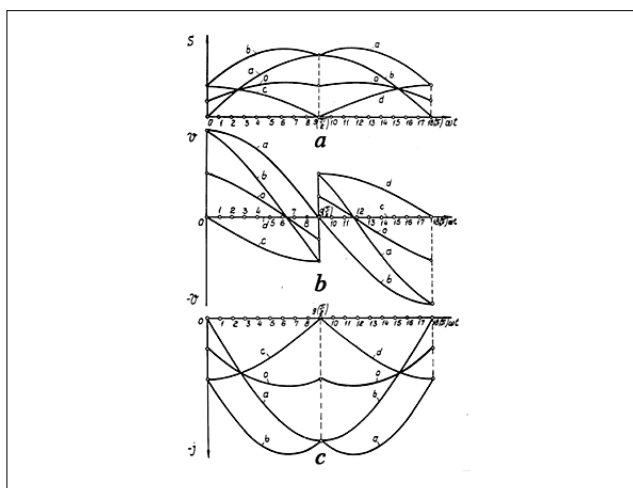


Рис. 3. Кинематические диаграммы, описывающие движение точек теоретического пласта при его обороте в собственную борозду: a – точки перемещений; b – точки скоростей; c – точки ускорений

Fig. 3. Kinematic diagrams illustrating the movement of the hypothetical layer's points during its turnover within its own furrow: a – displacement points; b – velocity points; c – acceleration points.

это сменой ребра, на которое опирается поперечное сечение пласта в процессе своего оборота.

Выводы. Центр тяжести поперечного сечения – точка O движется с переменными скоростью и ускорением, что свидетельствует о наличии инерционных сил, на преодоление которых потребуется определенная энергия. Величина затрачиваемой энергии во многом будет зависеть от геометрических параметров пласта a, b и режимов его оборота ω .

При обороте поперечного сечения пласта на угол $\omega t = \pi/2 - \gamma$ вертикальное ускорение точки O принимает максимальное значение, т.е. в этом положении при определенных условиях возможен отрыв пласта от дна борозды.

Исследование кинематики оборота почвенного пласта в собственную борозду позволило обнаружить новые явления, возникающие в процессе его целенаправленного движения, и установить закономерности влияния геометрических параметров почвенного пласта на динамические характеристики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // *Кормопроизводство*. 2022. N3. С. 41-47. DOI: 10.25685/krm.2022.3.2022.007.
2. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
3. Ценч Ю.С. Научно-технический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
4. Лобачевский Я.П., Панов А.И., Панов И.М. Перспективные направления совершенствования конструкций лемешно-отвальных плугов // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2000. N6. С. 2-5.
5. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С., Квас С.А. Развитие технологий полосной энергоресурсосберегаю-

- шей обработки почвы // *Технический сервис машин*. 2018. Т. 132. С. 232-237. EDN: VLSWCQ.
6. Сакур В.А., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Современный этап и пути дальнейшего развития пахотных агрегатов // *Техника в сельском хозяйстве*. 1991. N3. С. 9-12. EDN: UCQXIZ.
 7. Шаров В.В. Деформация почвенного пласта при различных способах вспашки // *Трактора и сельскохозяйственные машины*. 2004. N5. С. 23-24.
 8. Алдошин Н.В. Анализ технологических процессов в растениеводстве // *Техника в сельском хозяйстве*. 2008. N1. С. 34-37. EDN: IJOHAV.
 9. Сакур В.А., Лобачевский Я.П., Шаров В.В. Фронтальные плуги. *Земледелие*. 1982. Т 9. С. 53-54. EDN: UCXQPX.
 10. Шаров В.В., Лобачевский Я.П. Прогноз использова-

- ния почвообрабатывающих машин с активными рабочими органами // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2009. N1-2. С. 41. EDN: SZOKRZ.
11. Шаров В.В. Технология комбинированной обработки почвы с активным оборотом и крошением пласта // *Трактора и сельскохозяйственные машины*. 2004. N10. С. 20-22. EDN: ZTMHNN.
 12. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Ya.P. et al. Modeling the technological process of tillage. *Soil&Tillage Research*. 2019. T. 190. C. 70-77. DOI: 10.1016/j.still.2018.12.004.
 13. Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023. T. 109. C. 37-44. DOI: 10.1016/j.jterra.2023.06.001.

REFERENCES

1. Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lylin N.A. mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Fudder Journal*. 2022. N3. 41-47 (In Russian). DOI: 10.25685/krm.2022.3.2022.007.
2. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
3. Tsench Yu.S. Scientific and technological potential as the main factor for agricultural mechanization development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
4. Lobachevsky Ya.P., Panov A.I., Panov I.M. Promising directions for improving the designs of plough shares. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2000. N6. 2-5 (In Russian).
5. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Tsench Ju.S., Kvas S.A. Improved technology for stripe energy resource-saving soil processing. *Machinery Technical Service*. 2018. Vol. 132. 232-237 (In Russian). EDN: VLSWCQ.
6. Sakun V.A., Lobachevsky Ya.P., Sizov O.A. The modern stage and ways of further development of arable aggregates. *Machinery in Agriculture*. 1991. N3. 9-12 (In Russian). EDN: UCQXIZ.
7. Sharov V.V. Deformation of the soil layer in various plowing methods. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2004. N5. 23-24 (In Russian).
8. Aldoshin N.V. Analysis of technological processes in crop production. *Machinery in Agriculture*. 2008. N1. 34-37 (In Russian). EDN: IJOHAV.
9. Sakun V.A., Lobachevsky Ya.P., Sharov V.V. Frontal plows. *Zemledelie*. 1982. Vol. 9. 53-54 (In Russian). EDN: UCXQPX.
10. Sharov V.V., Lobachevsky Ya.P. Forecast of the use of tillage machines with active working organs. *Agricultural Machinery: Service and Repair*. 2009. N1-2. 4-43 (In Russian). EDN: SZOKRZ.
11. Sharov V.V. Technology of combined tillage with active turnover and crumbling of the formation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2004. N10. 20-22 (In Russian). EDN: ZTMHNN.
12. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Ya.P. et al. Modeling the technological process of tillage. *Soil&Tillage Research*. 2019. Vol. 190. 70-77 (In English). DOI: 10.1016/j.still.2018.12.004.
13. Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023. Vol. 109. 37-44 (In English). DOI: 10.1016/j.jterra.2023.06.001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Лобачевский Я.П. – руководство исследованием, концептуализация, создание окончательной версии рукописи;
Шаров В.В. – написание исходного варианта статьи;
Алдошин Н.В. – администрирование проекта, создание черновика рукописи;
Ценч Ю.С. – редактирование текста, формулировка выводов;
Золотарев А.С. – участие в моделировании оборота пласта.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Lobachevsky Ya.P. – research supervision, conceptualization, development of the final manuscript version (refining);
Sharov V.V. – writing the manuscript draft;
Aldoshin N.V. – project administration, drafting the manuscript;
Tsench Yu.S. – proofreading and refining the manuscript, formulation of conclusions;
Zolotarev A.S. – participation in modeling the soil layer turnover.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.10.2024

05.12.2024

EDN: EKXLSH

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-10-16

Научная статья
УДК 338.43(471):633.521

Разработка самоходного оборачивателя лент льна на дистанционном управлении

Сергей Викторович Соловьёв,
младший научный сотрудник,
e-mail: s.solovyov@fncl.ru;
Владислав Юрьевич Романенко,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: v.romanenko@fncl.ru;

Виктор Григорьевич Черников,
доктор технических наук, профессор,
член корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
e-mail: v.chernikov@fncl.ru

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

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

Реферат. Отметили, что крупные мировые машиностроительные компании работают над созданием сельскохозяйственных роботизированных систем. Особое внимание уделяется разработке универсальных беспилотных мобильных энергетических средств, позволяющих выполнять технологические операции без участия человека. Анализ машин для уборки и приготовления льнотресты выявил недостаточную автоматизацию и роботизацию данных процессов. При уборке льна наименее энергозатратной операцией является оборачивание. Начаты исследования по применению самоходного оборачивателя лент льна на дистанционном управлении с возможностью дальнейшей адаптации под автономную работу. (Цель исследования) Обосновать режимы и разработать силовую электрическую схему самоходного оборачивателя лент льна на электроприводе с дистанционным управлением. (Материалы и методы) Теоретически обосновали линейную скорость движения транспорта по отношению к прямолинейному движению оборачивателя. (Результаты и обсуждения) Определили режимы работы оборачивателя лент льна: угловую скорость транспорта 4,63 радиан в секунду при скорости движения машины 2,78 метров в секунду. На основании веса машины подобраны приводные колеса 7,00-12 Ф-42-1, шины которых обеспечивают отличное сцепление с дорожным покрытием и хорошую маневренность. Индекс нагрузки приводных колес составил 133, наружный диаметр шин 660 миллиметров, ширина профиля без нагрузки не более 195 миллиметров. Спроектирована силовая электрическая схема самоходного оборачивателя лент льна с дистанционным управлением. (Выводы) Определены режимы работы электрифицированного самоходного оборачивателя лент льна на радиуправлении и предложена электрическая схема, которая позволяет осуществить проектирование узлов и агрегатов машин для приготовления льнотресты.

Ключевые слова: ленты льна, самоходный оборачиватель, приготовление льнотресты, радиуправление.

■ **Для цитирования:** Соловьёв С.В., Романенко В.Ю., Черников В.Г. Обоснование режимов работы самоходного оборачивателя лент льна на дистанционном управлении // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 10-16. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-10-16. EDN: EKXLSH.

Scientific article

Development of Remote-Controlled Self-Propelled Flax Windrow Turner

Sergey V. Solovyov,
junior researcher,
e-mail: s.solovyov@fncl.ru;
Vladislav Yu. Romanenko,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: v.romanenko@fncl.ru;

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

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

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Task of the Federal State Budgetary Institution FNC LC (No. FGSS-2022-0005).

Abstract. The paper highlights efforts by major global engineering companies to develop agricultural robotic systems, with a particular focus on universal unmanned mobile energy vehicles designed to perform technological operations autonomously. Analysis of current machinery for harvesting and preparing flax straw indicates a lack of sufficient automation and robotization in these processes. Among the operations involved in flax harvesting, turning is defined as the least energy-intensive. In this regard, research has begun on the development of a remotely controlled, self-propelled flax windrow turner, with potential for further adaptation to autonomous operation. (*Research purpose*) The study aims to substantiate the optimal operating modes and develop a power electrical circuit for a remotely controlled, self-propelled flax windrow turner equipped with an electric drive. (*Materials and methods*) The study provides a theoretical basis for the conveyor's linear speed in relation to the rectilinear motion of the flax turner. (*Results and discussions*) The study identified the following operating modes for the flax windrow turner: the conveyor's angular velocity was determined to be 4.63 radians per second, with a machine speed of 2.78 meters per second. Considering the machine's weight, 7.00-12 F-42-1 drive wheels were selected, with tires that offer excellent road traction and maneuverability. The drive wheels had a load index of 133, an outer diameter of 660 millimeters, and a profile width of no more than 195 millimeters without load. Additionally, a power electrical circuit was designed for a remotely controlled self-propelled flax windrow turner. (*Conclusions*) The study determined the operating modes for an electrified radio-controlled, self-propelled flax windrow turner and proposed a powered electrical circuit for designing the units and assemblies of machinery used in flax straw harvesting.

Keywords: flax windrows, self-propelled turner, flax straw harvesting, radio control.

■ **For citation:** Solovyov S.V., Romanenko V.Yu., Chernikov V.G. Development of remote-controlled self-propelled flax windrow turner. *Agricultural Machinery and Technology*. 2024. Vol. 18. N4. 10-16 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-10-16. EDN: EKXLSH.

Наиболее трудоемким процессом в льноводстве является уборка, на ее долю в зависимости от принятой технологии приходится 65-80% затрат труда, 55-75% денежных средств и до 40% энергии [1].

К приоритетам научно-технологического развития сельского хозяйства относится переход к высокопродуктивному, экологически чистому агрохозяйству [2]. Данное направление предусматривает применение цифровых, информационных, интеллектуальных технологий и роботизированных комплексов, способствующих повышению эффективности производства продукции [3, 4].

В настоящее время крупные мировые разработчики и производители мобильных сельхозмашин ведут работы над созданием сельскохозяйственных роботов и роботизированных систем [5, 6]. Особое внимание уделяется универсальным беспилотным мобильным энергетическим средствам (МЭС) [7, 8]. Внедрение цифровых технологий в МЭС превращает тракторы и самоходные комбайны с традиционной компоновочной схемой в интеллектуальные машины, которые агрегируют с навесными и прицепными машинами за счет не только механических связей (навесная система, прицепное устройство, гидросистема, вал отбора мощности), но и информационных (электронных) [9, 10].

Россия потеряла лидирующие позиции в мире по производству и переработке льна [11]. По данным Росстата, за три года (2020-2022 гг.) посевные площади льна сократились с 53 тыс. до 35 тыс. га, соответственно, снизились и объемы производства. Если в 2000 г. в России было произведено 48 тыс. т льноволокна, то в последние годы эти объемы не превышали 30 тыс. т [12].

Слабый интерес к возделыванию льна-долгунца связан с большой трудоемкостью и отсутствием техники [13]. Если для посева мелкосеменных культур, к которым относится лен, еще можно приобрести универсальные сеялки или переоборудовать имеющиеся, то для каждой технологической операции при уборке этой культуры (теребление, оборачивание, вспушивание, прессование) необходимы специализированные технические средства. Для таких операций, как оборачивание льна при работе с прицепной и навесной техникой можно использовать трактора тягового класса не выше 0,6 [14, 15].

Цель исследования: разработать технологическую схему и обосновать конструктивные параметры самоходного оборачивателя лент льна на электроприводе, а также его силовую электрическую схему с дистанционным управлением.

Материалы и методы. В 2023 г. в условиях лаборатории агроинженерных технологий ФНЦ лубяных культур выполнен мощный расчет электрифицированного самоходного оборачивателя лент льна, разработаны компоновочно-конструктивная схема и блок-схема взаимодействия между электрическими и механическими элементами. Требуемая расчетная мощность для передвижения самоходного электрифицированного оборачивателя составила 1,33 кВт. Мощность холостого хода рабочих органов 0,88 кВт. Мощность, необходимая для привода рабочих органов, равна 1,99 кВт. Суммарная мощность с учетом 5% запаса составит 3,5 кВт [15, 16]. На основании полученных данных необходимо разработать алгоритм операций самоходного оборачивателя лент льна, выбрать и обосновать его конструктивные элементы, а также разработать силовую электрическую схему.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Так как самоходный оборачиватель лент льна не предназначен для беспилотного движения по дорогам общего пользования, то его необходимо безопасно доставить на поле (место начала автономной работы) при помощи оператора или с применением вспомогательного транспортного средства. Далее по заранее заданным GPS-координатам машина подъезжает к началу разостланной ленты льна, которую необходимо обернуть. Для перевода оборачивателя из транспортного в рабочее положение предложена конструкция рамы, соединенной с управляемым колесом через механизм подъема и опускания.

Технологическая схема радиоуправляемого оборачивателя лент льна на представлена на [рисунке 1](#). Машина состоит из рамы 1, подбирающе-оборачивающего транспортера 2, ведущих колес 3, ведомого управляемого колеса 4, механизма подъема и опускания подбирающе-оборачивающего транспортера 5.

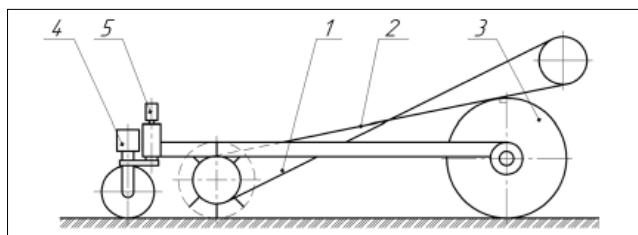


Рис. 1. Технологическая схема радиоуправляемого самоходного оборачивателя лент льна

Fig. 1. Technological diagram of a radio-controlled self-propelled flax windrow turner

Управляемое колесо, установленное на раме 3, имеет кронштейн, который свободно перемещается в раме 2, а подъем и опускание осуществляются за счет винтовой пары 4 посредством привода 1 от мотор-редуктора ([рис. 2](#)). На раме жестко закреплен рабочий орган – подбирающий барабан, который опускается на заданное расстояние от земли, контроль которого осуществляется при помощи концевых выключателей, отрегулированных заранее. Колесо установлено на раме

Далее начинается движение оборачивателя по полю с точным копированием ленты льна таким образом, чтобы центр подбирающего барабана всегда находился по центру оборачиваемой ленты льнотресты. Одновременно путем включения электродвигателя, передающего движение на ведущий шкив оборачивающего устройства, посредством ременной передачи начинается вращение подбирающего барабана. Лента подбирается с поля, оборачивается на 180° и снова расстилается. Чтобы лента поступала в подборщик без разрыва и сгуживания необходимо соблюсти и другое обязательное условие – соотношение скоростей окружной скорости

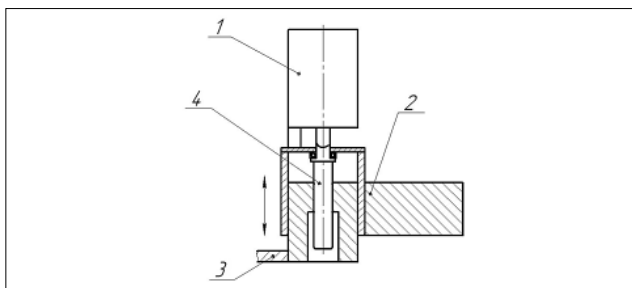


Рис. 2. Механизм подъема и опускания подбирающе-оборачивающего транспортера

Fig. 2. Lifting and lowering mechanism of the picking-up and turning conveyor

барабана и транспортера и поступательной скорости подборщика (машины).

Линейная равномерная скорость движения машины V_M равна скорости движения точки V_0 оси 0 и находится по уравнению:

$$V_M = V_0 = \omega_{KB} \cdot R_{KB}. \quad (1)$$

Скорость вращения подбирающего барабана и оборачивающего устройства должна быть синхронна со скоростью движения оборачивателя. Движение осуществляется по заданному треку с GPS-координатами либо путем дистанционного управления оператором при помощи пульта и видеоконтроля. Поворот машины осуществляется от электродвигателя через червячный редуктор. В конце ленты происходит подъем подбирающего барабана, самоходный оборачиватель переезжает к началу другой ленты и цикл повторяется.

В конце работы оборачиватель перемещается на заданную конечную точку с GPS-координатами или по команде оператора. В качестве дистанционного пульта управления предусматривается применение смартфона на базе *Android* со специальным программным обеспечением. Это позволит осуществлять управление и видеоконтроль в режиме реального времени.

При работе в режиме автопилота, если возникает препятствие в процессе работы или остановки по причине забивки либо неисправности, самоходный оборачиватель должен остановиться и подать на пульт управления сигнал оператору.

Для выбора мотор-редуктора на привод подбирающе-оборачивающего транспортера необходимо определить линейные скорости движения транспортера и машины ([рис. 3](#)).

Линейная равномерная скорость движения машины V_M , равна скорости движения V_0 точки оси 0 и находится по уравнению:

$$V_M = V_0 = \omega_{KB} \cdot R_{KB}, \quad (2)$$

где ω_{KB} – угловая скорость колеса ведущего; c^{-1} ; R_{KB} – радиус колеса ведущего, м.

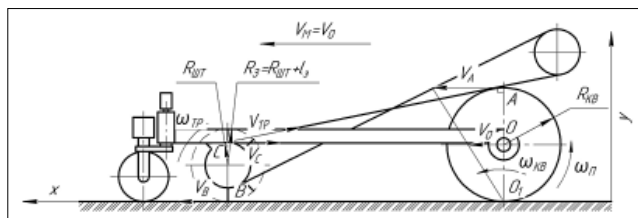


Рис. 3. Схема к определению линейной скорости движения транспорта по отношению к прямолинейному движению самоходного оборащивателя лент льна

Fig. 3. Diagram for determining the linear speed of the conveyor relative to the rectilinear movement of the self-propelled flax windrow turner

Пояснения к схеме: V_M – линейная скорость движения машины; V_0 – линейная скорость движения точки O оси колеса ведущего; V_B – окружная скорость точки B касания пружинного зуба подборщика и ленты льна (расположена на почве); V_{TP} – линейная скорость движения транспортера; R_{KB} – радиус колеса ведущего; $R_{ШТ}$ – радиус шкива транспортера; R_3 – радиус подбирающего барабана по верхушкам зуба.

Ведущее колесо жестко закреплено с осью привода и совершает равномерное вращательное движение на оси, поэтому скорость точки A находим из уравнения:

$$V_A = \omega_{\Pi} \cdot R_{\text{KB}}, \quad (3)$$

где ω_n – угловая скорость привода, с^{-1} .

Относительно почвы ведущее колесо совершает плоскопараллельное движение, мгновенный центр скоростей находится в точке O_1 . Из точек A и O_1 проведем перпендикуляр. Находим скорость точки V_A по уравнению:

$$V_A = \omega_{\text{KB}} \cdot 2 \cdot R_{\text{KB}}. \quad (4)$$

Подставляя уравнения (2) и (3) в (1) получим скорость движения машины:

$$V_M = V_A/2 = (\omega_{\pi} \cdot R_{KB})/2. \quad (5)$$

Подбирающе-оборачивающий транспортер жестко закреплен на раме машины и совершает сложное движение, которое складывается из вращательного движения шкивов транспортера и прямолинейного равномерного движения машины. Так как ремень жесткий, то точка C движется с ремнем ремня транспортера, ее скорость будет направлена в противоположную сторону, и с учетом знаков уравнение примет вид:

$$V_{\text{TP}} = V_{\text{M}} - V_{\text{C}}, \quad (6)$$

где V_C – окружная скорость шкива транспортера, м/с.

При оборачивании ленты льна слой стеблей за счет трения перемещается по транспортеру машины. Однако если взять точку C ленты, то после обо-

рачивания ее линейное перемещение относительно осей X и Y будет равно нулю, поэтому скорость точки C равна нулю. Поскольку скорость является первой производной от перемещения по осям, уравнение (5) примет вид:

$$O = V_M - V_C, \text{ откуда } V_M = V_C. \quad (7)$$

Скорость движения ремня транспортера в точке C находим из уравнения:

$$V_C = \omega_{\text{TP}} \cdot R_{\text{ITT}}, \quad (8)$$

где $\omega_{\text{ТР}}$ – угловая скорость шкива транспортера, с^{-1} ;
 $R_{\text{ШТ}}$ – радиус шкива транспортера, м.

Скорость в момент подбора ленты льна на вер-
хушках зубьев подбирающего барабана

$$V_B = \omega_{TP} \cdot R_3 = \omega_{TP} \cdot (R_{III} + l_3), \quad (9)$$

где l_3 – длина пружинного зуба, м.

Преобразуем уравнения (4) и (5) с учетом равенства (6):

$$(\omega_{\Pi} \cdot R_{\text{KB}}) / 2 = \omega_{\text{TP}} \cdot R_{\text{ШТ}}.$$

Тогда

$$\omega_{\text{TP}} = (\omega_{\text{H}} \cdot R_{\text{KB}}) / (2 \cdot R_{\text{HT}}). \quad (10)$$

Из уравнения (9) видно, что после определения необходимого радиуса и частоты вращения ведущих колес, а также принятия геометрических размеров шкивов транспортера можно определить необходимую угловую скорость подбирающе-оборачивающего транспортера.

Для дальнейших расчетов надо знать геометрические размеры ведущих колес самоходного оборачивателя. Резина для колес машин подбирается по наибольшей допустимой вертикальной нагрузке на шину при заданной скорости движения.

Для одного колеса оборачивателя ленты льна
вертикальная нагрузка

$$G_{\text{OK}} = G/3, \quad (11)$$

где $G_{\text{ок}}$ – нагрузка на колесо, Н; G – вес машины, Н.

Приняв вес машины согласно [9] 500 кг и подставив числовые значения в уравнение (10), получаем:

$$G_{OK} = (9,8 \cdot 500) / 3 = 1633 \text{ Н или } 166 \text{ кг.}$$

Определив максимальную нагрузку на колесо, по приложению А ГОСТ 7463-2003 [11], подбираем шину и колесо 7,00-12, индекс нагрузки которых составляет 46.

Для ведущих колес самоходного оборачивателя выбрана покрышка 7,00-12 Ф-42-1. Она обеспечивает отличное сцепление с дорожным покрытием и хорошую управляемость. Индекс нагрузки равен 133 (нагрузка 2060, скорость до 30 км/ч), наружный диаметр шины 660 мм, ширина профиля без нагруз-

ки не более 195 мм в соответствии с ГОСТ 7463-2003 «Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия».

Как показали производственные испытания оборачивателей лент льна, максимальная скорость агрегатирования машины при качественном выполнении операции не должна превышать 10 км/ч [10] (2,78 м/с). Исходя из этого определялась угловая скорость приводных колес:

$$\omega_{KB} = V_A / (2 \cdot R_{KB}) = 2,780,66 = 4,21, \text{с}^{-1} \text{ или } 40,2 \text{ об/мин.}$$

Ввиду конструктивных особенностей подбирающе-оборачивающего транспортера диаметр шкива принимаем до 300 мм согласно рекомендациям (Романенко В.Ю. Повышение эффективности работы оборачивателя льна путем оптимизации параметров и режимов работы подбирающе-оборачивающего устройства: дисс. ... канд. техн. наук. Тверь, 2011. 202 с.). Находим по уравнению (9) необходимую угловую скорость транспортера при линейной скорости движения машины 10 км/ч (2,78 м/с):

$$\omega_{тр} = [4,21 \cdot (0,66/2)] / [2 \cdot (0,3/2)] = 4,63, \text{с}^{-1} \text{ или } 44,2 \text{ об/мин.}$$

Таким образом для качественного выполнения самоходным обрачивателем лент льна технологического процесса необходимо подобрать понижающий редуктор и установить на приводной вал подбирающе-оборачивающего транспортера. Он должен соответствовать требованиям по выходным оборотам в диапазоне не менее 44 об/мин и не более 50 об/мин.

Одним из элементов проектирования самоходного оборачивателя лент льна является разработка силовой электрической схема с дистанционным управлением (рис. 4). Она состоит из GPS антенны 1; электродвигателя управляющего колеса 2; электродвигателя для перемещение оборачивателя 3; электродвигателя привода рабочего органа 4; электродвигателя и концевых выключателей на подъем-опускание рабочего органа 5; преобразователя 6 напряжения с 60 на 24 В; замка зажигания (включения) 7; тяговых аккумуляторов 8; контроллера 9; пульта управления 10.

Данная электрическая схема позволяет вписать разрабатываемый самоходный обрачиватель в си-

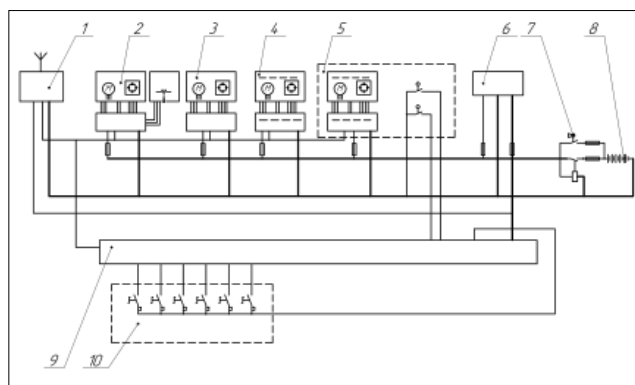


Рис. 4. Силовая электрическая схема самоходного обрачивателя лент льна

Fig. 4. Power electrical circuit of a self-propelled flax windrow turner

стему точного сельского хозяйства [17]. Эффективность работы машины в целом планируется подтвердить путем проведения полевых опытов по известным методикам [18].

Заключительным этапом станет проведение апгрейда электрической схемы путем добавления модулей для роботизации обрачивателя и возможности автономной работы [19].

Выводы

Определены режимы работы самоходного обрачивателя лент льна, угловая скорость транспортера составила $4,63 \text{ с}^{-1}$ при скорости движения машины 2,78 м/с.

На основании веса машины подобраны приводные колеса 7,00-12 Ф-42-1, шины которых обеспечивают отличное сцепление с дорожным покрытием и маневренность. Индекс нагрузки приводных колес составил 133 (нагрузка 2060, скорость до 30 км/ч), наружный диаметр шин 660 мм, ширина профиля без нагрузки не более 195 мм.

Спроектирована силовая электрическая схема самоходного обрачивателя лент льна на дистанционном управлении. На основании полученных данных на самоходный обрачиватель лент льна предлагается разработать конструкторскую документацию, а также комплектование необходимыми материалами для изготовления опытного образца и проведения полевых исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Соловьёв С.В. Исследования параметров и режимов работы аппарата для очеса льна на корню // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N2. С. 13-18. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-2-13-18.
2. Великанова И.В., Диченский А.В., Гриц Н.В. Внедрение цифровых технологий как инструмент развития отрасли льноводства // *Аграрная наука*. 2021. N10. С. 116-120. DOI: 10.32634/0869-8155-2021-353-10-116-120.
3. Старостин И.А., Ешин А.В., Годжаев Т.З., Давыдова С.А. Концептуальные направления развития беспилотных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2024. Т. 91. N1. С. 23-37. DOI: 10.17816/0321-4443-567812.
4. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки

- беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
5. Ценч Ю.С., Шаров В.В. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N3. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13.
 6. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
 7. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2023. N4(310). С. 2-5. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
 8. Рубцов И.В., Русанова О.Г., Годжаев З.А. Использование технологий специального назначения в сельскохозяйственной робототехнике // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N1. С. 37-41. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-37-41.
 9. Аксенов А.Г., Дмитриев К.С. Цифровой двойник электропривода грузового трицикла для транспортировки семян // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N1. С. 76-86. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-76-86.
 10. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Алексеев И.С., Ильченко Е.Н. Математическое моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024. Т. 25. N1. С. 112-122. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122.
 11. Попов Р.А., Великанова И.В. Проблемы и перспективы развития льняного подкомплекса в условиях трансформации мер государственной поддержки // *Техника и оборудование для села*. 2020. N9(279). С. 43-48. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-9-43-48.
 12. Романенко В.Ю. Сохранение качества льнотресты путем применения самоходного подборщика-оборачивателя // *Аграрный научный журнал*. 2023. N11. С. 194-198. DOI: 10.28983/asj.y2023i11pp194-198.
 13. Попов Р.А. Технические средства для уборки льна-долгунца / Р.А. Попов, С.А. Давыдова, И.Г. Голубев // *Техника и оборудование для села*. 2021. N7(289). С. 23-27. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-7-23-27.
 14. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ущиповский И.В., Попов Р.А. Основные проблемы научного обоснования льноводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 45-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52.
 15. Романенко В.Ю., Соловьев С.В. Выбор компоновочной схемы и мощностной расчет самоходного оборачивателя лент льна на электроприводе // *Аграрный научный журнал*. 2024. N7. С. 138-144. DOI: 10.28983/asj.y2024i7pp138-144.
 16. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Попов Р.А. и др. Определение коэффициентов трения стеблей льна по характеристикам шероховатости // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N1. С. 41-47. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-1-41-47.
 17. Гриц Н.В., Ростовцев Р.А., Диченский А.В. Использование элементов точного сельского хозяйства для получения климатически обоснованной урожайности сельскохозяйственных культур в специализированных севооборотах // *Аграрная наука*. 2023. N10. С. 88-94. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-375-10-88-94.
 18. Голубев В.В., Кудрявцев А.В., Фирсов А.С., Сафонов М.А. Методика проведения агротехнического полевого опыта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 43-48. DOI: 10.22314/207375992017.4.4348.
 19. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.

REFERENCES

1. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Solovyov S.V. Study on parameters and operating modes of the device for deseeding flax in the field. *Agricultural Machinery and Technology*. 2021. Vol. 15. N2. 13-18 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-2-13-18.
2. Velikanova I.V., Dichensky A.V., Grits N.V. Implementation of digital technologies as a tool for the development of the flax industry. *Agrarian Science*. 2021. N10. 116-120 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2021-353-10-116-120.
3. Starostin I.A., Eshchin A.V., Godzhaev T.Z., Davydova S.A. Conceptual directions for the development of unmanned mobile power vehicles for agricultural purposes. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024. Vol. 91. N1. 23-37 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-567812.
4. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
5. Tsench Yu.S., Sidorov I.V. Stages of technologies and technical means development for fertilization and plant protection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. N18(3). 14-22 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22.

6. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2019. N4. C. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
7. Lobachevskiy Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agricultural engineering organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Machinery and Equipment for the Village*. 2023. N4(310). 2-5 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
8. Rubtsov I.V., Rusanova O.G., Gojaev Z.A. The use of special-purpose technologies in agricultural robotics. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N1. 37-41 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-37-41.
9. Aksenov A.G., Dmitriev K.S. The digital twin of the electric drive of a cargo tricycle for transporting seeds. *Electrotechnologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2024. Vol. 71. N1. 76-86 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-76-86.
10. Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Alekseev I.S., Ilchenko E.N. Mathematical modeling of dynamic processes of agricultural mobile energy vehicles on an electric drive. *Agrarian Science Euro-North-East*. 2024. Vol. 25. N1. 112-122 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122.
11. Popov R.A., Velikanova I.V. Problems and prospects for the development of the linseed subcomplex in the context of the transformation of state support measures. *Machinery and Equipment for the Village*. 2020. N9(279). 43-48 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2020-9-43-48.
12. Romanenko V.Yu. Preservation of the quality of flax by using a self-propelled baler wrapper. *Agrarian Scientific Journal*. 2023. (11). 194-198 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2023i11pp194-198.
13. Popov R.A., Davydova S.A., Golubev I.G. Equipment for harvesting fiber flax. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021. N7(289). 23-27 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-7-23-27.
14. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovsky I.V., Popov R.A. The main problems of scientific support of flax growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N3. 45-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52.
15. Romanenko V.Yu., Solovyov S.V. The choice of a layout scheme and power calculation of a self-propelled flax ribbon wrapper on an electric drive. *Agrarian Scientific Journal*. 2024. N7. 138-144 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2024i7pp138-144.
16. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Popov R.A. et al. Calculation of the friction coefficients of flax stems according to their roughness characteristics. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N1. 41-47 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-1-41-47.
17. Grits N.V., Rostovtsev R.A., Dichensky A.V. The use of elements of digital agriculture to obtain climate-based crop yields in specialized crop rotations. *Agrarian Science*. 2023. N1(10). 88-94 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2023-375-10-88-94.
18. Golubev V.V., Kudryavtsev A.V., Firsov A.S., Safonov M.A. Technique of agrotechnical field experiment. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N4. 43-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-4-43-48.
19. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Соловьев С.В. – сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, проведение расчетов;
 Романенко В.Ю. – литературный анализ, формирование общих выводов, редактирование и доработка текста статьи, подготовка материала к публикации;
 Черников В.Г. – научное руководство, постановка задачи. Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Solovyov S.V. – collection and analysis of theoretical and practical materials on the research topic, calculations;
 Romanenko V.Yu. – literature review, formulation of general conclusions, manuscript proofreading and refinement, preparation of material for publication;
 Chernikov V.G. – scientific supervision, problem statement. The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

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

02.10.2024
 12.11.2024

EDN: DWQXKB

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-17-23



Научная статья

УДК: 631.316.2



Накопление влаги при обработке паровых полей в летний период

Сергей Иванович Камбулов^{1,2},доктор технических наук,
главный научный сотрудник, профессор,
e-mail: kambulov.s@mail.ru;**Игорь Владимирович Божко¹**,кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: i.v.bozhko@mail.ru;**Галина Геннадьевна Пархоменко¹**,кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: parkhomenko.galya@yandex.ru;**Виктор Борисович Рыков^{1,2}**,доктор технических наук,
главный научный сотрудник, профессор,
e-mail: rikovvb@gmail.com;**Дмитрий Сергеевич Подлесный^{1,2}**,ведущий инженер, старший преподаватель,
e-mail: podlesniy.dmitri@yandex.ru¹Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация;²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Реферат. Показали, что одна из основных задач обработки почвы паровых полей в летний период и подготовительных операций предпосевной подготовки почвы заключается в создании наиболее благоприятных условий по сохранению и накоплению влаги внутри слоев почвы. (*Цель исследования*) В зависимости от типа применяемых рабочих органов для сплошной обработки почвы паровых полей изучить процесс накопления влаги внутри слоев почвы. (*Материалы и методы*) Проведены исследования в полевых условиях с использованием экспериментального образца парового культиватора с катком шириной захвата 3 метра и стандартного культиватора для сплошной обработки почвы КСОП-4. (*Результаты и обсуждение*) За период наблюдений в июне-августе подтверждено отсутствие выноса влажных слоев на поверхность почвы (16,42-17,37 процента объемной влажности в слое 5 сантиметров) при использовании экспериментального образца парового культиватора с катком. Установили накопление объемной влажности почвы по слоям (28,40-30,48, 30,18-32,82 и 26,90-29,38 процента соответственно в слое 10, 15 и 20 сантиметров). Для сравнения, при сплошной обработке почвы стандартным культиватором наблюдался вынос влажных слоев на поверхность почвы, накопление объемной влажности уменьшилось (соответственно 18,57-21,57, 14,09-15,58 и 22,75-22,21 в слое 10, 15 и 20 сантиметров). (*Выводы*) Доказали, что применение рабочих органов для сплошной обработки почвы в летний период позволит создать условия для накопления влаги внутри слоев почвы и осуществлять обработку на небольшую глубину 4-6 сантиметров без выноса влажных слоев на поверхность.

Ключевые слова: накопление влаги, экспериментальный образец культиватора, рабочий орган, сплошная обработка почвы, паровое поле, летний период.

■ **Для цитирования:** Камбулов С.И., Божко И.В., Пархоменко Г.Г., Рыков В.Б., Подлесный Д.С. Накопление влаги при обработке паровых полей в летний период // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 17-23. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-17-23. EDN: DWQXKB.

Scientific article

Moisture Accumulation During Summer Tillage of Fallow Fields

Sergei I. Kambulov^{1,2},Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, professor,
e-mail: kambulov.s@mail.ru;**Igor V. Bozhko¹**,Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: i.v.bozhko@mail.ru;**Galina G. Parkhomenko¹**,Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: parkhomenko.galya@yandex.ru;**Viktor B. Rykov^{1,2}**,Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, professor,
e-mail: rikovvb@gmail.com;**Dmitry S. Podlesny²**,lead engineer, senior lecturer,
e-mail: podlesniy.dmitri@yandex.ru¹Agricultural Research Center «Donskoy», Zernograd, Russian Federation;²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. The paper emphasizes that the primary objective of fallow field tillage in summer and pre-sowing soil preparation is to create the most favorable conditions for moisture retention and accumulation within soil layers. (*Research purpose*) The study aimed to investigate the process of moisture accumulation within soil layers as influenced by the type of working bodies used for continuous tillage of fallow fields. (*Materials and methods*) The research was conducted in field conditions using an experimental model of a steam cultivator equipped with a roller having a working width of 3 meters, as well as a standard KSOP-4 cultivator for continuous tillage. (*Results and discussion*) Observations from June to August confirmed that the experimental steam cultivator with a roller effectively prevented the displacement of wet soil layers to the surface, maintaining a volumetric moisture content of 16.42–17.37 percent in the 5-centimeter layer. Moisture accumulation was recorded at various soil depths, with volumetric moisture levels recorded at 28.40–30.48 in the 10-centimeter layer, 30.18–32.82 percent in the 15-centimeter layer, and 26.90–29.38 percent in the 20-centimeter layer. For comparison, continuous tillage using a standard cultivator resulted in the displacement of wet soil layers to the surface, with volumetric moisture levels of 22.62–25.14 percent in the 5-centimeter layer. Moisture accumulation in deeper soil layers decreased, showing 18.57–21.57 percent in the 10-centimeter layer, 14.09–15.58 percent in the 15-centimeter layer, and 22.75–22.21 in the 20-centimeter layer. (*Conclusions*) The study demonstrated that using specific working bodies for continuous soil cultivation in summer ensures moisture retention within the soil layers. This approach facilitates shallow cultivation to a depth of 4–6 centimeters without exposing wet layers to the surface.

Keywords: moisture accumulation, experimental cultivator model, working body, continuous soil cultivation, fallow field, summer period.

For citation: Kambulov S.I., Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Rykov V.B., Podlesny D.S. Moisture accumulation during summer tillage of fallow fields. *Agricultural Machinery and Technologies*. Vol. 18. N4. 17-23 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-17-23. EDN: DWQXKB.

В засушливых условиях применение в севообороте паровых полей позволяет получать высокие урожаи зерновых культур. При этом обработка почвы в летний период способствует уничтожению сорной растительности и накоплению влаги внутри слоев почвы [1]. Основными сельскохозяйственными агрегатами, применяемыми летом на паровых полях, являются культиваторы [2]. Культивация относится к технологическим агроприемам, который обеспечивает полное уничтожение сорняков [3], выравнивание поверхности поля, а также частичное перемешивание, крошение и рыхление поверхностного слоя [4].

От обработки поверхностного слоя почвы зависит накопление и сохранение влаги не только в верхних, но и более глубоких горизонтах [5, 6]. Основная задача обработки почвы паровых полей в летний период, а также подготовительной предпосевной обработки почвы заключается в создании наиболее благоприятных условий для посева [7].

Серийно выпускаемые сельхозмашины [8], оснащенные стрельчатыми лапами [9], культивируют почву на глубину 8–10 см. В силу конструктивных особенностей рабочего органа (стрельчатой лапы) происходит вынос влажных слоев на поверхность [10], что негативно сказывается на накоплении влаги внутри обрабатываемого слоя [11]. Потери запасов влаги ведут к снижению продуктивности роста и развития сельскохозяйственных культур [12]. На накопление запасов влаги, а соответственно и формирование урожайности возделываемых культур [13], оказывают влияние как тип рабочих органов [14], так и преобладающие в период веге-

тации погодные условия [15]. Возникает необходимость совершенствования рабочих органов культиваторов, позволяющих выполнять более мелкую обработку почвы на глубину 4–6 см, без выноса влажных слоев на поверхность.

Цель исследований. В зависимости от типа применяемых рабочих органов для сплошной обработки почвы паровых полей установить степень накопления влаги внутри слоев почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Влажность слоя почвы исследовали на поле АНЦ «Донской» при использовании экспериментального образца парового культиватора (рис. 1) с катком шириной захвата 3 м и стандартного культиватора для сплошной обработки почвы КСОП-4.



Рис. 1. Экспериментальный образец парового культиватора

Fig. 1. Experimental model of a steam cultivator

Экспериментальный образец содержит раму, шесть рабочих органов для сплошной обработки почвы, почвообрабатывающий каток с изменяемым углом установки относительно рамы культиватора.

В АНЦ «Донской» предложена конструкция рабочего органа для сплошной обработки почвы паровых полей в летний период (рис. 2). В нее входят стойка 1, долотообразный нож 2, держатель 3; левостороннее 4 и правостороннее 5 плоскорежущие крылья.

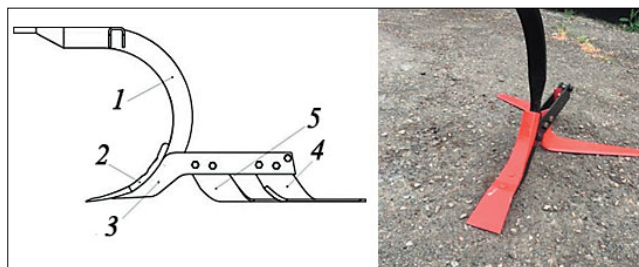


Рис. 2. Конструкция рабочего органа для сплошной обработки почвы паровых полей в летний период
Fig. 2. Design of the working body for continuous tillage of fallow fields in summer

На паровом поле были заложены экспериментальные участки площадью 0,672 га для каждого типа используемой в опытах сельскохозяйственной машины. Обработка участков проводилась в летний сезон с июня по август и предпосевной – в сентябре. Для экспериментального культиватора, учитывая особенностей конструкции рабочих органов, почва обрабатывалась на глубину от 4 до 10 см; для стандартного культиватора КСОП-4 на 8-10 см.

Для определения влажности почвы на экспериментальных участках были заложены датчики *Waterscout SM100*, подключенные к автономной микростанции *WatchDog 1400 Series* (рис. 3).



Рис. 3. Датчик влажности *Waterscout SM100* (слева) и автономная микростанция *WatchDog 1400 Series* (справа)
Fig. 3. Water Scout SM100 soil moisture sensor (left) and Watch Dog 1400 Series autonomous micro station (right)

Автономная микростанция *WatchDog 1400 Series* оснащена четырьмя программируемыми портами для подключения разных типов датчиков с возможностью установки частоты записи данных в память устройства, а также накопления фиксируемых дан-

ных. Для каждого вида исследуемых сельскохозяйственных агрегатов микростанции были запрограммированы на считывание показателей объемной влажности (в %) слоев почвы и частоту записи данных с интервалом 60 минут. Датчики влажности устанавливались на глубину слоя почвы до 20 см с шагом 5 см (рис. 4).



Рис. 4. Датчики влажности почвы, установленные по слоям
Fig. 4. Soil moisture sensors installed by layers

Влажность почвенных слоев измерялась на глубине 5, 10, 15 и 20 см. Оборудование на экспериментальных участках было установлено одновременно и фиксировало изменения показателей весь период исследований. Данные снимали ежемесячно при помощи ПК и ПО *SpecWare 9 Pro*, проводилась их первичная обработка и конвертирование (рис. 5). Последующую статистическую обработку, анализ и графическую интерпретацию данных проводили в программе *Microsoft Excel*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Объемная влажность слоев почвы равна отношению объема влаги в почве к объему всей почвы, выражается в процентах



Рис. 5. Снятие данных с микростанции *WatchDog*
Fig. 5. Data retrieval from the Watch Dog Microstation

или долях единицы. Минимальное значение этого показателя у абсолютно сухой почвы 0%, максимальное 100%, т.е. почва полностью насыщена водой. Значения объемной влажности слоев почвы за период наблюдений представлены в таблице.

При использовании для обработки почвы экспериментального образца парового культиватора с катком в слое 5 см снижается вынос влажных слоев

Таблица		Table	
СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ, % AVERAGE VALUES OF SOIL VOLUMETRIC MOISTURE, %			
Период сбора данных	Глубина слоя почвы, см	Эксперимен- тальный культиватор	КСОП-4
Июнь	5	16,42	22,62
	10	28,40	18,57
	15	30,18	14,09
	20	26,90	22,75
Июль	5	17,41	24,06
	10	29,85	20,21
	15	32,18	14,67
	20	28,29	23,99
Август	5	17,37	25,14
	10	30,48	21,57
	15	32,82	15,58
	20	29,38	22,21
Сентябрь	5	15,38	24,84
	10	29,19	20,56
	15	31,98	15,11
	20	27,86	10,29

на поверхность почвы по сравнению со стандартным культиватором. В слоях 10, 15 и 20 см наблюдается накопление влаги. Таким образом, показатели объемной влажности почвы в июне-августе подтверждают отсутствие выноса влажных слоев на дневную поверхность (16,42-17,37% объемной влажности в слое 5 см), а также накопление объемной влажности почвы по слоям 10, 15 и 20 см соответственно 28,40-30,48, 30,18-32,8 и 26,90-29,38%.

При сплошной обработке почвы стандартным культиватором вынос влажных слоев на поверхность почвы составляет 22,62-25,14% объемной влажности в слое 5 см и накопление объемной влажности в слоях почвы меньше: 18,57-21,57% в 10 см, 14,09-15,58% в 15 см, 22,75-22,21% в 20 см.

Учитывая, что засушливый период в конце летнего сезона и начало подготовительных мероприятий по обработке почвы выпадают на август-сентябрь, отмечено снижение накопления влаги внутри слоев почвы по обоим вариантам культиваторов. При использовании экспериментального культиватора сохраняется тенденция снижения выноса влажных слоев почвы на дневную поверхность (15,38 % объемной влажности в слое 5 см), продолжается аккумуляция влаги внутри слоев почвы (29,19 % в слое 10 см, 31,98% в 15 см и 27,86% в 20 см). При обработке почвы стандартным культиватором продолжается вынос влажных слоев почвы на дневную поверхность (24,84 % в слое 5 см). Также отмечается снижение накопления влаги в слое 10 и 15 см (со-

ответственно 20,56 и 15,11%), особенно резкое в слое 20 см (10,29%).

Эти данные свидетельствуют о положительном результате использования экспериментального образца культиватора для сплошной обработки почвы, что положительно скажется на предстоящих посевах озимых культур, а также росте и развитии растений.

Средние значения объемной влажности почвы на разной глубине по месяцам наблюдений представлены в виде графиков (рис. 6).

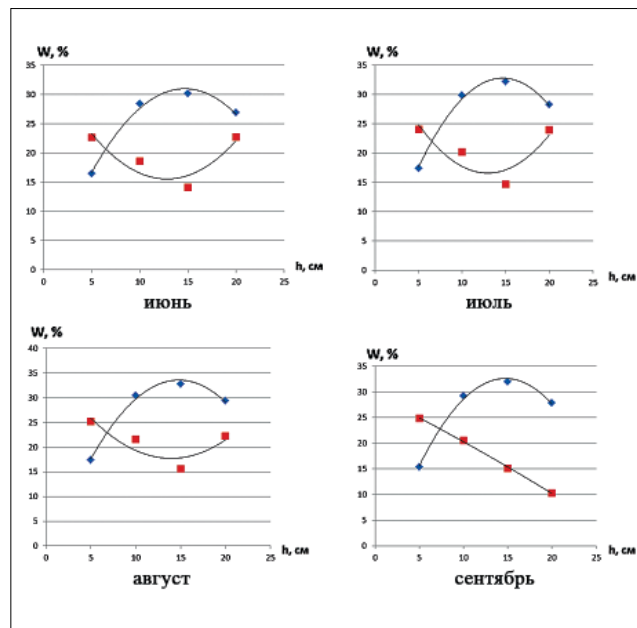


Рис. 6. Средние значения объемной влажности почвы за июнь–сентябрь

Fig. 6. Average values of soil volumetric moisture for June–September

При аппроксимации средних значений объемной влажности почвы для каждого месяца исследований получены выражения в виде полинома второй степени, раскрывающие взаимосвязь объемной влажности почвы (y) с глубиной залегания слоя (x) при различных типах сельскохозяйственных агрегатов для сплошной обработки почвы.

Выражения полинома второй степени, средних значений объемной влажности почвы:

• июнь:

✓ экспериментальный культиватор

$$y = -0,152x^2 + 4,479x - 1,905 \quad R^2 = 0,988, \quad (1)$$

✓ стандартный культиватор КСОП-4

$$y = 0,127x^2 - 3,259x + 36,41 \quad R^2 = 0,817; \quad (2)$$

• июль:

✓ экспериментальный культиватор

$$y = -0,163x^2 + 4,781x - 2,222 \quad R^2 = 0,994 \quad (3)$$

✓ стандартный культиватор КСОП-4

$$y = 0,131x^2 - 3,407x + 38,63 \quad R^2 = 0,766; \quad (4)$$

• август:

✓ экспериментальный культиватор

$$y = -0,165x^2 + 4,904x - 2,767 \quad R^2 = 0,991, \quad (5)$$

✓ стандартный культиватор КСОП-4

$$y = 0,102x^2 - 2,845x + 37,57 \quad R^2 = 0,765; \quad (6)$$

• сентябрь:

✓ экспериментальный культиватор

$$y = -0,179x^2 + 5,287x - 6,367 \quad R^2 = 0,994 \quad (7)$$

✓ стандартный культиватор КСОП-4

$$y = -0,005x^2 - 0,847x + 29,3 \quad R^2 = 0,998. \quad (8)$$

По полученным коэффициентам детерминации в опыте экспериментального образца культиватора с катком за весь период исследований 98% вариации полученных данных связано с накоплением объемной влажности внутри слоев почвы - сильная корреляционная связь. При стандартном культиваторе для сплошной обработки почвы коэффициент детерминации снижается, 76% вариации полученных данных связано с накоплением объемной влажности внутри слоев почвы и 24% вариации не может быть объяснено влиянием применяемой технологии обработки почвы. Исключение составляет засушливый период сентября: коэффициент детерминации достигает больших значений, 99% вариации полученных данных объясняется полученным выражением.

Данные средних значений объемной влажности почвы за весь период наблюдений июнь-сентябрь для обоих вариантов опыта представлены в виде графика (рис. 7).

Таким образом, применение рабочих органов для сплошной обработки почвы в летний период позволит создавать условия для накопления влажности внутри слоев почвы и осуществлять обработку почвы на небольшую глубину 4-6 см, без выноса влажных слоев на поверхность.

Выводы. Проведены экспериментальные исследования по определению влияния типов применяемых рабочих органов культиватора для сплошной обработки почвы на накопление объемной влажности обрабатываемого слоя почвы.

Данные за период наблюдений июнь-август подтверждают отсутствие выноса влажных слоев почвы на поверхность (16,42 – 17,37% объемной влажности в 5 см слое) при использовании для обработки почвы экспериментального образца парового культиватора с катком. Также подтверждено накопление объемной влажности почвы по слоям: 28,40-30,48% объемной влажности в 10 см слое,

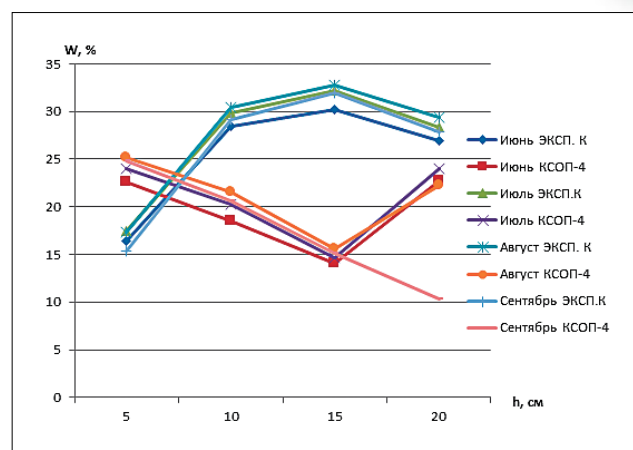


Рис. 7. Средние значения объемной влажности почвы за июнь-сентябрь

Fig. 7. Average values of soil volumetric moisture for June–September

30,18-32,82% на глубине 15 см слое и 26,90-29,38% в слое 20 см.

Применение стандартного культиватора для сплошной обработки почвы приводит к выносу влажных слоев на поверхность почвы (22,62 – 25,14% объемной влажности в 5 см слое) и меньшее накопление объемной влажности внутри слоев (18,57 – 21,57% в 10 см, 14,09 – 15,58% в 15 см, 22,75 – 22,21% в 20 см).

В засушливый период августа-сентября в отношении экспериментального культиватора сохраняется тенденция снижения выноса влажных слоев почвы на поверхность (15,38% в слое 5 см). Продолжается аккумуляция влаги внутри слоев почвы 10, 25 и 20 см соответственно 29,19, 31,98 и 27,86%. У стандартного культиватора для сплошной обработки почвы продолжается вынос влажных слоев почвы на поверхность 24,84% в 5 см слое. Также отмечается снижение накопления влаги в слое 10 см – 20,56%, в слое 15 см – 15,11 % и резкое снижение объемной влажности почвы в слое 20 см – 10,29 %.

Таким образом, применение рабочих органов для сплошной обработки почвы в летний период позволит создавать условия для накопления влажности внутри слоев почвы и осуществлять обработку почвы на небольшую глубину 4-6 см, без выноса влажных слоев на поверхность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев Ю.А., Кухарев О.Н., Ларюшин Н.П. и др. Снижение потерь почвенной влаги на испарение // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №1. С. 42-47. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-42-47.
2. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Кудрявцев А.В. и др. Результаты исследования предпосевной обработки почвы прутковым катком // *Агроинженерия*. 2020. №2. С. 9-16. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-2-9-16.
3. Gusev Y.M., Dzhogan L.Y., Nasonova O.N., Kovalev E.E. Scenario projections of the changes in water availability to wheat crops in the steppe Crimea in the 21st century and some measures increasing the efficiency of its cultivation. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. 763-771. DOI: 10.1134/S1064229321050100.
4. Niu G., Shao L.T., Sun D.A., Guo X. A simplified directly determination of soil-water retention curve from pore size distribution. *Geomechanics and Engineering*. 2020. Vol. 20. N5. 411-420. DOI: 10.12989/gae.2020.20.5.411.
5. Sattolo T.M.S., Pereira L.M., Otto R. et al. Effects of land use, tillage management, and crop diversification on soil physical quality in Cerrado agricultural systems. *Science Society of America Journal*. 2021. Vol. 85. Iss. 5. 1799-1813. DOI: 10.1002/saj2.20306.
6. Masoudi M., Elhaesahar M., Cerdà A. Risk assessment of land degradation (RALDE) in Khuzestan Province, Iran. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. 1228-1240. DOI: 10.1134/S1064229321080135.
7. Hedayatipoor A., Alamooti M.Y. Effect of conservative tillage on physical properties of soil and yield of rainfed wheat. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2020. Vol. 22. №1. 48-53. <http://www.cigrjournal.org>.
8. Al-Kaisi M.M., Lal R. Aligning science and policy of regenerative agriculture. *Soil Science Society of America Journal*. 2020. Vol. 84. №6. 1808-1820. DOI: 10.1002/saj2.20162.
9. Sándor Zs., Tállai M., Kincses I. et al. Effect of various soil cultivation methods on some microbial soil properties. *DRC Sustainable Future*. 2020. №1(1). 14-20.
10. Абдулхаев Х.Г., Халилов М.М. Обоснование параметров ножей выравнивателя-рыхлителя. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №3. С. 44-47. DOI: 10.22314/2073-7599-201913-3-44-47.
11. Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W. et al. Soil and human security in the 21st century. *Soil science*. 2015. 348. DOI: 10.1126/science.1261071.
12. Щеголихина Т.А., Болотина Н.М. Анализ функциональных характеристик и эффективности техники для внесения удобрений, предпосевной обработки почвы и заготовки кормов. *Техника и оборудование для села*. 2022. №1(305). С. 27-33. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-11-27-33.
13. Черкашин А.Г., Фалалеева Л.В., Нечунаев М.А., Зубарев Ю.Н. Влияние приёма предпосевной обработки почвы на урожайность яровых зерновых в меняющихся агроклиматических условиях Среднего Предуралья. *Пермский аграрный вестник*. 2020. №3(31). С. 76-85. DOI: 10.24411/2307-2873-2020-10042.
14. Пархоменко Г.Г. Реализация природоподобных технологий при разработке новых рабочих органов для обработки почвы в засушливых условиях. *Тракторы и сельхозмашины*. 2019. №6. С. 65-73. DOI: 10.31992/0321-4443-2019-6-65-73.
15. Митрофанов Ю.И., Петрова Л.И., Гуляев М.В., Первушина Н.К. Предпосевная обработка почвы при разных способах посева зерновых культур. *Земледелие*. 2020. №6. С. 29-33. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10607.

REFERENCES

1. Soil moisture loss reduction owing to evaporation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. №1. 42-47 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-42-47.
2. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V. et al. Study of seedbed preparation with rod-type soil compaction roller. *Agricultural Engineering*. 2020. №2. 9-16 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-2-9-16.
3. Gusev Y.M., Dzhogan L.Y., Nasonova O.N., Kovalev E.E. Scenario projections of the changes in water availability to wheat crops in the steppe Crimea in the 21st century and some measures increasing the efficiency of its cultivation. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. 763-771 (In English). DOI: 10.1134/S1064229321050100.
4. Niu G., Shao L.T., Sun D.A., Guo X. A simplified directly determination of soil-water retention curve from pore size distribution. *Geomechanics and Engineering*. 2020. Vol. 20. N5. 411-420 (In English). DOI: 10.12989/gae.2020.20.5.411.
5. Sattolo T.M.S., Pereira L.M., Otto R., Francisco E., Duarte A.P., Kappes C., Prochnow L.I., Cherubin M.R. Effects of land use, tillage management, and crop diversification on soil physical quality in Cerrado agricultural systems. *Science Society of America Journal*. 2021. Vol. 85. Iss. 5. 1799-1813 (In English). DOI: 10.1002/saj2.20306.
6. Masoudi M., Elhaesahar M., Cerdà A. Risk assessment of land degradation (RALDE) in Khuzestan Province, Iran. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. 1228-1240 (In English). DOI: 10.1134/S1064229321080135.
7. Hedayatipoor A., Alamooti M.Y. Effect of conservative tillage on physical properties of soil and yield of rainfed wheat. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2020. Vol. 22. №1. 48-53 (In English). <http://www.cigrjournal.org>.
8. Al-Kaisi M.M., Lal R. Aligning science and policy of regenerative agriculture. *Soil Science Society of America Journal*. 2020. Vol. 84. Iss. 6. 1808-1820 (In English). DOI: 10.1002/saj2.20162.
9. Sándor Zs.; Tállai M.; Kincses I.; László Z.; Káta J.; Vágó I. Effect of various soil cultivation methods on some

- microbial soil properties. *DRC Sustainable Future*. 2020. N1(1). 14-20 (In English). DOI: 10.37281/DRCSF/1.1.3.
10. Abdulkhaev K.G., Khalilov M.M. Determining the Parameters of Leveler-Ripper Shanks. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. N13(3). 44-47 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-201913-3-44-47.
 11. Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W., Olson C., Sztein A.E., Sparks D.L. Soil and human security in the 21st century. *Soil science*. 2015. 348 (In English). DOI: 10.1126/science.1261071.
 12. Shchegolikhina T.A., Bolotina M.N. Analysis of the functional characteristics and efficiency of equipment for fertilizing pre-sowing tillage and fodder. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N11(305). 27-33 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-11-27-33.
 13. Cherkashin A.G., Falaleeva L.V., Nechunaev M.A., Zubarev Yu.N. Influence of pre-sowing tillage method on spring cereal grains productivity in changing agroclimatic conditions of the Middle Preduralie. *Perm Agrarian Bulletin*. 2020. N3(31). 76-85 (In Russian). DOI: 10.24411/2307-2873-2020-10042.
 14. Parhomenko G.G. Implementation of nature-like technologies in the development of new working bodies for tillage in arid conditions. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2019. N6. 65-73 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2019-6-65-73.
 15. Mitrofanov Yu.I., Petrova L.I., Gulyaev M.V., Pervushina N.K. Presowing soil cultivation with different methods of sowing cereals. *Zemledelie*. 2020. N6. 29-33 (In Russian). DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10607.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Камбулов С.И. – научное руководство, постановка задачи, критический анализ и доработка решения;
 Божко И.В. – проведение исследований, обработка и анализ результатов исследований, анализ и доработка решения;
 Пархоменко Г.Г. – анализ научных источников по теме исследования, анализ и доработка решения;
 Рыков В.Б. – определение методологии исследования, анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, формирование общих выводов, критический анализ и доработка решения;
 Подлесный Д.С. – проведение исследований, анализ и доработка решения.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kambulov S.I. – scientific supervision, problem statement, critical analysis and solution refinement;
 Bozhko I.V. – conducting research, processing and analyzing the research result, solution analysis and refinement;
 Parkhomenko G.G. – analysis of scientific publications related to the research topic, analysis and refinement of the solution;
 Rykov V.B. – determination of the research methodology, analysis of analytical and practical materials on the research topic, formulating general conclusions, critical analysis and refinement of the solution;
 Podlesny D.S. – conducting the research, analysis and refinement of the solution.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

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

03.10.2024
 12.11.2024

EDN: IVXJHW

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-24-33

Обзорная статья
УДК 631.34;004.896

Методы глубокого обучения и технологии БПЛА для идентификации заболеваний сельскохозяйственных растений

Салават Гумерович Мударисов,
д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент
Академии наук Республики Башкортостан,
e-mail: salavam@gmail.com;

Ильнур Ринатович Мифтахов,
аспирант,
e-mail: info323@bk.ru

Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что при использовании технологий дистанционного зондирования и алгоритмов глубокого обучения значительно улучшаются возможности диагностики заболеваний растений на основе аэрофотоснимков. Работа посвящена анализу методов глубокого обучения и беспилотных летательных аппаратов для идентификации заболеваний сельскохозяйственных культур. (*Цель исследования*) Обобщение научных материалов по применению беспилотных летательных аппаратов, технологий дистанционного зондирования и методов глубокого обучения для раннего выявления и прогнозирования заболеваний культурных растений. (*Материалы и методы*) Представлены различные технологии с применением беспилотных летательных аппаратов и сенсоров для мониторинга состояния растений. Рассмотрены современные средства компьютерного зрения, направленные на повышение точности идентификации патологий растений. (*Результаты и обсуждение*) Выполнен анализ научных работ с 2010 по 2023 год. Основное внимание уделено сравнению эффективности различных алгоритмов глубокого обучения, таких как свёрточные нейронные сети (CNN), с традиционными методами, включая метод опорных векторов (SVM), и классификаторы случайного леса. Показано, что алгоритмы глубокого обучения обеспечивают более точное и раннее выявление заболеваний, что делает их перспективными для применения в растениеводстве. Обозначили вызовы, связанные с применением беспилотных аппаратов, ограничения, обусловленные качеством данных, сложностью обработки больших объемов изображений и необходимостью разработки более совершенных моделей. Предложены пути преодоления этих проблем, в том числе оптимизация алгоритмов и улучшение методов предварительной обработки данных. (*Выводы*) Сочетание беспилотных летательных аппаратов и глубокого обучения открывает новые перспективы для повышения эффективности агропроизводства. Такие технологии позволяют точно диагностировать заболевания растений на ранних стадиях и прогнозировать их развитие, чтобы своевременно принимать меры по защите урожая. Интеграция интеллектуальных систем компьютерного зрения и беспилотной авиации является перспективным направлением, способным значительно улучшить методы мониторинга и управления здоровьем растений. **Ключевые слова:** болезни растений, идентификация, диагностика, искусственный интеллект, беспилотный летательный аппарат, компьютерное зрение, глубокое обучение, система точного земледелия.

■ **Для цитирования:** Мударисов С.Г., Мифтахов И.Р. Методы глубокого обучения и технологии БПЛА идентификации заболеваний сельскохозяйственных растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 24-33. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-24-33. EDN: IVXJHW.

Review article

Deep Learning Methods and UAV Technologies for Crop Disease Detection

Salavat G. Mudarisov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, corresponding Member of the
Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan,
e-mail: salavam@gmail.com;

Ilnur R. Miftakhov,
graduate student,
e-mail: info323@bk.ru

Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russian Federation

Abstract. The paper underscores the significant advancements in plant disease diagnostics achieved through the integration of remote sensing technologies and deep learning algorithms, particularly in aerial imagery interpretation. It focuses on evaluating deep learning techniques and unmanned aerial vehicles for crop disease detection. (*Research purpose*) The study aims to review and systemize scientific literature on the application of unmanned aerial vehicles, remote sensing technologies and deep learning

methods for the early detection and prediction of crop diseases. (*Materials and methods*) The paper presents various technologies employing unmanned aerial vehicles and sensors for monitoring plant condition, with an emphasis on modern computer vision tools designed to improve the accuracy of plant pathology identification. (*Results and discussion*) The analysis encompasses scientific publications from 2010 to 2023, with a primary focus on comparing the effectiveness of deep learning algorithms, such as convolutional neural networks (*CNN*), against traditional methods, including support vector machines (*SVMs*) and random forest classifiers. The findings demonstrate that deep learning algorithms offer more accurate and earlier detection of diseases, highlighting their potential for application in plant growing. The paper also addresses challenges associated with the use of unmanned aerial vehicles, such as data quality limitations, the complexity of processing large volumes of images, and the need for the development of more advanced models. The paper proposes solutions to these issues, including algorithm optimization and improved data preprocessing techniques. (*Conclusions*) The integration of unmanned aerial vehicles and deep learning provides new prospects for enhancing the efficiency of agricultural production. These technologies enable precise early-stage diagnosis of plant diseases and facilitate the prediction of their progression, allowing for timely implementation of crop protection measures. The combination of intelligent computer vision systems with unmanned aerial vehicles presents significant opportunities for advancing monitoring methods and improving plant health management.

Keywords: plant diseases, identification, diagnostics, artificial intelligence, unmanned aerial vehicle, computer vision, deep learning, precision farming system.

■ **For citation:** Mudarisov S.G., Miftakhov I.R. Deep learning methods and UAV technologies for crop disease detection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 24-33 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-24-33. EDN: IVXJHW.

Болезни растений представляют значительную угрозу и могут привести к потере до 40% урожая [1]. Для предотвращения развития патологий необходимо их раннее обнаружение. Традиционные методы визуального мониторинга ограничены в силу масштабов посевов, особенно на больших полях. В этом контексте технологии глубокого обучения и беспилотные летательные аппараты представляют эффективные решения для идентификации и лечения болезней растений [2].

БПЛА с интеллектуальными визуальными системами позволяют обнаруживать заболевания на ранних стадиях. Алгоритмы глубокого обучения и компьютерного зрения стали ключевыми инструментами для автоматического мониторинга заболеваний растений [3]. В последние десятилетия сельское хозяйство значительно изменилось благодаря внедрению интеллектуальных машин, Интернета вещей и сложных сенсорных устройств [4]. Эти технологии помогают оптимизировать использование ресурсов и преодолевать вызовы, связанные с ограниченностью ресурсов и изменением климата [5].

Для мониторинга заболеваний растений используют спутниковые, авиационные и наземные системы, а также беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Спутниковые и авиационные технологии ограничены пространственным и временным разрешением, а также высокими затратами. Наземные системы покрывают небольшие площади и требуют много времени [6]. БПЛА с интеллектуальными системами могут стать эффективным и недорогим решением для обнаружения заболеваний растений при любых масштабах охвата.

Традиционные методы машинного обучения,

такие как *SVM* и случайного леса, имеют ограничения из-за необходимости ручного извлечения признаков, что снижает их результативность в сложных условиях [7]. Глубокие алгоритмы обучения, напротив, автоматизируют извлечение признаков и обеспечивают точные прогнозы в целях защиты растений [8]. С момента появления в 2012 г. *CNN* (свёрточные нейронные сети) признан одним из самых эффективных алгоритмов в области компьютерного зрения для распознавания и классификации заболеваний растений [9].

Использование БПЛА, компьютерного зрения и глубокого обучения для идентификации заболеваний растений представляет собой перспективное направление, требующее междисциплинарного подхода. Несмотря на несколько опубликованных обзорных статей по этой теме, большинство их авторов фокусируются на наземных платформах. Например, обсуждаются методы классификации заболеваний томатов по наземным изображениям, но игнорируются методы сегментации и обнаружения объектов. Другие исследователи [10] рассматривают возможности БПЛА, но не углубляются в методы глубокого обучения или использования БПЛА как основной платформы сбора данных.

Цель исследования. Обобщить научный материал по использованию беспилотных летательных аппаратов, технологий дистанционного зондирования, методов предварительной обработки информации и моделей компьютерного зрения на основе глубокого обучения для раннего выявления и прогнозирования болезней культурных растений.

Материалы и методы. Для обобщения существующей информации использовали методологию ис-

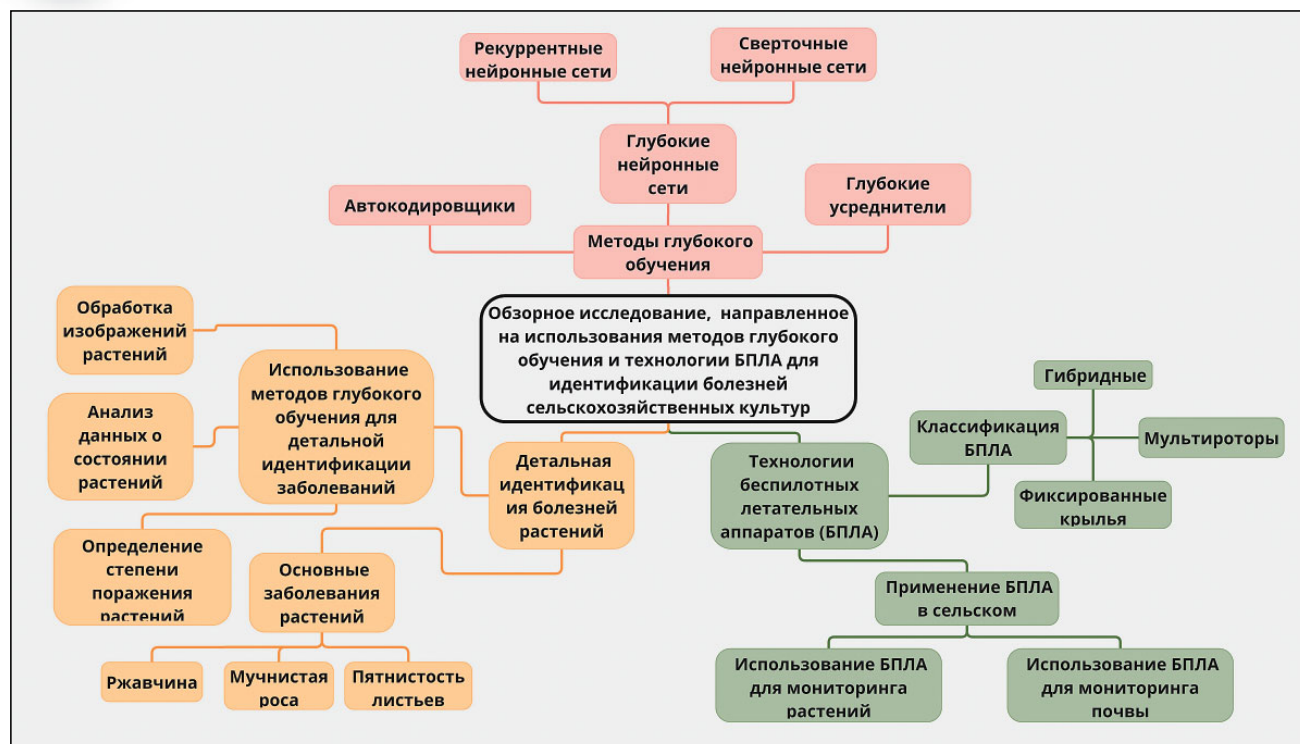


Рис. 1. Схема методологии исследования

Fig. 1. Research methodology diagram

следования с пошаговым отбором публикаций по применению алгоритмов глубокого обучения на основе компьютерного зрения для распознавания болезней растений БПЛА. Общий процесс методологии исследования представлен на рисунке 1.

Систематический обзор научных исследований проведен с использованием ключевых слов: [«болезни культурных растений» ИЛИ «болезни растений»] И [«обнаружение» ИЛИ «идентификация» ИЛИ «диагностика»] И [«БПЛА» ИЛИ «дрон»] И «искусственный интеллект» И «глубокое обучение» И «компьютерное зрение».

Основные задачи обзора:

- определение целевых растений и видов болезней;
- анализ типов БПЛА и сенсоров;
- оценка методов глубокого обучения для распознавания болезней;
- выявление модели с наилучшими результатами.

Поиск проводился в научных базах данных (PubMed, ScienceDirect, MDPI, Springer, Web of Science). Были собраны более 80 статей, связанных с распознаванием болезней растений на основе полученных БПЛА изображений, с использованием методов искусственного интеллекта (ИИ). Для дальнейшего анализа отобраны 56 наиболее релевантных публикаций.

Критерии отбора включали:

- временной интервал: публикации с 2010 по 2023 год, охватывающие период развития ИИ и БПЛА;
- экспортируемость в формат *.ris для использо-

вания в VOSviewer;

- содержание ключевых концепций, связанных с ИИ и БПЛА;
- ориентация на использование БПЛА и ИИ для сегментации и классификации данных.

Публикации анализировались с использованием Mendeley Desktop v1.19.8, после чего отбирались наиболее релевантные работы на основе аннотаций. Такой подход обеспечил высокое соответствие тематике исследований и позволил выделить часто встречающиеся ключевые термины: «глубокое обучение», «БПЛА», «заболевания растений» и «сверточная нейронная сеть», которые являются основными в контексте исследования.

Из 56 отобранных публикаций 40 включают хотя бы два из пяти проверенных ключевых слов с использованием VOSviewer. Это свидетельствует о том, что выбранные критерии отбора эффективно выделили существенные работы, сфокусированные на важных аспектах взаимодействия между глубоким обучением и заболеваниями растений, а также применения БПЛА.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. БПЛА широко используются для решения таких задач, как поисково-спасательные операции, обнаружение лесных пожаров, мониторинг транспорта, точное земледелие, доставка посылок и развитие умных городов. В агропроизводстве применяются разные платформы сбора и анализа данных, в том числе спутники, самолеты и БПЛА. Спутники и самолеты способны охватывать большие площади, но требуют значительных затрат,



Рис. 2. Типы сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов

Fig. 2. Types of agricultural unmanned aerial vehicles

чувствительны к погодным условиям и обладают более низким разрешением изображений, что снижает их эффективность. В отличие от них, БПЛА, оснащенные камерами высокого пространственного и временного разрешения, более предпочтительный выбор для задач в растениеводстве, включая идентификацию болезней агрокультур.

В сельском хозяйстве используются три основных типа БПЛА: мультироторные, самолетного типа с фиксированными крыльями и гибридные БПЛА с вертикальными взлетом и посадкой (рис. 2).

Мультироторные БПЛА наиболее популярны благодаря гибкости, способности зависать, низкой высоте полета, доступу к труднодоступным местам, что позволяет выявлять ранние признаки болезней растений. Они классифицируются по количеству пропеллеров: трикоптеры (три пропеллера), квадрокоптеры (четыре), гексакоптеры (шесть) и октокоптеры (восемь). Гексакоптеры и октокоптеры могут поднимать тяжелые камеры, но отличаются высоким энергопотреблением [12]. Квадрокоптеры считаются оптимальными для мониторинга культур за счет гибкости и длительной выносливости [12]. Однако у них ограниченное время полета, малая грузоподъемность и высокое энергопотребление.

БПЛА самолетного типа обладают высокими скоростью и высотой полета и подходят для мониторинга обширных территорий [13]. Они характеризуются высокой грузоподъемностью, длительным полетом и большим покрытием площади. Однако они менее гибкие, не могут зависать в воздухе и для них требуется взлетно-посадочных полоса.

Гибридные БПЛА сочетают в себе преимущества обоих типов: вертикальный взлет и посадку с крейсерским полетом, преодолевая ограничения вертолетов и БПЛА самолетного типа [14]. Однако имеют высокую стоимость и не могут зависать. Их использование в мониторинге болезней культур пока ограничено.

Наиболее популярны, согласно литературным источникам, модели БПЛА китайской компании DJI (табл. 1).

Преимущества и недостатки сельскохозяйственных БПЛА различных типов приведены в таблице 2.

Выбор типа БПЛА для идентификации болезней растений зависит от размера полей: для малых и средних участков подходят вертолетные БПЛА, для больших – самолетные или гибридные. Важной характеристикой БПЛА является полезная нагрузка, включая камеры для дистанционного зондирования [23].

Тип камеры и БПЛА выбираются в зависимости от цели и типа обследуемой культуры. БПЛА самолетного и гибридного типа могут нести более сложные камеры, такие как гиперспектральные, более тяжелые и дорогие. Вертолетные БПЛА обеспечивают лучшее разрешение благодаря полету на низкой высоте.

Наиболее часто используемые камеры для мониторинга заболеваний культурных растений приведены в таблице 3. Среди популярных выделяют RGB-камеры благодаря низкой стоимости, простоте использования и высокому пространственному разрешению. Их часто используют для задач, связанных с визуальной идентификацией симптомов болезней растений, особенно на уровне листьев,

Таблица 1		Table 1
БПЛА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ UAVs USED IN AGRICULTURAL PRODUCTION		
Тип, модель		Источник
БПЛА мультироторного типа		
Квадрокоптеры		
DJI Phantom 4 RTK		[15]
DJI Phantom 4 Pro		[16]
DJI Phantom 3 Professional		[17]
DJI Matrice 100		[18]
DJI S1000		[19]
3DR Iris (компания 3DRobotics, США)		[22]
Гексакоптеры		
DJI Matrice 600		[20]
DJI Matrice 600 Pro		[21]
БПЛА самолетного типа		
DT46 (компания Delair-Tech, Франция)		[13]

Таблица 2		Table 2
ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ БПЛА		
ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF AGRICULTURAL UAVs		
Преимущества		Недостатки
БПЛА мультироторного типа		
Легкость управления и маневрирования	Ограниченное время полета	
Возможность зависания в воздухе	Низкое покрытие площади	
Взлет и посадка вертикальные	Малая грузоподъемность	
Низкая стоимость	Высокое энергопотребление	
Доступность к труднодоступным местам		
БПЛА самолетного типа		
Высокая грузоподъемность	Высокая стоимость	
Длительное время полета	Не могут зависать в воздухе	
Большое покрытие площади	Трудность запуска и посадки	
Высокая скорость		
Низкое энергопотребление		
Гибридные		
Длительное время полета	Не могут зависать в воздухе	
Большое покрытие площади	Высокая стоимость	
Высокая скорость		
Возможность вертикального взлета и посадки		
Относительно низкое энергопотребление		

что делает их удобными для небольших фермерских хозяйств.

Камеры типа *RGB* применялись во многих исследованиях, например, при распознавании болезней листьев сои использовали мультиспектральную камеру на БПЛА *DJI Phantom 4* [15] или для диагностики заболеваний кукурузы на ранних стадиях с камерой *4 RTK* [16]. Однако из-за чувствительности к окружающим условиям эти камеры не так эффективны для раннего обнаружения болезней, как мультиспектральные камеры.

Для более точной диагностики используют мультиспектральные камеры, позволяющие создавать карты вегетационных индексов (*NDVI*) [24], но у них более сложная калибровка и высокая стоимость. Предложен метод создания *NDVI*-карт с использованием данных *RGB*-камер с помощью генетических алгоритмов [15].

Спектральные изображения в зависимости от их разрешения можно разделить на два основных типа: мульти- и гиперспектральные. Они предоставляют информацию по электромагнитному спектру от видимого до ближнего инфракрасного (*NIR*), что позволяет вычислять надежные вегетационные индексы. Спектральные камеры широко используются для идентификации болезней растений и культур с БПЛА благодаря предоставлению более детальной информации, чем обычные камеры. Основные различия между мульти- и гиперспектральными системами изображения можно свести к двум: количество каналов в гиперспектральных камерах намного больше и они дороже.

Мультиспектральные и гиперспектральные камеры эффективнее как инструмент для автоматического обнаружения симптомов болезней и в сравнении с *RGB*-камерами надежнее при различных условиях освещения, что позволяет им более точно различать здоровые и стрессовые растения. Гиперспектральные камеры предоставляют более детальную информацию, позволяя классифицировать различные типы стресса культур, что труднее сделать по мультиспектральным данным [29].

Тепловизионные инфракрасные камеры – это еще один возможный тип сенсоров для идентификации болезней культур с помощью аэрофотосъемки. Инфракрасный (*IR*) датчик включает в себя несколько спектральных полос: в ближней инфракрасной (*NIR*), коротковолновой (*SWIR*), средневолновой (*MWIR*), длинноволновой (*LWIR*) и дальней инфракрасной (*FIR*) зонах [30, 31]. Эти камеры можно применять и днем, и ночью.

Таблица 3 Table 3						
КАМЕРЫ, ИСПОЛЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ БОЛЕЗНЕЙ РАСТЕНИЙ CAMERAS USED FOR PLANT DISEASE DETECTION						
Год	Культура	Модель БПЛА	Полезная нагрузка	Модель	Результат, %	Источник
2023	Кукуруза	<i>DJI Phantom 4 Pro</i>	<i>RGB</i>	<i>YOLOv5</i>	92,00	[16]
2023	Соя	<i>DJI Phantom 4 multispectral</i>	Мультиспектральная камера	<i>AlexNet</i>	99,07	[27]
2023	Пшеница	<i>DJI 4 pro</i>	<i>RGB</i>	<i>LSTM-PSPNet</i>	95,20	[20]
2022	Картофель	<i>DJI S1000</i>	Гиперспектральная камера	<i>3D-CNN</i>	98,09	[19]
2021	Пшеница	<i>DJI Matrice 100</i>	Мультиспектральная камера	<i>U-Net</i>	91,3	[28]
2021	Пшеница	<i>DJI Sentinel 2</i>	<i>RGB</i>	<i>PSPNet</i> <i>U-Net</i> <i>FCN</i>	98 94 90	[25]
2021	Пшеница	<i>DJI M100</i>	Мультиспектральная камера	<i>Ir-UNet</i>	94,63	[25]
2019	Пшеница	<i>DJI S1000</i>	<i>RGB</i>	<i>DCNN</i>	85,00	[26]
2018	Картофель	<i>3DR Iris + автопилот Pixhawk</i>	Мультиспектральная камера	<i>MLP (NIR-G-B)</i>	8,8	[22]

Установленные на БПЛА тепловизионные камеры используются для мониторинга водного стресса и болезней культур. В отличие от *RGB*-камер, которые фиксируют видимый свет, тепловизионные камеры чувствительны к инфракрасному спектру, предоставляя дополнительную информацию о состоянии растения, которую нельзя получить с помощью мультиспектральных камер. Они генерируют карту тепловых точек по измерению излучения целевой культуры, а по энергии излучения можно оценивать состояние культуры на основе ее температурных аномалий и несоответствий. Данные термального дистанционного зондирования могут использоваться для обнаружения болезней культур до того, как они визуально заметны. Однако, в случае тепловизионных изображений необходимо учитывать несколько факторов: временное и пространственное разрешение изображений, условия окружающей среды, разнообразие видов и стадий роста культур, а также высоту полета БПЛА и угол обзора [32].

Собранные с камер технического зрения данные необходимо обрабатывать и извлекать ключевые характеристики для идентификации болезней с использованием мощных алгоритмов и методов.

Предварительная обработка данных технического зрения играет ключевую роль в точной и эффективной идентификации болезней, может включать следующие действия.

1. Устранение и фильтрация шума с помощью различных методов, таких как медианный фильтр или фильтр Гаусса, помогает улучшить качество изображения и избавиться от случайных искажений.

2. Нормализация и масштабирование изображений (приведение яркости и контраста изображений к стандартным значениям) помогают унифицировать данные и обеспечивают согласованность в последующей обработке. В исследовании [30] отмечается, что размер входного изображения для различных архитектур *CNN*, таких как *U-net* и *InceptionNet* (1, 2 и 3), имеет важное значение и варьируется. Для модели *U-net* все изображения из обучающего набора данных были изменены до размера $256 \times 256 \times 3$, в то время как для *InceptionNet* используется размер изображений $299 \times 299 \times 3$. Это объясняется тем, что сети *CNN* устанавливают определенные требования к размеру входных изображений. Важным этапом исследования была нормализация изображений с использованием *z-score normalization*. Этот метод нормализации выполнялся на основе стандартного отклонения (*SD*) и среднего значения набора обучающих изображений. Такой подход позволяет стандартизировать данные и обеспечить их согласованность перед обучением модели.

Комплексный подход, объединяющий глубокое обучение с методами улучшения данных, является перспективным для точного выявления болезней растений и оценки их влияния на выживаемость.

3. Калибровка цвета (в случае цветных изображений) необходима для корректного анализа и может включать баланс белого и коррекцию цветового пространства.

4. Применение методов улучшения контраста, таких как гистограммное выравнивание, может повысить видимость деталей и облегчить выделение ключевых характеристик.

5. Применение операторов выделения границ, например, оператора Собеля или оператора Кэнни, позволяет выделить контуры и структуры, что важно для определения особенностей болезней.

6. Преобразование изображения в бинарное (черно-белое) с использованием порогового значения может облегчить последующий анализ и выделение объектов интереса.

7. Применение операций морфологии, таких как эрозия и дилатация, способствует устранению шумов, объединению близких объектов и улучшению их формы.

8. Использование специализированных алгоритмов для извлечения ключевых характеристик, таких как текстура, форма и размер, в зависимости от конкретной задачи.

После предварительной обработки данные будут готовы для более точного и надежного анализа с применением алгоритмов машинного обучения или других методов идентификации болезней.

За последнее десятилетие глубокие алгоритмы обучения на основе компьютерного зрения достигли интересных результатов во многих областях, включая сельское хозяйство. Поражение болезнями растения визуально проявляется такими симптомами, как изменение цвета, скручивание листьев, пятна на листьях и плодах. Это делает глубокие алгоритмы обучения лучшим выбором при идентификации болезней. Для этой цели можно использовать три основных задачи компьютерного зрения: обнаружение объектов [21], классификацию изображений и их сегментацию.

Диагностика болезней культур с использованием глубоких алгоритмов обучения на основе обработки изображений, полученных с помощью БПЛА, вызывает все больший интерес. Несколько последних исследований по обнаружению болезней культур с помощью БПЛА основаны на глубоких моделях обучения для преодоления ограничений традиционных методов, особенно алгоритмов свёрточных нейронных сетей. Эти исследования были направлены на болезни полевых и овощных культур: пшеницы [15], кукурузы [16], томаты и картофель [22].

В нескольких недавних исследованиях успешно использовались комбинация полученных с БПЛА

изображений и глубоких алгоритмов обучения для идентификации различных заболеваний основных злаковых культур, включая пшеницу и кукурузу. Например, авторы [15], а также [33] сосредоточились на выявлении болезни желтой ржавчины с использованием различных моделей компьютерного зрения на основе глубокого обучения. Это одна из самых опасных болезней, которая ежегодно приводит к значительным, более 5 млн т, потерям урожая пшеницы. Для минимизации воздействия этой болезни авторы [26] предложили новый метод семантической сегментации на основе модели *U-Net* для выявления зараженных участков пшеничных полей с использованием мультиспектральных данных, собранных с помощью платформы БПЛА. Для улучшения основной архитектуры *U-Net* они внедрили три модуля: нерегулярного кодирования (*Irregular Encoder Module, IEM*), нерегулярного декодирования (*Irregular Decoder Module, IDM*) и переоценки каналов с учетом содержания (*Content Aware Channel Re-weight Module, CCRM*). Исследовалось влияние типа входных данных на общую производительность глубокой модели обучения для обнаружения болезни желтой ржавчины в пшеничных полях. Было обнаружено, что предложенная модель *Ir-UNet* показывает хорошие результаты, используя всю информацию из пяти полос, собранную с мультиспектральной камеры *RedEdge*. Общая точность достигла 96,95%, а *F1*-мера — 94,66%, что превысило результаты, полученные в работе [27], где *F1*-мера составила 92%. Кроме того, немного улучшилась общая точность (96,97%) при комбинации всех исходных полос и их вариантов измеренных выбранных вегетационных индексов (*SVI*). Применяя переоценку признаков с использованием *CCRM* модель *Ir-UNet* обеспечивает общую точность 97,13%.

Аналогично, в работе [23] исследовали производительность различных моделей машинного обучения и глубокого обучения для выявления болезни желтой ржавчины в пшеничных полях на основе *RGB*-изображений, полученных с БПЛА. Выяснилось, что обеспечивают лучшую точность алгоритмы *PSPNet* (98%) и *SVM* (96%) среди всех протестированных моделей, включая *Random Forest* (73%), *BPNN* (86%), *FCN* (90%), и *U-Net* (94%).

Для определения степени тяжести поражения картофеля поздней мучнистой росой на мультиспектральных изображениях, полученных с помощью БПЛА [22], использовали различные методы, в том числе традиционные методы машинного обучения и модель глубокого обучения. Результаты показали, что *CNN* и *RF* превзошли *MLP* и *SVR*, достигнув значений R^2 соответственно 0,74 и 0,75. Аналогично авторы исследования [19] разработали *3D-CNN* модель под названием *CropdocNet* для

обнаружения болезни поздней мучнистой росы картофеля на гиперспектральных изображениях, полученных с помощью БПЛА; средняя точность на обучающем и независимом тестовом наборах достигла соответственно около 98 и 96%.

В целом сочетание глубокого обучения и изображений, полученных с помощью БПЛА, показало многообещающие результаты в идентификации и классификации различных заболеваний культур, способствуя внедрению и развитию системы точного земледелия.

Выводы. Современные технологии на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и передовых алгоритмов глубокого обучения становятся новым эффективным решением для выявления, диагностики и прогнозирования болезней сельскохозяйственных растений.

Выбор типа БПЛА для решения задач идентификации болезней зависит в основном от площади возделываемых культур. Для малых и средних участков предпочтительны БПЛА вертолетного типа, обладающие легкостью управления и возможностью зависания в воздухе. Для больших площадей подходят БПЛА самолетного типа, которые характеризуются высокой грузоподъемностью, длительным полетом, высокой скоростью и низким энергопотреблением. Гибридные БПЛА объединяют преимущества обоих типов, обеспечивая длительность полета, большое покрытие площади и высокую скорость.

Для идентификации болезней растений наиболее распространенными типами датчиков являются *RGB*-камеры. Для получения более детальной информации и обнаружения различных типов стресса культурных растений предпочтительными являются гиперспектральные камеры. Улучшить возможности визуального обнаружения систем идентификации болезней позволяют тепловизионные инфракрасные камеры, с их помощью можно генерировать карту тепловых точек для оценки состояния культуры на основе ее температурных аномалий и несоответствий.

Для качественного и точного выявления болезней растений следует использовать алгоритмы глубокого обучения. Они обеспечивают более высокую производительность по сравнению с традиционными методами (основанными на пространственных и наземных технологиях), а также методами машинного обучения, такими как метод опорных векторов и классификаторы случайного леса.

Компьютерное зрение в связке с беспилотными летательными аппаратами открывает новые возможности диагностики заболеваний растений. БПЛА, оснащенные камерами и специализированным программным обеспечением, способны с большой точностью собирать изображения полей с целью анали-

за и классификации здоровых и пораженных участков растений. Обнаружение объектов помогает изолировать и идентифицировать конкретные признаки болезни, а методы сегментации изображений позволяют детально определить границы пора-

женных областей и оценить степень поражения. Эти технологии не только ускоряют процесс диагностики, снижая зависимость от визуальной оценки агрономами, но и предоставляют детальные данные для принятия решений о точечной обработке растений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Thangaraj R., Anandamurugan S., Pandiyan P. et al. Artificial intelligence in tomato leaf disease detection: a comprehensive review and discussion. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2021. DOI: 10.1007/s41348-021-00500-8.
2. Курченко Н.Ю., Даус Ю.В., Труфляк Е.В., Ильченко Я.А. Параметры применения беспилотных летательных аппаратов при обработке средствами защиты растений сельскохозяйственных культур // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2023. N1 (69). С. 527-536. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-69-1-527-536.
3. Sladojevic S., Arsenovic M., Anderla A. et al. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2016. 1-11. DOI: 10.1155/2016/3289801.
4. Smirnov I., Kuttyrev A., Khort D. et al. Developing neural-based hardware and software complex with a mobile application for monitoring apple fruits on tree canopy. *Horticulture and Viticulture*. 2023. 43-51. DOI: 10.31676/0235-2591-2023-1-43-51.
5. Neupane K., Baysal-Gurel F. Automatic identification and monitoring of plant diseases using Unmanned Aerial Vehicles: a review. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. N19. 1-19. DOI: 10.3390/rs13193841.
6. Sankaran S., Khot L.R., Espinoza C.Z. et al. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *European Journal of Agronomy*. 2015. Vol. 70. 112-123. DOI: 10.1016/j.eja.2015.07.004.
7. Rokach L., Maimon O. Top-down induction of decision trees classifiers – a survey. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics*. 2005. Vol. 35. N4. 476-487. DOI: 10.1109/TSMCC.2004.843178.
8. Singh A., Ganapathysubramanian B. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. *Trends in Plant Science*. 2020. Vol. 25. N1. 11-13. DOI: 10.1016/j.tplants.2019.09.003.
9. Kamilaris A., Prenafeta-Boldú F.X. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 147. 70-90. DOI: 10.1016/j.compag.2018.02.016.
10. Zhang H., Zhang B., Wei Z. et al. Lightweight integrated solution for a UAV-borne hyperspectral imaging system. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. N4. 657-671. DOI: 10.3390/rs12040657.
11. Pittu V.R., Gorantla S.R. Diseased area recognition and pesticide spraying in farming lands by multicopters and image processing system. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2020. Vol. 53(1). 123-130. DOI: 10.18280/jesa.530115.
12. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Series*. 2020. 012062 (In English). DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012062.
13. Albetis J., Jacquin A., Goulard M. et al. On the potentiality of UAV multispectral imagery to detect flavescente dorée and grapevine trunk diseases. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. N1. 23-37. DOI: 10.3390/rs11010023.
14. Song B., Park K. Detection of aquatic plants using multispectral UAV imagery and vegetation index. *Remote Sensing*. 2020. 387-400. DOI: 10.3390/rs12030387.
15. Zhang T., Xu Z., Su J. et al. Ir-UNet: irregular segmentation u-shape network for wheat yellow rust detection by UAV multispectral imagery. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. N19. 3892. DOI: 10.3390/rs13193892.
16. Sassu A., Motta J., Deidda A. et al. Artichoke deep learning detection network for site-specific agrochemicals UAS spraying. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 213. 106395. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106395.
17. Kerkech M., Hafiane A., Canals R. Plant disease detection using the UAV imagery and deep learning. *Computers in Industry*. 2020. Vol. 123. 103316. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316.
18. Li J., Huang W., Zhao C., Jin J. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A case study on wheat nitrogen and water stress. *International Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 40(4). 1325-1346. DOI: 10.1080/01431161.2018.1525662.
19. Shi Y., Han L., Kleerekoper A. et al. Novel CropdocNet model for automated potato late blight disease detection from unmanned aerial vehicle-based hyperspectral imagery. *Remote Sensing*. 2022. 20396. DOI: 10.3390/rs14020396.
20. Yu J., Cheng T., Cai N. et al. Wheat lodging segmentation based on LSTM-PSPNet deep learning network. *Drones*. 2023. Vol. 7. N2. 53-66. DOI: 10.3390/drones7020053.
21. Xu W., Chen P., Zhan Y. et al. Cotton yield estimation model based on machine learning using time series UAV remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 104. 102511. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102511.
22. Duarte-Carvajalino J.M., Alzate D.F., Ramirez A.A. et al. Evaluating late blight severity in potato crops using unmanned aerial vehicles and machine learning algorithms. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. 1513. DOI: 10.3390/rs10101513.
23. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. История развития систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные*

- машины и технологии. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
24. Курбанов Р.К., Захарова Н.И., Захарова О.М., Горшков Д.М. Оценка перезимовки всходов селекционной озимой пшеницы с помощью БПЛА // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N3(32). С. 133-139. EDN: YYRCTL.
 25. Zhang X., Han L., Dong Y. et al. A deep learning-based approach for automated yellow rust disease detection from high-resolution hyperspectral UAV images. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. N13. 1554. DOI: 10.3390/rs11131554.
 26. Zhang B., Zhao D. An ensemble learning model for detecting soybean seedling emergence in UAV imagery. *Sensors*. 2023. Vol. 23. N15. 6662. DOI: 10.3390/s23156662.
 27. Su J., Yi D., Su B. et al. Aerial visual perception in smart farming: Field study of wheat yellow rust monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 17. N3. 2242-2249. DOI: 10.1109/TII.2020.2979237.
 28. Behmann J., Mahlein A.-K., Rumpf T. et al. A Review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. *Precision Agriculture*. 2015. Vol. 16. N3. 239-260. DOI: 10.1007/s11119-014-9372-7.
 29. Mahlein A.-K., Kuska M.T., Behmann J. et al. Hyperspectral and thermal imaging of plant diseases in horticulture. *Sensors*. 2018. Vol. 18. N9. 2936. DOI: 10.3390/s18092936.
 30. Shahzaad B., Bouguettaya A., Mistry S. et al. Resilient composition of drone services for delivery. *Future Generation Computer Systems*. 2021. Vol. 115. 335-350. DOI: 10.1016/j.future.2020.09.023.
 31. Курбанов Р.К., Захарова Н.И., Гайдук О.М. Использование теплового канала (LWIR) для оценки состояния посевов и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. Т. 67. N3(40). С. 87-94. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-3-87-94.
 32. Лелюхин Д., Тutyгин В. Система диагностики заболеваний листьев растений по фотоизображениям, полученным с помощью БПЛА // *Известия Тульского государственного университета*. 2018. N2. С. 129-137. EDN: RAQZLK.
 33. Pan Q., Gao M., Wu P. et al. A deep-learning-based approach for wheat yellow rust disease recognition from unmanned aerial vehicle images. *Sensors*. 2021. 6540-6553. DOI: 10.3390/s21196540.

REFERENCES

1. Thangaraj R., Anandamurugan S., Pandiyan P. et al. Artificial intelligence in tomato leaf disease detection: a comprehensive review and discussion. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2021 (In English). DOI: 10.1007/s41348-021-00500-8.
2. Kurchenko N.Yu., Daus Yu.V., Truflyak E.V., Ilchenko Ya.A. Parameters of the use of unmanned aerial vehicles in the processing of crop protection products. *Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex*. 2023. N1(69). 527-536 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-69-1-527-536.
3. Sladojevic S., Arsenovic M., Anderla A. et al. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2016. 1-11 (In English). DOI: 10.1155/2016/3289801.
4. Smirnov I., Kuttyrev A., Khort D. et al. Developing neural-based hardware and software complex with a mobile application for monitoring apple fruits on tree canopy. *Horticulture and Viticulture*. 2023. 43-51 (In English). DOI: 10.31676/0235-2591-2023-1-43-51.
5. Neupane K., Baysal-Gurel F. Automatic identification and monitoring of plant diseases using Unmanned Aerial Vehicles: a review. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. N19. 1-19 (In English). DOI: 10.3390/rs13193841.
6. Sankaran S., Khot L.R., Espinoza C.Z. et al. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *European Journal of Agronomy*. 2015. Vol. 70. 112-123 (In English). DOI: 10.1016/j.eja.2015.07.004.
7. Rokach L., Maimon O. Top-down induction of decision trees classifiers – a survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C (Applications and Reviews)*. 2005. Vol. 35. N4. 476-487 (In English). DOI: 10.1109/TSMCC.2004.843178.
8. Singh A., Ganapathysubramanian B. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. *Trends in Plant Science*. 2020. Vol. 25. N1. 11-13 (In English). DOI: 10.1016/j.tplants.2019.09.003.
9. Kamilaris A., Prenafeta-Boldú F.X. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 147. 70-90 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2018.02.016.
10. Zhang H., Zhang B., Wei Z. et al. Lightweight integrated solution for a UAV-borne hyperspectral imaging system. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. N4. 657-671 (In English). DOI: 10.3390/rs12040657.
11. Pittu V.R., Gorantla S.R. Diseased area recognition and pesticide spraying in farming lands by multicopters and image processing system. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2020. Vol. 53(1). 123-130 (In English). DOI: 10.18280/jesa.530115.
12. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series*. 2020. 012062 (In English). DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012062.
13. Albetis J., Jacquin A., Goulard M. et al. On the potentiality of UAV multispectral imagery to detect flavescence dorée and grapevine trunk diseases. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. N1. 23-37 (In English). DOI: 10.3390/rs11010023.
14. Song B., Park K. Detection of aquatic plants using multispectral UAV imagery and vegetation index. *Remote Sensing*. 2020. 387-400 (In English). DOI: 10.3390/rs12030387.
15. Zhang T., Xu Z., Su J. et al. Ir-unet: Irregular segmentation u-shape network for wheat yellow rust detection by UAV

- multispectral imagery. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. N19. 3892 (In English). DOI: 10.3390/rs13193892.
16. Sassu A., Motta J., Deidda A. et al. Artichoke deep learning detection network for site-specific agrochemicals UAS spraying. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 213. 106395 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2022.106395.
 17. Kerkech M., Hafiane A., Canals R. Plant disease detection using the UAV imagery and deep learning. *Computers in Industry*. 2020. Vol. 123. 103316 (In English). DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316.
 18. Li J., Huang W., Zhao C., Jin J. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A case study on wheat nitrogen and water stress. *International Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 40(4). 1325-1346 (In English). DOI: 10.1080/01431161.2018.1525662.
 19. Shi Y., Han L., Kleerekoper A. et al. Novel CropdocNet model for automated potato late blight disease detection from unmanned aerial vehicle-based hyperspectral imagery. *Remote Sensing*. 2022. 20396 (In English). DOI: 10.3390/rs14020396.
 20. Yu J., Cheng T., Cai N. et al. Wheat lodging segmentation based on LSTM-PSPNet deep learning network. *Drones*. 2023. Vol. 7. N2. 53-66 (In English). DOI: 10.3390/drones7020053.
 21. Xu W., Chen P., Zhan Y. et al. Cotton yield estimation model based on machine learning using time series UAV remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 104. 102511 (In English). DOI: 10.1016/j.jag.2021.102511.
 22. Duarte-Carvajalino J.M., Alzate D.F., Ramirez A.A. et al. Evaluating late blight severity in potato crops using unmanned aerial vehicles and machine learning algorithms. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. 1513 (In English). DOI: 10.3390/rs10101513.
 23. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
 24. Kurbanov R.K., Zakharova N.I., Zakharova O.M., Gorshkov D.M. Assessment of seedlings breeding winter wheat after overwintering using UAVS. *Innovations in Agriculture*. 2019. N3(32). C. 133-139 (In Russian). EDN: YYRCTL.
 25. Zhang X., Han L., Dong Y. et al. A deep learning-based approach for automated yellow rust disease detection from high-resolution hyperspectral UAV images. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. N13. 1554 (In English). DOI: 10.3390/rs11131554.
 26. Zhang B., Zhao D. An ensemble learning model for detecting soybean seedling emergence in UAV imagery. *Sensors*. 2023. Vol. 23. N15. 6662 (In English). DOI: 10.3390/s23156662.
 27. Su J., Yi D., Su B. et al. Aerial visual perception in smart farming: Field study of wheat yellow rust monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 17. N3. 2242-2249 (In English). DOI: 10.1109/TII.2020.2979237.
 28. Behmann J., Mahlein A.-K., Rumpf T. et al. A review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. *Precision Agriculture*. 2015. Vol. 16. N3. 239-260 (In English). DOI: 10.1007/s11119-014-9372-7.
 29. Mahlein A.-K., Kuska M. T., Behmann J. et al. Hyperspectral and thermal imaging of plant diseases in horticulture. *Sensors*. 2018. Vol. 18. N9. 2936 (In English). DOI: 10.3390/s18092936.
 30. Shahzaad B., Bouguettaya A., Mistry S. et al. Resilient composition of drone services for delivery. *Future Generation Computer Systems*. 2021. Vol. 115. 335-350 (In English). DOI: 10.1016/j.future.2020.09.023.
 31. Kurbanov R.K., Zakharova N.I., Gayduk O.M. Using a thermal channel (IWIR) to assess crop conditions and predict crop yields. *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2020. Vol. 67. N3(40). 87-94 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-3-87-94.
 32. Leliuhin D., Tutygin V. System for diagnosing diseases of plant leaves from photographic images obtained using UAVs. *Proceedings of Tula State University*. 2018. N2. 129-137 (In Russian). EDN: RAQZLK.
 33. Pan Q., Gao M., Wu P. et al. A deep-learning-based approach for wheat yellow rust disease recognition from unmanned aerial vehicle images. *Sensors*. 2021. 6540-6553 (In English). DOI: 10.3390/s21196540.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Мударисов С.Г. – научное руководство, концептуализация, формирование общих выводов;
Мифтахов И.Р. – поиск и анализ литературы, методология, обсуждение и анализ полученных результатов, подготовка текста статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Mudarisov S.G. – scientific supervision, conceptualization, formulation of general conclusions;
Miftakhov I.R. – literature review, methodology, discussion and analysis of the results obtained, preparation of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

02.07.2024

21.08.2024



Оценка стереокамер для цифрового мониторинга экстерьера коров

Сергей Сергеевич Юрочка,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: yssvim@yandex.ru;
Дмитрий Юрьевич Павкин,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: dimqaqa@mail.ru;

Артем Рустамович Хакимов,
младший научный сотрудник,
e-mail: arty.hv@gmail.com;
Павел Сергеевич Бердюгин,
младший научный сотрудник,
e-mail: bps71188@yandex.ru;
Савр Олегович Базаев,
кандидат сельскохозяйственных наук,
научный сотрудник,
e-mail: sbazaeff@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-76-10041, <https://rscf.ru/project/23-76-10041/>

Реферат. Отметим значительный потенциал для внедрения цифровизации в животноводстве. К актуальным направлениям использования цифровых технологий относится замена ручного сбора данных о фенотипе животных, включая линейные показатели экстерьера. В вопросе создания бесконтактной системы цифрового мониторинга экстерьера крупного рогатого скота важным элементом являются камеры, обеспечивающие точное определение расстояния до объекта. Цифровая реконструкция морфометрии тела животных с помощью бесконтактного метода измерения и автоматическое определение размеров могут эффективно решить проблемы с неточностью и субъективностью бонитёров. (*Цель исследования*) Изучить возможность использования стереокамер для измерения расстояния до объектов с необходимой точностью, а также проанализировать работу системы стереозрения в разных участках кадра. (*Материалы и методы*) В исследовании использована стереопара из двух расположенных на плате объективов 1/3-Inch CMOS OV4689 на 4 мегапикселя на расстоянии 6,3 сантиметра друг от друга. Ориентиром достаточной точности измерения расстояния принималось достижение погрешности не более 1-2 процентов (1-2 сантиметра) от расстояния до объекта (0,5-1 метра). В качестве испытательного стенда использовался размеченный лист с шагом 25 сантиметров, а сами стереокамеры выполняли съемку стенда на расстоянии от 30 до 100 сантиметров с шагом 10 сантиметров. (*Результаты и обсуждение*) В двух этапах исследования применялись две конфигурации камер: одиночная стереокамера и единый блок из трех таких камер. Результаты съемки одиночной стереокамеры показали погрешность измерений 5-10 сантиметров на расстоянии 0,3-1 метра до объекта. Для блока из трех стереокамер точность оказалась аналогичной. Определили, что в центре кадра точность выше: средняя ошибка при близких к нулю углах зрения составила 3 сантиметра. (*Выводы*) Доказали отсутствие влияния количества стереопар на точности и то, что выявленная погрешность – это предел возможностей стереозрения для данных стереопар.

Ключевые слова: корова, экстерьер, бонитировка, цифровой мониторинг, стереокамера.

■ **Для цитирования:** Юрочка С.С., Павкин Д.Ю., Хакимов А.Р., Бердюгин П.С., Базаев С.О. Оценка стереокамер для цифрового мониторинга экстерьера коров // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 34-40. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-34-40. EDN: IWEHUE.

Scientific article

Assessing Stereo Camera Applicability for Digital Monitoring of Cattle Exterior

Sergey S. Yurochka,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: yssvim@yandex.ru;
Dmitry Yu. Pavkin,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: dimqaqa@mail.ru;

Artem R. Khakimov,
junior researcher, e-mail: arty.hv@gmail.com;
Pavel S. Berdyugin,
junior researcher, e-mail: bps71188@yandex.ru;
Savr O. Bazaev,
Ph.D.(Agri), researcher, e-mail: sbazaeff@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation № 23-76-10041, <https://rscf.ru/en/project/23-76-10041/>

Abstract. The paper highlights the substantial potential for digitalization in animal husbandry. Current applications of digital technologies include replacing manual data collection on animal phenotypes, particularly linear measurements of physical traits. In creating a contactless digital monitoring system for cattle exterior traits, cameras play a crucial role, as they enable accurate distance measurement to the object. Digital reconstruction of animal body morphometry using a contactless measurement method and automated size determination can effectively address the issues with inaccuracy and subjectivity associated with traditional scoring methods. (*Research purpose*) The study aims to explore the feasibility of using stereo cameras to measure object distances with the required accuracy and to analyze the performance of the stereo vision system across different areas of the frame. (*Materials and methods*) The study used a stereo pair of two 1/3-Inch CMOS OV4689 4-megapixel lenses mounted on the board, spaced at 6.3 centimeters from each other. Accurate distance measurement was considered achieved when the error remained within 1-2 percent (1-2 centimeters) of the object's distance (0.5-1 meter). A marked sheet with 25 centimeter intervals served as a test stand, and the stereo cameras captured the stand from distances of 30 to 100 centimeters, with a 10 centimeter increments. (*Results and discussion*) The study employed two camera configurations over two stages: a single stereo camera and a block of three cameras. Filming results with the single stereo camera showed a measurement error of 5-10 centimeters at distances ranging from 0.3 to 1 meter from the object. For the three-camera block, the accuracy remained comparable. It was found that accuracy was higher at the center of the frame, with an average error of 3 centimeters at viewing angles near zero. (*Conclusions*) The study confirmed that the number of stereo pairs does not impact accuracy, and the observed error represents the accuracy limit for these stereo pairs in stereo vision applications.

Keywords: cow, exterior, grading, digital monitoring, stereo camera.

■ **For citation:** Yurochka S.S., Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., Berdyugin P.S., Bazaev S.O. Assessing stereo camera applicability for digital monitoring of cattle exterior. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 34-40 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-18-4-34-40. EDN: IWEHUE.

Использование цифровых и интеллектуальных технологий позволяет достичь высоких показателей товарного производства и улучшений в части содержания сельскохозяйственных животных [1]. Условием реализации значительного потенциала развития сельского хозяйства в России является повышение эффективности путем создания и внедрения средств автоматизации, роботизации, цифровых технологий и искусственного интеллекта [2]. Применяемые сегодня в аграрном секторе средства производства безнадежно устарели, более 50% из них находятся за пределами сроков амортизации, и эта ситуация требует обновления типов машин и оборудования [3, 4]. Не менее острая проблема в молочном скотоводстве связана с дефицитом кадров рабочих и специалистов, решить которую поможет цифровизация [5].

Приоритетами становятся создание систем мониторинга и оптимизации в области селекции и генетики животных, управления, планирования и прогнозирования. Для развития мясного и молочного животноводства необходимо повышение производительности [6]. Экстерьер относится к важным элементам общей оценки скота по комплексу признаков, поскольку связан с продуктивными и репродуктивными качествами крупного рогатого скота [7].

Сбор данных о фенотипе животных, в том числе о линейных показателях экстерьера, преимущественно проводится при обмере туловища. Оценка экстерьера с последующей обработкой информации, ее анализом и прогнозированием – долгий и сложный процесс, который часто нарушается из-за человеческого фактора [8, 9]. Традиционные методы бонитировки основаны на визуальном осмотре и ручных промеров при непосредственном контакте специалиста с животным [10]. Глазомерная и визуальная оценка экстерьера животных проводится с использованием мерной ленты и мерной палки. Точность таких методов субъективна и требует многочисленных повторений [11]. Решением проблемы служит создание интеллектуальной системы бесконтактной цифровой оценки экстерьера крупного рогатого скота с помощью видеокамер.

Использование систем видеонаблюдения открывает широкие возможности сбора и накопления информации о животном: его идентификации, местоположении, биофизиологических особенностях, хронологии жизненного цикла, а также позволяет контролировать работу персонала фермы, оценивать прием и поедание корма, приращение объема и массы, следить за моционом и поведением, проводить бонитировку, диагностику заболеваний, другие ветеринарные и профилактические мероприятия.

тия [12]. Интеграция и интерпретация сенсорной информации позволяет управлять животными благодаря мониторингу в реальном времени состояния здоровья, поведения, продуктивности, воспроизводства, воздействия на окружающую среду [13].

Бесконтактные датчики могут работать непрерывно без участия оператора, и обычно считается, что они способны с высокой точностью количественно оценивать поведение животного в рамках заранее определенного процесса, который существенно не меняется [14]. Но сами бесконтактные датчики — это лишь средство получения изображения, а для проведения цифровой бонитировки необходимы обученные нейросети.

Подходы глубокого обучения для нейросетей интенсивно развиваются, позволяя добиться точности и скорости обнаружения объектов в реальном времени, но для обучения нейросетей цифровой бонитировке животных нужны большие массивы данных [15]. Главной целью исследований в этой области ставится повышение точности обнаружения объектов на изображении, а также обеспечение быстрой работы алгоритмов в реальном времени [16].

К сожалению, фермерские и другие коммерческие организации редко публикуют такую информацию в открытом доступе [17]. В реальных условиях важные показатели параметров тела животных часто недостаточно измеряются, что отражается на организации процессов разведения, откорма и в целом на успехе точного животноводства. Цифровая реконструкция морфометрии тела с помощью бесконтактного метода измерения (2D- или 3D-изображения) и автоматическое определение размеров тела помогают эффективно преодолеть эти проблемы [18].

Достижение погрешности измерения расстояния должно составлять не более 1-2% от расстояния до объекта (1 см на расстоянии 0,5-1 м).

Цель исследования — изучить возможность использования стереокамер для измерения расстояния до объектов с необходимой точностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследование включало два этапа оценки точности стереозрения: с помощью одиночных и набора из трех стереокамер. Среди прочего ставилась цель выяснить, дает ли увеличение количества камер более высокую точность измерения расстояния до объекта. В исследовании применялись одинаковые объективы и проводились сравнения на одном и том же стенде.

Камеры. В эксперименте использовалась стереопара из расположенных на плате двух объективов 1/3-Inch CMOS OV4689 (4Мп) на расстоянии 6,3 см друг от друга. На втором этапе в целях повышения точности измерений устанавливали одновременно три такие стереопары (рис. 1).

Каждая стереокамера выводит одновременно два изображения с заранее известным смещением

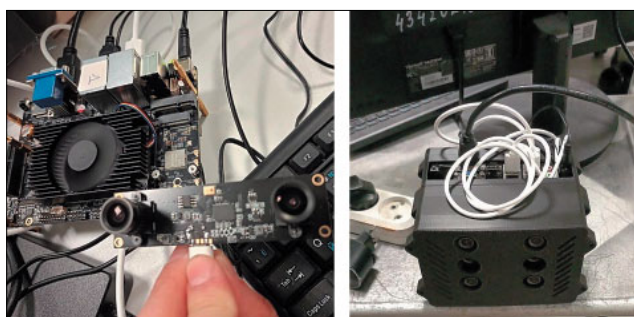


Рис. 1. Одиночная стереокамера (а) и корпус с тремя стереопарами (б) с одноплатным компьютером
Fig. 1. A single stereocamera (a) and a case with three stereo pairs (b) with a single-board computer

(рис. 2). Был выполнен анализ работы стереозрения в разных участках кадра.

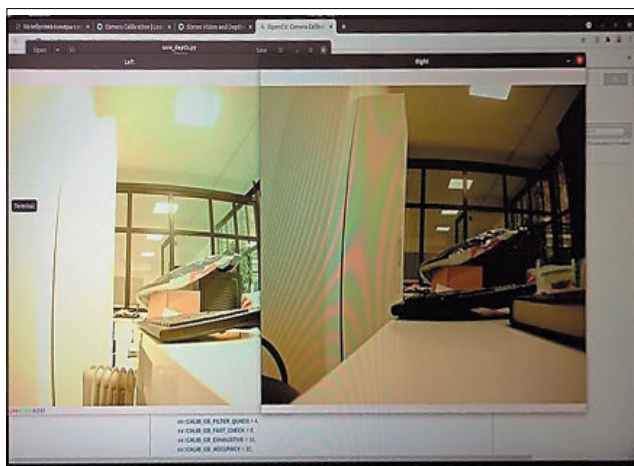


Рис. 2. Пример изображения, получаемого каждым объективом стереокамеры
Fig. 2. Example of an image captured by each lens of the stereo camera

Программное обеспечение. Реализован код на Python с использованием библиотеки OpenCV, производящий калибровку камер и после этого вычисляющий по снимкам объекта (по одному снимку каждой камерой) расстояние до них. Объект предполагается находить на снимках с помощью нейросети.

Испытательный стенд. На лист фанеры были нанесены отметки, образующие сеть с шагом 25 см, а камеры выполняли съемку стенда на расстоянии от 30 до 100 см с интервалом 10 см (рис. 3). Ставилась задача вычисления пространственных координат отметок на стенде.

Калибровка. В качестве шаблона для калибровки одиночной стереокамеры использовалось распечатанное на принтере изображение черно-белой шахматной доски 10×10 клеток со стороной 1 см, приклеенное на ровную деревянную поверхность. Было сделано 50 снимков шаблона в различных ра-

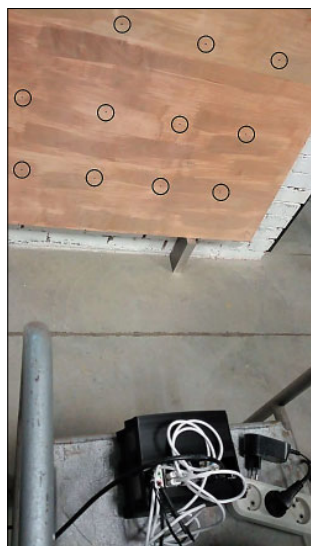


Рис. 3. Съемка стенда стереокамерами. Черные точки на стенде – отметки, координаты которых необходимо найти (выделены кружками)

Fig. 3. Imaging of the stand using stereo cameras. The black dots on the stand are marks whose coordinates need to be determined (highlighted with circles)

курсах на расстоянии до 0,5 м таким образом, что доска занимала большую часть кадра. Аналогично в опытах с тремя стереопарами было сделано по 100 снимков шаблона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На первом этапе изучали точность определения стереокамерой координат по трем осям x , y , z . Для визуальной оценки погрешность определения координат в зависимости от угла зрения представлена разноцветными точками: синие точки – ошибка до 10 см, оранжевые – от 10 до 20 см, зеленые – от 20 до 30 см, красные – от 30 до 40 см, фиолетовые – от 40 до 50 см, коричневые – от 50 до 60 см. Точность определения z -координаты представлена на рисунке 4, на осях графика – углы зрения по обеим координатам в градусах.

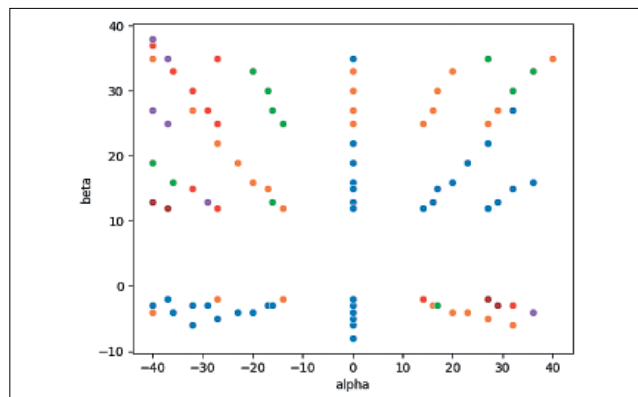


Рис. 4. Точность определения z -координаты в зависимости от угла зрения

Fig. 4. Accuracy of determining z -coordinate depending on the viewing angle

Видно, что стереозрение дает очень плохой и хаотичный результат в правом нижнем углу. Вероятно, это связано с дефектами недорогой оптики объективов стереопары, вследствие чего при калибровке не удалось полностью исправить кривизну кадра в данной области. В остальных частях снимка точность плавно снижается при удалении от центра кадра, причем видна четкая взаимосвязь между углами зрения и точностью. В связи с этим корректировку проводили по углам зрения. Следует отметить, что на практике настоящие углы зрения будут неизвестны, и можно опираться только на данные, которые предоставляет стереозрение. В данном исследовании оказалось, что расхождение между измеренными и фактическими углами зрения невелико и очень хорошо поддается линейной корректировке (рис. 5).

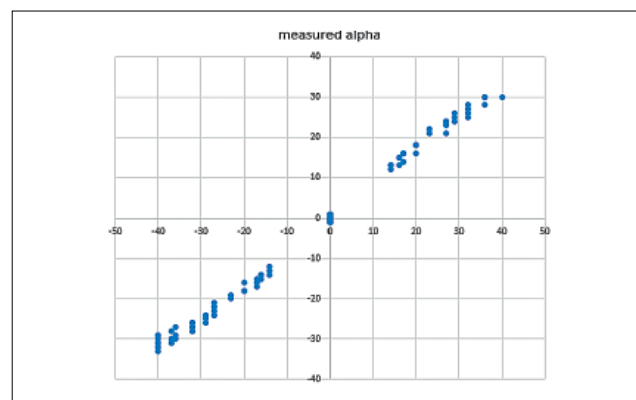


Рис. 5. Корректировка значений

Fig. 5. Value adjustment

Следующий шаг после корректировки углов зрения – выбор координаты, которая измеряется точнее всего, с целью ее линейной корректировки для достижения максимально точного результата. Далее по ней, используя полученные ранее углы зрения, можно восстановить две остальные координаты.

Оказалось, что наиболее точно стереозрение дает y -координату; ошибка по ней фактически представляла собой просто сдвиг на 5 см. После линейной корректировки средняя ошибка по y -координате составила 1,5 см. Теперь можно восстановить x и z -координаты. Несмотря на плохое качество изображения правого нижнего угла кадра (рис. 6), точность очень существенно повысилась. Синие точки – ошибка до 10 см, оранжевые – от 10 до 20 см, зеленые – от 20 до 30 см, красные – от 30 до 40 см.

Средняя ошибка составила 7 см, разброс 5 см. Таким образом, проводя измерение с учетом корректировки, можно рассчитывать, что ошибка будет в пределах 5-10 см. Отмечено, что в центре кадра точность выше: средняя ошибка при близких к нулю углах зрения составила 3 см, и ошибка по координате x составила 3 см.

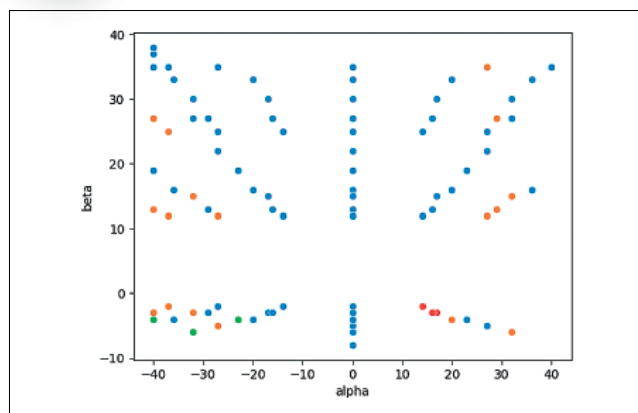


Рис. 6. Точность определения z-координаты в зависимости от угла зрения после корректировки

Fig. 6. Accuracy of determining z-coordinate depending on the viewing angle after correction

На основании испытаний одиночной стереокамеры можно сделать вывод, что данная реализация стереозрения после корректировки на большей части кадра может обеспечивать точность измерений 5-10 см на расстоянии 0,3-1 м до объекта, т.е. ниже, чем у *TOF*-камеры (1-2 см). Возможно, результат улучшится, если установить более качественные объективы с качественной оптикой, но из-за существенного повышения стоимости использовать такое оборудование будет экономически нецелесообразным по сравнению с *TOF*-камерой.

В качестве альтернативы для дальнейшего увеличения точности был проверен вариант дублирования стереопар. Предполагалось, что одновременное получение изображения с трех стереопар, идентичных используемой на первом этапе исследования, может улучшить точность измерений до 1-2 см и при этом реализуемо на одном однопланном компьютере.

На втором этапе эксперимента выявлены области кадра с существенно более высокой ошибкой, чем в соседних областях, и/или с не поддающимися интерпретации результатами измерений. Данное явление могло быть вызвано дисторсиями бюджетной оптики объективов. Измерения в этих областях были исключены из дальнейшего исследования как непригодные для обработки и корректировки. Пример крайне высокой ошибки представлен на рисунке 7.

Результаты показали более высокую точность определения координат x и y , но меньшую точность в отношении координаты z . Как и на предыдущем этапе, за основу корректировки были выбраны углы зрения. После этого проводилась корректировка координаты y ; исходя из ее результатов и откорректированных углов зрения вычислялись координаты x и z . В координате z (четко зависевшей от углов зрения) была выявлена систематическая ошибка и ис-

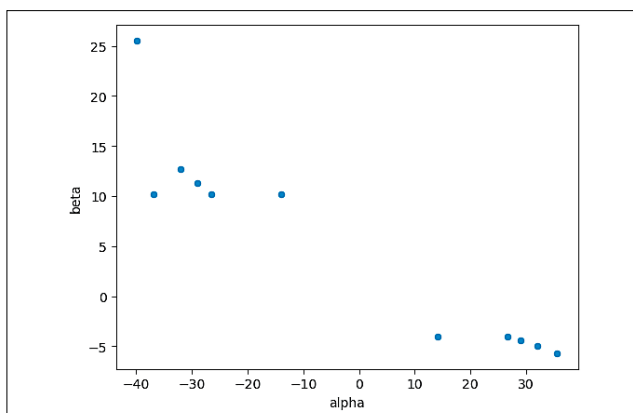


Рис. 7. Области кадра с крайне высокой ошибкой

Fig. 7. Areas of the frame with extremely high error

правлена с помощью дополнительной корректировки.

Итоговая корректировка была усреднена по всем трем стереопарам для повышения точности. Результат представлен на рисунке 8. Синие точки – ошибка до 4 см, оранжевые – от 4 до 8 см, зеленые – от 8 до 12, красные – от 12 до 16, фиолетовые – более 16 см. Область кадра с высокой ошибкой исключена.

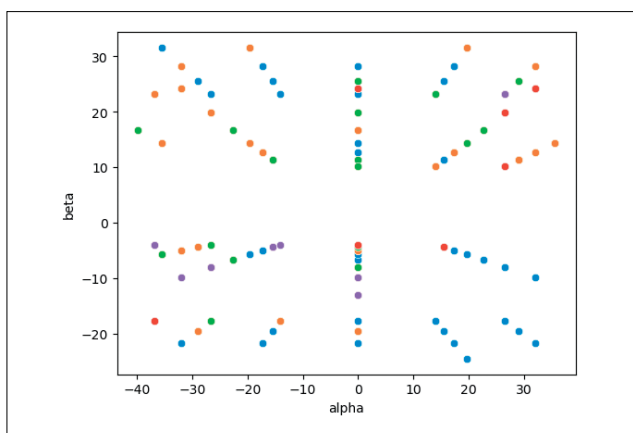


Рис. 8. Точность определения z-координаты в зависимости от угла зрения после корректировки

Fig. 8. Accuracy of determining z-coordinate depending on the viewing angle after correction

Оценив итоговые результаты, мы пришли к выводу, что если до дополнительной корректировки прослеживалась четкая зависимость точности от расстояния до центра кадра, то после нее точки с различной достоверностью имеются во всех частях кадра, и дальнейшая корректировка будет мало полезной.

Средняя ошибка составила 7 см, разброс 5 см. Таким образом, проводя измерение, с учетом корректировки можно рассчитывать, что ошибка будет в пределах 5-10 см.

Выводы. По результатам двух этапов исследования определено, что существующая ошибка 5-10 см на 1 м расстояния практически одинакова для

одинокных и строенных стереокамер. Можно сделать вывод, что данная точность – это предел возможностей стереозрения выбранного для эксперимента оборудования. Возможно улучшение результата в случае более качественных объективов с качественной оптикой, но данное требование серьезно повышает стоимость оборудования, делая

его использование экономически нецелесообразным по сравнению с *TOF*-камерой.

Таким образом, использование стереозрения в задачах, требующих точности измерений 1-2 см на расстоянии 1 м, представляется нецелесообразным. Однако если выявленная погрешность допустима, такое решение будет дешевле по сравнению с *TOF*-камерой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ценч Ю.С. Научно-технический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
2. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
3. Кирсанов В.В., Владимиров Ф.Е., Павкин Д.Ю. и др. Сравнительный анализ и подбор систем мониторинга здоровья КРС // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2019. N1(33). 27-31. EDN: ZAIQZN.
4. Anderson D.M., Estell R.E., Cibils A.F. Spatiotemporal cattle data – a plea for protocol standardization. *Positioning*. 2013. N4. 115-136. DOI: 10.4236/pos.2013.41012.
5. Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Владимиров Ф.Е. и др. Температура и уровень pH рубца КРС как показатели вероятности репродуктивного успеха // *Вестник НГИЭИ*. 2019. N6(97). С. 117-126. EDN: IURGBX.
6. Alem H. The role of technical efficiency achieving sustainable development: A dynamic analysis of Norwegian dairy farms. *Sustainability*. 2021. N13(4). 1841. DOI: 10.3390/su13041841.
7. Батанов С.Д., Баранова И.А., Старостина О.С. Модель прогнозирования молочной продуктивности коров по их экстерьерным особенностям // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2019. N1 (49). С. 55-62. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-49-1-55-62.
8. Харченко А.В., Фейзуллаев Ф.Р., Лепёхина Т.В. Экстерьерные особенности казахской белоголовой породы крупного рогатого скота // *Инновационная наука*. 2022. N6(1). С. 62-64. EDN: HCHSJB.
9. Чиндалиев А.Е., Калимолдинова А.С., Алипов А.У., Баймуханов А.Д. Использование линейной оценки экстерьера коров // *Главный зоотехник*. 2019. N8. С. 32-38. EDN: HYCFXA.
10. Ситдииков Ф.Ф., Цой Ю.А., Зиганшин Б.Г. Основные направления и проблемы цифровизации агропромышленного комплекса // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3. С. 112-115. DOI: 10.12737/article_5db97473887137.67106533.
11. Shi Ch., Zhang J., Teng G. Mobile measuring system based on LabVIEW for pigbody components estimation in a large-scale farm. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N156. 399-405. DOI: 10.1016/j.compag.2018.11.042.
12. Королев В.А., Башилов А.М. Видеоцифровое системно-метрическое управление агротехнологическими процессами // *Вестник аграрной науки Дона*. 2019. N4(48). С. 68-75. EDN: VSYVCN.
13. Buller H., Blokhuis H., Lokhorst K. et al. Animal welfare management in a digital world. *Animals*. 2020. N10. 1779. DOI: 10.3390/ani10101779.
14. Xue T., Qiao Y., Kong H. et al. One-shot learning-based animal video segmentation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 18. N6. 3799-3807. DOI: 10.1109/TII.2021.3117020.
15. Власенкова Т.А., Козырева Ю.Ю. Цифровизация как основа эффективного ведения сельского хозяйства // *Менеджмент в АПК*. 2021. N2. С. 11-16. DOI: 10.35244/2782-3776-2021-1-2-11-16.
16. Zhengxia Z., Zhenwei S., Yuhong G., Jieping Y. Object detection in 20 years: a survey. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. 1905.05055v2. DOI: 10.48550/arXiv.1905.05055.
17. Jones J.W., Antle J.M., Basso B. et al. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*. 2017. N155. 269-288. DOI: 10.1016/j.agry.2016.09.021.
18. Qiao Y., Kong H., Clark C. et al. Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: a review. *Animals*. 2021. N11. 3033. DOI: 10.3390/ani11113033.

REFERENCES

1. Tsench Yu.S. Scientific and technological potential as the main factor for agricultural mechanization development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. T. 16. N2. С. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
2. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. T. 15. N4. С. 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
3. Kirsanov V.V., Vladimirov F.E., Pavkin D. Yu. et al. The cattle health monitoring systems' comparative analysis and selection. *Journal of VNIIMZH*. 2019. N1(33). 27-31 (In Russian). EDN: ZAIQZN.

4. Anderson D.M., Estell R.E., Cibils A.F. Spatiotemporal cattle data — a plea for protocol standardization. *Positioning*. 2013. N4. 115–136. (In English). DOI: 10.4236/pos.2013.41012.
5. Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Vladimirov F.E. et al. Temperature and pH level of the rumen as indicators of the probability of reproductive success. *Bulletin NGIEI*. 2019. N6 (97). 117–126 (In Russian). EDN: IURGBX.
6. Alem H. The role of technical efficiency achieving sustainable development: A dynamican analysis of Norwegian dairy farms. *Sustainability*. 2021/ N13(4):1841 (In English). DOI: 10.3390/su13041841.
7. Batanov S., Baranova I., Starostina O. Prediction model for milk production of cows by their exterior features. *Vestnik BSAU*. 2019. N1. 55-62 (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2019-49-1-55-62.
8. Kharchenko A.V., Feyzullaev F.R., Lepekhina T.V. The exterior features of the Kazakh white-headed cattle. *Innovation science*. 2022. N6(1). 62-64 (In Russian). EDN: HCHSJB.
9. Chindaliev A.E., Kalimoldinova A.S., Alipov A.U., Baimukanov A.D. The use of linear evaluation of body conformation of cows. *Head of Animal Breeding*. 2019. N8. 32-38 (In Russian). EDN: HYCFXA.
10. Sitdikov F.F., Tsoy Yu.A., Ziganshin B.G. Main directions and problems of digitalization of agricultural complex. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2019. Vol. 14. N3(54). 112-115 (In Russian). DOI: 10.12737/article5db97473887137.67106533.
11. Shi Ch., Zhang J., Teng G. Mobile measuring system based on LabVIEW for pig body components estimation in a large-scale farm. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N156. 399-405 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2018.11.042.
12. Korolev V.A., Bashilov A.M. Video-digital system-metric management of agrotechnological processes. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2019. N4(48). 68-75 (In Russian). EDN: VSYVCN.
13. Buller H., Blokhuis H., Lokhorst K. et al. Animal welfare management in a digital world. *Animals*. 2020. N10. 1779 (In English). DOI: 10.3390/ani10101779.
14. Xue T., Qiao Y., Kong H. et al. One-shot learning-based animal video segmentation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 18. N6. 3799-3807 (In English). DOI: 10.1109/TII.2021.3117020.
15. Vlasenkova T.A., Kozyreva Yu.Yu. Digitalization as a basis for efficient agriculture. Management in Agriculture. 2021. N2. 11-16. (In Russian). DOI: 10.35244/2782-3776-2021-1-2-11-16.
16. Zhengxia Z., Zhenwei S., Yuhong G., Jieping Y. Object detection in 20 years: a survey. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. 1905.05055v2. (In English). DOI: 0.48550/arXiv.1905.05055.
17. Jones J.W., Antle J.M., Basso B. et al. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*. 2017. 155. 269-288 (In English). DOI: 10.1016/j.agry.2016.09.021.
18. Qiao Y., Kong H., Clark C. et al. Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: a review. *Animals*. 2021. N11. 3033 (In English). DOI: 10.3390/ani11113033.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Юрочка С.С. – формулирование основных направлений исследования, проведение экспериментального исследования, формирование текста;
Павкин Д.Ю. – научное консультирование, формирование текста;
Хакимов А.Р. – литературный анализ, обработка результатов исследования, формирование текста;
Бердюгин П.С. – проведение экспериментального исследования, формирование текста;
Базаев С.О. – обработка результатов исследования, доработка текста.

Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Yurochka S.S. – formulation of main research directions, experimental research, manuscript drafting;
Pavkin D.Yu. – scientific consulting, manuscript drafting;
Khakimov A.R. – literature review, research data, manuscript drafting;
Berdyugin P.S. – experimental research, manuscript drafting;
Bazaev S.O. – data processing, 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

28.09.2024
30.10.2024

EDN: KHLEYY

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-41-48

Научная статья
УДК 631.31

Способ увеличения площади травостоя на горных кормовых угодьях

Сергей Игоревич Бидеев,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: biser0@yandex.ru;

Людмила Романовна Гулуева,
научный сотрудник,
e-mail: luda_gulueva@mail.ru

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства
Владикавказского научного центра РАН, Республика Северная Осетия–Алания, Российская Федерация

Реферат. Показали, что до 60 процентов площади горных лугопастбищных участков засорены камнями. Отметим, что освобождение пастбищ от камней способствует увеличению площади кормовых угодий и снижению травматизма животных. Выявили отсутствие малогабаритных агрегатов, способных удалять камни со склоновых территорий. (*Цель исследования*) Разработать и изготовить лабораторный образец агрегата на базе минитрактора Feng Shou 180 для удаления камней с поверхности склонов. Агрегат предназначен для ускоренного восстановления непригодных для использования в животноводстве горных участков и повышения устойчивости почвы к водной и ветровой эрозии. (*Материалы и методы*) Обосновали технологию и создали лабораторный образец агрегата для удаления камней. Испытания проводились в горной зоне Республики Северная Осетия–Алания на высоте 1540 метров над уровнем моря. Камни удаляли на участке северного склона крутизной 13 градусов в селе Даргавс. Техническая экспертиза, стендовые и полевые испытания агрегата проведены согласно агротехническим требованиям и техническому заданию. (*Результаты и обсуждение*) Изготовили лабораторный образец агрегата для удаления камней на базе мини-трактора Feng Shou 180. Установили, что лабораторный образец агрегата соответствует агротехническим требованиям и техническому заданию. Выявили, что происходит удаление камней диаметром более 30 миллиметров на 91-93 процентов, и на первый год после применения агрегата повышается продуктивность кормовых угодий на 90-95 процентов. (*Выводы*) Применение агрегата на горных склонах позволяет увеличить полезную площадь, улучшить водно-воздушный и питательный режимы, изменить видовой состав растительности (увеличить бобовый компонент до 16,7 процента, злаковый до 47,3 процента). Сделан вывод о целесообразности совершенствования и применения опытного образца на засоренных кормовых угодьях с уклоном до 13 градусов.

Ключевые слова: животноводство, луговое кормопроизводство, горные склоны, удаление камней, мини-трактор, видовой состав растительности, улучшение почвы.

■ **Для цитирования:** Бидеев С.И., Гулуева Л.Р. Способ увеличения площади травостоя горных кормовых угодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 41-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-41-48. EDN: KHLEYY.

Scientific article

A method of Increasing the Area of the Herbage on Mountain Forage Lands

Sergei I. Bideev,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: biser0@yandex.ru;

Lyudmila R. Gulueva,
researcher,
e-mail: luda_gulueva@mail.ru

North Caucasian Research Institute of Mining and Piedmont Agriculture of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Republic of North Ossetia–Alania, Russian Federation

Abstract. The present study reveals that up to 60 percent of mountain grasslands are strewn with stones. Their removal can significantly expand forage land and decrease animal injuries. It has been found out that there are no small-sized units capable of removing stones on sloped terrains. (*Research purpose*) The research aims to develop and construct a laboratory prototype of a stone removal unit adapted to the Feng Shou 180 mini-tractor, specifically for use on slopes. This unit is intended to facilitate the rehabilitation of mountain regions that are otherwise unsuitable for livestock farming, and enhance soil resistance to both water and wind erosion. (*Materials and methods*) The technology has been substantiated and the unit prototype has been constructed.

The tests were conducted in the mountainous area of the Republic of North Ossetia–Alania, at an altitude of 1540 meters above sea level. The stones were removed from a section of the northern slope with a steepness of 13 degrees in the village of Dargavs. Technical expertise, bench and field tests of the unit were performed in accordance with agrotechnical standards and technical specifications. (*Results and discussion*) As a result a laboratory prototype of a stone removal unit adapted to the Feng Shou 180 mini-tractor was produced. It is determined that the laboratory prototype meets the agrotechnical standards and technical specifications. The unit proves to effectively remove stones larger than 30 millimeters with an efficiency rate of 91-93 percent. Additionally, it has been demonstrated that the first year of using the unit results in a 90-95 percent increase in the productivity of forage lands. (*Conclusions*) The use of this unit on mountain slopes significantly enhances the usable area and improves the water-air and nutrient regimes. This adjustment also alters the species composition of the vegetation, increasing the legume component to 16.7 percent and the cereal component to 47.3 percent. Our findings underscore the potential benefits and feasibility of further developing and deploying this prototype on densely stoned forage lands with slopes of up to 13 degrees.

Keywords: livestock farming, meadow forage production, mountain slopes, stone removal equipment, mini-tractor, species composition of vegetation, soil reclamation.

■ **For citation:** Bideev S.I., Gulueva L.R. A method of increasing the area of the herbage on mountain forage lands. *Agricultural machinery and technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 41-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-41-48. EDN: KHLEY

Разрушение горных склонов в результате происходящих почвенно-климатических процессов и сбивания скальных пород копытами животных приводит к засорению почвы лугов и пастбищ камнями [1]. По этой причине значительно затрудняется применение средств механизации и сельскохозяйственной техники [2]. Повышенные усилия и нагрузки на орудия при проведении работ на таких территориях провоцируют преждевременный износ и выход из строя машин и устройств, их ремонт иногда занимает 60% времени рабочей смены. Эксплуатация серийных камнеуборочных машин усложнена из-за сложного рельефа [3, 4].

В почве пахотных полей и пастбищ наиболее часто встречаются камни размером от 50 до 300 мм. При засоренности камнями площади поля порядка 125 м² (10 м³/га) потери зерновых составляют около 0,2 ц/га, а при количестве камней 25 м³/га (570 м³) недобор урожая приближается к 1 ц/га [5]. Одновременно снижается эффективность химических способов борьбы с сорняками, ростки которых скрыты камнями. Вместе с тем собранные камни представляют собой ценный строительный материал [6].

На отечественном рынке предлагается выбор сельскохозяйственной техники различного назначения, в том числе для освоения и восстановления земельных угодий, применение которых из-за каменистой почвы затруднено [7].

Например, машина РУБ-150 с универсальной рамой РУ-0,6А для крепления рабочего органа способна извлекать камни с глубины до 50 см. Для мелких камней применяют навесную машину УСК-0,7. После вспашки может применяться прицепное устройство УПК-0,6, хотя его конструкция громоздкая для работы на горных склонах, а зубья при заглублении в почву разрушают дерновый покров [8]. Подборщик ПВК-1,5 собирает камни из предвари-

тельно сформированного валка и транспортирует их в бункер. Более распространен вариант подачи камней в бункер с помощью ротора с подпружиненными гребенками, в частности подборщик «Валун-700». Подобные машины с заглаживающими гребенками для предохранения рабочего оборудования от поломок при контакте с полускрытыми камнями предлагают и зарубежные фирмы [9].

Однако серийных машин для извлечения более мелких камней пока нет. Например, КУМ-1,25 на базе трактора МТЗ вычесывает из почвы камни размером от 11 до 70 см со скоростью операции всего лишь 1,25 км/ч. При ширине захвата основного камнеуборочного узла не менее 5 м камни можно убрать из пахотного слоя не глубже 5 см, вынося вместе с камнями 5% почвы. Такие машины из-за своих габаритов и веса подходят для работы на равнинных полях, а не на мелкоконтурных участках со склонами 13-16°. Кроме того, они повреждают дернину, что нежелательно на лугопастбищных участках, где глубина почвенного слоя иногда не превышает 35-50 см.

Сотрудниками группы механизации Северо-Кавказского НИИ горного и предгорного сельского хозяйства был предложен двухфазный способ уборки камней. Для вычесывания и сгребания камней в валки создан лабораторный образец валкователя грабельного типа. Агрегат состоит из двух граблей длиной по 6 м, расположенных друг к другу под углом 50° по ходу движения и опирающихся на три регулируемые колеса, за счет чего машина хорошо копирует поверхность поля и степень удаления камней достаточно высокая. Заглубленные в почву зубья с двух сторон агрегата образуют валки из камней и частично комков почвы. При этом земля, проходя между зубьями, не попадает в валки и в основном остается на поле.

С увеличением глубины хода рабочих органов можно собрать больше камней. Однако также увеличится количество сгребаемой в валки почвы, часть которой не успевает пройти между зубьями. Просеиванию почвы через валкователь препятствуют как камни, так и крупные комки грунта. С увеличением глубины хода рабочих органов с 10 до 15 см сгруживание почвы в валки повышается почти в 3 раза, и хотя сбор камней изменяется незначительно, энергозатраты резко возрастают. По этим причинам при выборе способа сгребания камней в горной зоне предпочтительны устройства, в которых предусмотрен зазор между рабочим органом и поверхностью пастбища.

Собранные с полосы шириной 5 м камни убирают камнеуборочной машиной КУМ-1,2 и переоборудованным картофелекопателем-погрузчиком Е-684. Оптимальная скорость движения такого агрегата (валкователь + КУМ-1,2 + Е-684) составляет 4-5 км/ч, глубина хода рабочих органов 10 см, ширина валка по основанию не более 1,2 м, межцентровое расстояние зубьев 100 мм, диаметр зубьев 40 мм.

Изучение технических характеристик машин по литературным источникам показало, что приведенные выше камнеуборочные устройства и приспособления пригодны на равнинных землях [10, 11]. В горной местности следует избегать повреждения дернового слоя почвы. Учитывая габариты, вес и негативные последствия применения существующих камнеуборочных машин, а также агротехнические требования к обработке пастбищных земель, пришли к выводу о необходимости использования на горных участках малогабаритной камнеуборочной машины.

Цель исследования: разработать и изготовить образец навесного малогабаритного агрегата для сбора камней размером более 30 мм с пастбищ уклоном до 13° без повреждения почвенного покрова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. По разработанному авторами эскизному проекту изготовлен опытный образец навесного камнеуборочного агрегата (рис. 1) на базе мини-трактора *Feng Shou 180*. Проведена техническая экспертиза образца согласно ГОСТ 20915 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний».

Предусматривалось, что при небольшой ширине захвата (не более 2 м) и без заглубляющихся в почву зубьев рабочий орган (гребенка) будет сдвигать с места камни диаметром более 50 мм. Свободно скатывающиеся по склону камни можно будет собрать в определенном месте [12].

Агрегат и предложенную технологию удаления камней испытывали в 2020 и 2022 г. на изреженных участках северного склона крутизной 13° на высоте 1540 м над уровнем моря в селе Даргавс (Северная Осетия). Машина перемещалась вниз по паст-



Рис. 1. Навесной камнеуборочный агрегат

Fig. 1. Mounted stone removal unit

бищу справа налево. На склоне нарезан специальный канал для сбора сдвинутых с места и скатывающихся камней, образующих естественный предотвращающий деградацию почвы барьер. Глубина канала должна быть небольшой (20-25 см), так как в верхнем поясе горизонт почвы составляет 35-40 см, а ниже по склону глубина грунта увеличивается до 45-50 см. Размер канала выбирается также в зависимости от ширины захвата корпуса плуга, но не более 35 см, исходя из особенностей горного агроландшафта [13].

Камни размером менее 50 мм, пропущенные гребенкой и оставшиеся на поверхности участка, не влияют на качество работы сельскохозяйственной техники и не травмируют животных.

Техническая характеристика агрегата

Ширина захвата, м	2,0-2,4
Скорость движения, км/ч	5-7
Угол поворота отвала	0-35°
Размеры удаляемых камней, мм	60-200
Глубина канала, мм, не менее	150
Ширина канала, мм	350
Крутизна склона, не более	13°
Дорожный просвет, мм, не менее	400
Вес устройства (без трактора)	770
Габаритные размеры, мм (без трактора)	2000×2500×1200

Для качественной работы и снижения веса камнеуборочного устройства его размеры, точнее высота, должны быть такой, чтобы камни не пересыпались через верх гребенки и не накапливались перед ней. Высота гребенки в зависимости от ширины захвата и количества камней на поле:

$$h = \sqrt{\frac{6S_{\max} \cdot B \cdot L}{B_1 \rho_{\text{кам}}}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где $S_{\max}$ – засоренность камнями, кг/м²; B – ширина захвата гребенки, м; L – пройденный путь, м; B_1 – конструктивная ширина гребенки, м; $\rho_{\text{кам}}$ – удельный вес камней, кг/м³.

Согласно расчетам и конструктивным особенностям выбраны длина отвала 2-2,4 м, его высота 30-35 см, радиус закругления 300 мм (часть трубы диаметром 600 мм) [14, 15]. Угол установки отвала

к направлению движения агрегата φ (захват отвала) и уклон склона $k_{укл}$ (уклон) учитываются при расчетах производительности и сопротивления движению (Алтунина М.С. Рабочие процессы, конструкции и основы расчета транспортных и технологических машин и оборудования. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ). 2015. 36 с.).

Производительность отвала агрегата при перемещении камней

$$P = (3600V_{пир} \cdot k_v \cdot k_{укл}) / (T_{ц} \cdot K_p), \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где $V_{пир}$ – объем пирамиды волочения камней, м^3 ; k_v – коэффициент использования агрегата по времени, равен 0,8-0,9; $k_{укл}$ – коэффициент, учитывающий влияние уклона местности (табл. 1); $T_{ц}$ – длительность цикла, с; K_p – коэффициент разрыхления грунта, равен 1,15-1,3.

Таблица 1		Table 1
ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АГРЕГАТА THE INFLUENCE OF TERRAIN TYPES ON THE UNIT OPERATIONAL PERFORMANCE		
Крутизна склона	Коэффициент $k_{укл}$	
	на подъеме	на склоне
0-5°	1,00-0,67	1,00-1,33
5-10°	0,67-0,50	1,33-1,94
10-15°	0,50-0,40	1,94-2,25
15-20°	-	2,25-2,68

Необходимая мощность двигателя базовой машины

$$N = (W \cdot v) / 1000\eta, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где W – максимальное сопротивление при работе машины, Н; v – рабочая скорость движения агрегата, км/ч; η – механический КПД машины, $\eta = 0,7-0,8$.

Максимальное сопротивление, возникающее при работе поворотного отвала

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5, \text{ Н}, \quad (4)$$

где W_1 – сопротивление грунта резанию; W_2 – сопротивление перемещению камней вверх по отвалу; W_3 – сопротивление перемещению грунта и камней перед отвалом; W_4 – сопротивление перемещению камней вдоль отвала, т.е. в сторону; W_5 – сопротивление перемещению агрегата как тежки.

Сопротивление почвы при сдвиге камней

$$W_1 = k_0 \cdot L \cdot h \cdot \sin\varphi, \quad (5)$$

где k_0 – удельное сопротивление грунта и камней лобовому сдвигу, $\text{Н}/\text{м}^2$; $k_0 = 65-400$; φ – угол захвата отвала (между осью движения машины и линией направления отвала), град; $\varphi = 60$, при сдвиге поворотным отвалом $\varphi = 50-60$.

$$W_1 = 210 \cdot 2 \cdot 0,3 \cdot \sin 60 = 108,4 \text{ Н}.$$

Сопротивление от перемещения камней с землей вверх по отвалу

$$W_2 = G_{пир} \cdot f_1 \cdot \cos^2\delta \cdot \sin\varphi, \quad (6)$$

где $G_{пир}$ – вес камней в пирамиде волочения, Н; f_1 – коэффициент трения камней по металлу, $f_1 = 0,35-0,8$; δ – угол резания, град.

Вес пирамиды волочения

$$G_{пир} = V_{пир} \cdot \delta_0 \quad (7)$$

где $V_{пир}$ – объем пирамиды, м^3 ; δ_0 – объемный вес перемещаемого материала, $\text{Н}/\text{м}^3$, $\delta_0 = 1500-1950 \text{ Н}/\text{м}^3$.

$$V_{пир} = (S_{осн} \cdot H) / 3 = (0,5 \cdot h^2 \cdot B_1) / 3; \quad (8)$$

$$V_{пир} = (0,5 \cdot 0,322 \cdot 2) / 3 = 0,03 \text{ м}^3,$$

$$G_{пир} = 0,03 \cdot 1600 = 48 \text{ Н}.$$

Таким образом

$$W_2 = 48 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot \sin 60 = 20,64 \text{ Н}.$$

Сопротивление от перемещения призмы волочения камней и грунта перед отвалом с учетом коэффициента трения грунта о грунт f_2 , равного 0,55-0,8:

$$W_3 = G_{пир} \cdot f_2 \cdot \sin\varphi; \quad (9)$$

$$W_3 = 48 \cdot 0,65 \cdot \sin 60 = 26,8 \text{ Н}.$$

В процессе перемещения масса волочения камней прижимается к отвалу силой

$$W_3' = G_{пир} \cdot f_2, \quad (10)$$

и ввиду ее действия при перемещении массы камней вдоль поверхности отвала развиваются силы трения [16, 17].

Проекция сил трения на ось, совпадающую с направлением движения, представляет собой сопротивление перемещения грунта в сторону

$$W_4 = G_{пир} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \cos\varphi; \quad (11)$$

$$W_4 = 48 \cdot 0,5 \cdot 0,65 \cdot 0,5 = 7,8 \text{ Н}.$$

Сопротивление перемещению агрегата с учетом его веса G , коэффициента f_3 сопротивления движению агрегата по полю ($f_3 = 0,1$) и уклона пути i , равного тангенсу угла склона ($\text{tg} 13 = 0,231$), рассчитан по формуле:

$$W_5 = G (f_3 + i); \quad (12)$$

$$W_5 = 1550 \cdot 9,81 \cdot (0,1 + 0,231) = 5033 \text{ Н}.$$

Агрегат находится в движении без буксования при условии, что сцепная сила тяги больше общего сопротивления передвижению агрегата, т.е. $W_{сч} > W$.

$$W = 108,4 + 20,64 + 26,8 + 7,8 + 5033 =$$

$$= 5196,6 \text{ Н};$$

$$W_{сч} = G \cdot k_{сч}, \quad (13)$$

где $k_{\text{сц}}$ – коэффициент сцепления агрегата с опорной поверхностью, $k_{\text{сц}} = 0,7-0,9$.

$$W_{\text{сц}} = 1550 \cdot 9,81 \cdot 0,8 = 12164,4 \text{ Н},$$

т.е. $12164,4 > 5196,6$.

Освобождение от камней без дополнительных затрат на их вывоз обеспечит увеличение полезной площади склона [18, 19]. Большее количество травостоя будет способствовать улучшению водно-воздушного баланса почвы, повышению урожайности (Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. Саратов: Амирит, 2019. 252 с.).

В 2020 г. опытные исследования и испытания агрегата в комплексе с трактором МТЗ-82 проводили на участке площадью 8760 м², частично покрытом мелкими и средними камнями и разделенном на три участка по 2920 м². На каждом участке были выделены по три опытные делянки (варианта) размером 973 м² с разделительными полосами шириной 2 м. Из девяти делянок, согласно схеме опыта, варианты 2, 5 и 8 были контрольными (их не обрабатывали). Удаление камней, увеличение полезной площади делянок для развития и роста кормовых растений в среднем от 37,2 до 52%, подкормка органическим удобрением, создание условий для влагозадержания в траншеях с собранными камнями способствовали прибавке урожая от 0,16 до 0,49 т по сравнению с контролем. За счет равномерного распределения удобрения по пастбищному участку кислотность почвы снизилась с 4,8 до 5,1 ед. рН.

Согласно техническим характеристикам масса трактора МТЗ-82 составляет 3750 кг, давление на грунт 144-174 кПа, радиус разворота 4-4,5 м. В связи с тем, что склоновые участки мелкоконтурные, а горизонт почвы составляет всего 35-50 см в зависимости от расположения участка, нагрузку на почву по возможности нужно уменьшать.

Весной 2022 г. проводились испытания камнеуборочного агрегата на базе малогабаритного трактора *Feng Shou 180* с конструкционной массой около 900 кг, радиусом разворота 2,3 м, соответственно давлением на грунт 35-44 кПа. Участки выбирались аналогичные делянкам в 2020 г., частично покрытые мелкими и средними камнями и разделенные на три равнозначных части. Агрегат последовательно проходил делянки по схеме: 1→3→4→6→7→9, минуя контрольные 2, 5 и 8 варианты. Объем камней, сдвинутых с места и собранных в валки до утилизации, составил соответственно 1,9; 2,6; 3,0; 3,6; 4,8 и 5,3 м³.

Размер очищенного от камней поля подсчитывали до и после прохода агрегата. После расчистки участков от камней для повышения эффективности кормопроизводства на пастбище рекомендуется производить подсев семян трав (Патент RU 2415538) [20].

Опыты и анализ кормов на делянках проводились согласно действующим методикам (Кутузова А.А., Трофимова Л.С., Проворная Е.Е. Методика оценки потоков энергии в луговых агроэкосистемах. М.: Угрешская типография, 2015. 32 с.).

Одновременно со сгребанием камней агрегат равномерно распределяет по пастбищу оставшиеся после прохода животных экскременты (навозные кучи). Для этого предусмотрен зазор 50 мм между лемехом рабочего органа и поверхностью участка. Обогащение почвы натуральными органическими веществами стимулирует рост кормовых трав. В ходе наблюдений подтверждена прямая зависимость изменения питательной ценности трав после применения камнеуборочного агрегата (таблица 2).

Движение камнеуборочного агрегата начинается в начале третьего сегмента поперек склона справа налево, от верхней делянки к нижней (рис. 2). Корпус плуга агрегата опускается на заданную глубину, и в нижней части третьего сегмента образуется канал для сбора камней.

Таблица 2

Table 2

ПИТАТЕЛЬНАЯ ЦЕННОСТЬ ТРАВ НА ОПЫТНЫХ УЧАСТКАХ (данные за 2022 г.)
NUTRITIONAL VALUE OF HERBS FROM THE EXPERIMENTAL PLOTS (DATA FOR 2022)

Опытный участок	Кормовые единицы, г	Перевариваемый протеин, г	Энергия, МДж		Перевариваемый протеин, г/корм. ед.
			валовая	обменная	
1	0,60	89	14,93	8,01	148
2 (контроль)	0,61	85	14,89	8,19	137
3	0,60	94	14,94	8,02	156
4	0,60	91	14,99	8,00	152
5 (контроль)	0,61	93	15,02	8,13	152
6	0,59	90	15,03	7,92	152
7	0,60	90	14,82	7,94	150
8 (контроль)	0,61	89	15,00	8,11	146
9	0,69	92	14,90	7,96	154

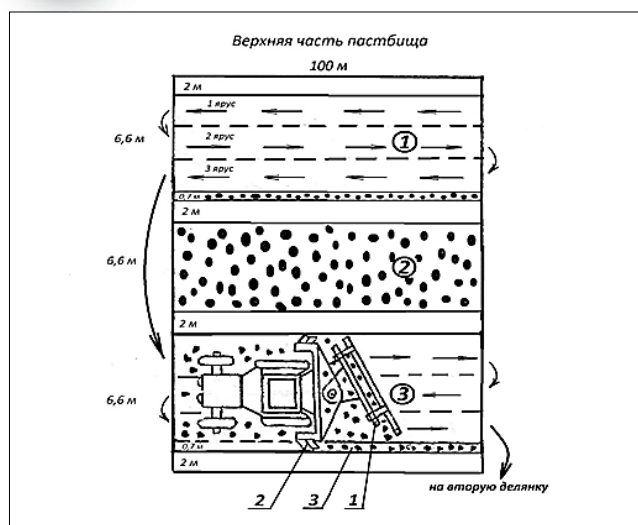


Рис. 2. Схема движения камнеуборочного агрегата: 1 – подвижная рама с гребенкой; 2 – неподвижная рама с плугом; 3 – канал для утилизации камней

Fig. 2. Movement diagram of the stone removal unit: 1 – movable frame with a comb; 2 – fixed frame with a plow; 3 – stone disposal channel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Весной 2022 г. после высыхания травостоя пастбища определяли площадь засорения учетной делянки методом измерения площади соприкосновения камней с почвой. В каждом варианте опыта по диагонали были выбраны три учетные площадки по 1 м². После подсчета выявили, что засоренность делянок камнями увеличивалась сверху вниз по склону и составила в среднем от 29,6, 38,3 до 49% площади делянок соответственно 1, 4 и 7. Это объясняется скатыванием по склону под собственным весом мелких и средних камней, которые животные сбивают копытами, передвигаясь по склону. Данные за 2022 г. оказались ниже, чем в 2020 г. при замене трактора МТЗ-82 на менее мощный *Feng Shou 180*.

Все проведенные мероприятия благотворно отразились на прорастании залежных аборигенных семян бобовых трав. Улучшенный рост бобовых совместно со злаковыми повлиял на урожай сухой

массы, питательную и энергетическую ценность корма. Бобовые травы за счет способности симбиотической фиксации азота из атмосферного воздуха играют ведущую роль в биологизации горного земледелия, пополняя почвенный запас органическими веществами и элементами минерального питания [20]. Изменение видового состава травостоя способствовало формированию двухъярусной вертикальной структуры естественных растительных сообществ, более полному поглощению солнечных лучей, накоплению биологического азота, в частности протеина, в сухой массе корма.

Повышение качества и количества корма в результате удаления камней позволило увеличить нагрузку на 1 га пастбищ по численности нагульного молодняка КРС с 1,1 до 2,5 животных [21]. Высокая концентрация перевариваемого протеина и обменной энергии способствовала более интенсивному среднемесячному накоплению массы животных с 490 до 895 г. Эти изменения позволили за пастбищный период (120 дней) получить дополнительный привес 282,4 кг живой массы. При закупочной цене 330 руб/кг прибыль составила 93,192 тыс. руб.

Применение на мелкоконтурных склоновых участках камнеуборочного агрегата в модификации, адаптированной для работы в гористой местности, позволит восстановить деградированные сенокосы и пастбища, улучшить продуктивность, питательность и энергонасыщенность получаемого растительного корма. Важна также возможность круглогодичного содержания животных в горной зоне и использования высококачественных кормов.

Выводы. Впервые на базе мини-трактора *Feng Shou 180* создан экспериментальный образец навесного малогабаритного агрегата для сбора камней диаметром более 30 мм с поверхности пастбища крутизной до 13°. Образец агрегата соответствует агротехническим требованиям и техническому заданию.

Освобождение пастбищ от камней обеспечит увеличение площади травостоя, продуктивности пастбищного хозяйства, а также повысится устойчивость почв к водной и ветровой эрозии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Коробейник И.А. Агрегат для сгребания камней с одновременным автоматическим подсевом трав на горные луга и пастбища Северного Кавказа // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2018. Т. 55. №1. С. 106-112. EDN: YTFUFZ.
- Zhang Z., Yu K., Siddique K.H.M., Nan Z. Phenology and sowing time affect water use in four warm-season annual grasses under a semi-arid environment. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. 269-270. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.02.027.
- Марченко О.С., Текушев А.Х., Уянаев Ю.Х. и др. Инновационные технологии и комплексы машин с активными рабочими органами для коренного улучшения сенокосов и пастбищ // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. №1(30). С. 56-61. EDN: XPTXNJ.
- Федорова О.А., Текушев А.Х., Чаплыгин М.Е., Давыдова С.А. Технологии и технические средства для поверхностного улучшения кормовых угодий // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2022. №2(66). С. 404-414. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-50.

5. Кудзаев А.Б., Уртаев Т.А. Адаптивный энергосберегающий культиватор для обработки каменистых почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. Т. 9. N2. С. 28-32. EDN: TOCCOX.
6. Кудзаев А.Б., Ридный С.Д., Ридный Д.С. и др. Качество обработки пласта почвы рабочими органами машины для поиска крупных камней // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2018. Т. 55. N4. С. 186-198. EDN: YRLMXZ.
7. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Технология и агрегат для восстановления экологического состояния горных лугов и пастбищ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N 2. С. 20-27. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27.
8. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин АГРОМАШ для обработки залежных земель // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N2(31). С. 40-47. EDN: RXFMCP.
9. Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Шогенов Ю.Х. и др. Конкурентоспособный комплекс техники и технологии для производства зерна и кормов // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019. Т. 20. N3. С. 299-308. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
10. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55. EDN: RJSVZT.
11. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И. и др. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95. DOI: 10.12737/article_5db9656e2ade23.01560949.
12. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Механизированный способ удаления и утилизации камней на горных склонах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N2. С. 23-28. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-2-23-28.
13. Кутузова А.А., Тебердиев Д.М., Родионова А.В. и др. Экономическая эффективность усовершенствованных технологий создания и использования сеяных сенокосов // *Кормопроизводство*. 2020. N3. С. 3-8. EDN: NGVSRE.
14. Солдатова И.Э., Солдатов Э.Д. Создание высокопродуктивных сенокосов и пастбищ в горной зоне Северного Кавказа // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2017. Т. 54. N3. С. 9-14. EDN: ZHELCF.
15. Савченко И.В. Ресурсосберегающее экологически чистое растениеводство для получения продукции высокого качества // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. N5. С. 527-531. DOI: 10.31857/S0869-5873895527-531.
16. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Бестаев С.Г. Рыхлитель междурядий - окучник маточных кустов в плодопитомнике // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2014. Т. 51. N4. С. 201-207. EDN: TCCZAL.
17. Kyul E.V., Apazhev A.K., Kudzaev A.B., Borisova N.A. Influence of anthropogenic activity on transformation of landscapes by natural hazards. *Indian Journal of Ecology*. 2017. 44(2). 239-243 (In English). EDN: XNTNYV.
18. Кудзаев А.Б., Уртаев Т.А., Цгоев А.Э., Коробейник И.А. Адаптивный энергосберегающий культиватор // *Сельский механизатор*. 2019. N2. С. 8-9. EDN: YLHTJS.
19. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsгоеv A.E. et al. Adaptive energy-saving cultivator equipped with the simultaneous adjuster of sections for working stony soils. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. 8(11). 714-720. EDN: XXBSDR.
20. Джибилов С.М., Солдатов Э.Д., Гулуева Л.Р., Солдатова И.Э. Способ решения проблемы деградации горных пастбищ Центрального Кавказа // *Аграрный вестник Урала*. 2020. N6 (197). С. 10-16. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-197-6-10-16.
21. Угорец В.И., Солдатова И.Э. Экологическая безопасность получения животноводческой продукции при использовании горных пастбищ в РСО-Алания // *Горное сельское хозяйство*. 2021. N2. С. 50-56. DOI: 10.25691/GSH.2021.2.007.

REFERENCES

1. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R., Korobeinik I.A. Plant for racking stones with synchronous automatic seeding of grasses on mountain meadows and pastures in the North Caucasus. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2018. Vol. 55. N1. 106-112 (In Russian). EDN: YTFUFZ.
2. Zhang Zh., Yu K., Siddique K., Nan Zh. Phenology and sowing time affect water use in four annual herbs of the warm season under semi-arid conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. 257-269 (In English). DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.02.027.
3. Marchenko O.S., Tekushev A.H., Uyanaev Yu.H. et al. Innovative technologies and complexes of machines with active working bodies for the radical improvement of hayfields and pastures. *Vestnik VIESKH*. 2018. N1(30). 56-61 (In Russian). EDN: XPTXNJ.
4. Fedorova O.A., Tekushev A.H., Chaplygin M.E., Davydova S.A. Technologies and technical means for simplified improvement of forage lands. *Proceedings of the Lower Volga Agro University Complex*. 2022. N2(66). 404-414 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-50.
5. Kudzaev A.B., Urtaev T.A. Adaptive energy-saving cultivator for stony soils cultivating. *Agricultural machinery and technologies*. 2015. Vol. 9. N2. 28-32 (In Russian). EDN: TOCCOX.
6. Kudzaev A.B., Ridny S.D., Ridny D.S. et al. Quality of a soil layer cultivation with working bodies of the large stones

- searching machine. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2018. Vol. 55. N4. 186-198 (In Russian). EDN: YRLMXZ.
7. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Restoring technology and a seeding unit for recovering mountain meadow and pasture ecosystems. *Agricultural machinery and technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 20-27 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27.
 8. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S. AGROMASH machinery complex for processing of fallow land. *Vestnik VIESKH*. 2018. N2(31). 40-47 (In Russian). EDN: RXFMCP.
 9. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Shogenov Yu.Kh. et al. Competitive complex of machinery and technologies for the production of grain and feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019. Vol. 20. N3. 299-308 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
 10. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Creation and development of systems for machines and technologies for the complex mechanization of technological processes in crop production. *History of Science and Engineering*. 2019. N12. 46-55 (In Russian). EDN: RJSVZT.
 11. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Starovoytov S.I. et al. Three-section soil processing unit with universal replaceable working units. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2019. Vol. 14. N3(54). 92-95 (In Russian). DOI: 10.12737/article_5db9656e2ade23.01560949.
 12. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Mechanized method for the removal and disposal of stones on mountain slopes. *Agricultural machinery and technologies*. 2020. Vol. 14. N2. 23-28 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-23-28.
 13. Kutuzova A.A., Teberdiev D.M., Rodionova A.V. et al. Economic effectiveness of improved cultivation techniques for man-made hayfields. *Fodder Production*. 2020. N3. 3-8 (In Russian). EDN: NGVSRE.
 14. Soldatova I.E., Soldatov E.D. Development of high-productive meadows and pastures in the mountain zone of the North Caucasus. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2017. Vol. 54. N3. 9-14 (In Russian). EDN: ZHELCF.
 15. Savchenko I.V. Resursosberegayushchee ekologicheskii chistoe rastenievodstvo dlya polucheniya produktsii vysokogo kachestva [Ecology safety crop production for obtaining high-quality products]. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. 2019. Vol. 89. N5. 527-531 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869-5873895527-531.
 16. Djibilov S.M., Gulueva L.R., Bestaev S.G. The inter-row ripper is the hiller of mother bushes in the fruit tree nursery. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2014. V. 51. N4. 201-207 (In Russian). EDN: TCCZAL.
 17. Kyul E.V., Apazhev A.K., Kudzaev A.B., Borisova N.A. Influence of anthropogenic activity on transformation of landscapes by natural hazards. *Indian Journal of Ecology*. 2017. Vol. 44. N2. 239-243 (In English). EDN: XNTNYV.
 18. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A. Adaptive energy-saving cultivator. *Sel'skiy mekhanizator*. 2019. N2. 8-9 (In Russian). EDN: YLHTJS.
 19. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E., Korobeynik I.A., Tsgoev D.V. Adaptive energy-saving cultivator equipped with the simultaneous adjuster of sections for working stony soils. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. N11. 714-720 (In English). EDN: XXBSDR.
 20. Dzhibilov S.M., Soldatov E.D., Guluyeva L.R., Soldatova I.E. The way to solve the problem of degradation of mountain pastures of the Central Caucasus. *Agrarian bulletin of the Urals*. 2020. N6 (197). 10-16. (In Russian). DOI: 10.32417/1997-4868-2020-197-6-10-16.
 21. Ugorets V.I., Soldatova I.E. Use of mountain pastures – a basis for receiving environmentally safe animal products. *Mining Agriculture*. 2021. N2. 50-56 (In Russian). DOI: 10.25691/GSH.2021.2.007.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Бидеев С.И. – научное руководство, разработка теоретических предпосылок, формирование общих выводов; Гулуева Л.Р. – формулирование основных направлений исследования, написание и доработка текста, литературный анализ, разработка эскизов, обработка результатов исследований, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Bideev S.I. – scientific guidance, development of theoretical foundations, formulation of general conclusions; Guluyeva L.R. – formulation of the main research directions, manuscript writing and refinement, literature review, development of sketches, 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

02.06.2024
29.07.2024

EDN: MYAXCJ

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-49-54



Научная статья

УДК 631.671



Суммарное водопотребление люцерны в зависимости от активной поверхности почвы и биоклиматических коэффициентов

Татьяна Анатольевна Панкова,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: vtanja@mail.ru;

Алексей Владимирович Кравчук,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: aleks100sgau@yandex.ru;

Светлана Сергеевна Орлова,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: orlovass77@mail.ru;

Ольга Валентиновна Михеева,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: omuk@inbox.ru;

Елена Николаевна Миркина,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: docentmirkina@rambler.ru

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Российская Федерация

Реферат. Орошение оказывает сильное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур, а в сложных климатических условиях сухостепного Заволжья получение стабильно высокого урожая люцерны без орошения невозможно. Орошение имеет как положительные, так и отрицательные последствия и требует крайне грамотного подхода к использованию орошаемых земель и поливной воды. Для расчета суммарного водопотребления люцерны в условиях сухостепного Заволжья предлагается использование биоклиматических коэффициентов и показатели активности поверхностей почвы. (*Цель исследования*) Определить суммарное водопотребление люцерны с использованием биоклиматических коэффициентов и величины активной поверхности почвы для повышения эффективности поливных режимов. (*Материалы и методы*) Проанализировали основные приходные элементы, формирующие объем суммарного водопотребления. Изучили изменение общего водопотребления в зависимости от испарения, относительных запасов продуктивной влаги для определенной фазы развития люцерны, используя экспериментальные данные по водопотреблению этой культуры. (*Результаты и обсуждение*) Определили значения эмпирических коэффициентов состояния активной поверхности на посевах люцерны в зависимости от суммы среднесуточных температур на основании расчета испаряемости с водной поверхности методом Будыко-Зубенка. Установили, что значения коэффициентов состояния активной поверхности существенно изменяются в процессе развития растений от 0,5 в период отрастания-ветвления до 0,78 при ветвлении-бутонизации и до 0,99-1,0 в период бутонизации-цветения. (*Выводы*) Экспериментально установили криволинейные зависимости отношения общего водопотребления к испаряемости от относительных запасов продуктивной влаги в различные фазы роста и развития люцерны. Получили эмпирические коэффициенты, для расчета суммарного водопотребления за разные периоды вегетации люцерны при возделывании на темно-каштановых почвах сухостепного Заволжья.

Ключевые слова: орошение, люцерна, условия окружающей среды, суммарное водопотребление, испаряемость, влажность почвы, активная поверхность почвы, биоклиматические коэффициенты.

■ **Для цитирования:** Панкова Т.А., Кравчук А.В., Орлова С.С., Михеева О.В., Миркина Е.Н. Суммарное водопотребление люцерны в зависимости от активной поверхности почвы и биоклиматических коэффициентов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N4. С. 49-54. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-49-54. EDN: MYAXCJ.

Scientific article

Total Water Consumption of Alfalfa as a Function of Active Soil Surface and Bioclimatic Coefficients

Tatyana A. Pankova,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: vtanja@mail.ru;
Alexey V. Kravchuk,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: aleks100sgau@yandex.ru;

Svetlana S. Orlova,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: orlovass77@mail.ru;
Olga V. Mikheeva,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: omuk@inbox.ru;

Elena N. Mirkina,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: docentmirkina@rambler.ru

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russian Federation

Abstract. The paper highlights the significant impact of irrigation on crop yields, emphasizing that in the challenging climatic conditions of the dry-steppe Trans-Volga region, it is impossible to obtain a consistently high alfalfa yield without irrigation. Since irrigation presents both substantial benefits and potential drawbacks, it requires a highly skilled approach to managing irrigated lands and water resources. To estimate the total water consumption of alfalfa in the dry-steppe Trans-Volga region, it is proposed to use bioclimatic coefficients and soil surface activity indicators. (*Research purpose*) The study aims to determine the total water consumption of alfalfa by using bioclimatic coefficients and active soil surface values to improve the efficiency of irrigation regimes. (*Materials and methods*) The primary input factors influencing the total water consumption volume were analyzed. Changes in total water consumption during specific phases of alfalfa development were assessed based on evapotranspiration and the relative reserves of productive moisture, using experimental data on the crop's water consumption. (*Results and discussion*) The empirical coefficients representing the active surface state of alfalfa crops were determined based on the sum of average daily temperatures, calculated using Budyko-Zubenko method for estimating evaporation from the water surface. It was found that the coefficients of active surface state change significantly during plant development, increasing from 0.5 during the growth-branching period to 0.78 during branching-budding and reaching 0.99-1.0 during the budding-flowering period. (*Conclusions*) Curvilinear relationships between the ratio of total water consumption to evaporation and the relative reserves of productive moisture during different phases of alfalfa growth and development were experimentally established. Empirical coefficients were derived for calculating total water consumption during different periods of alfalfa vegetation grown on dark chestnut soils in the dry steppe Trans-Volga region.

Keywords: irrigation, alfalfa, environmental conditions, total water consumption, evaporation, evapotranspiration, soil moisture, active soil surface, bioclimatic coefficients.

For citation: Pankova T.A., Kravchuk A.V., Orlova S.S., Mikheeva O.V., Mirkina E.N. Total water consumption of alfalfa as a function of active soil surface and bioclimatic coefficients. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 49-54 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-49-54. EDN: MYAXCJ.

Суммарное водопотребление составляет основную расходную часть водного баланса расчетного слоя почвы, которая зависит от фаз развития сельскохозяйственных культур и метеорологических условий [1]. К основным кормовым культурам, возделываемым на орошаемых землях в сухостепном Заволжье, относится люцерна. Это растение отличается важными достоинствами: азотфиксирующая способность позволяет повысить питательность почвы; за счет сбалансированного состава оно служит прекрасным кормом; используется на сено, зеленую массу, сенаж, травяную муку [2]. Выращивание люцерны помогает решить проблему защиты почвы от ветровой и водной эрозии, поэтому крайне важно правильное регулирование водного питания этой культуры [3].

Для оптимального режима орошения помимо данных о величине суммарного водопотребления за вегетационный период необходимо знать интенсивность потребления воды по отдельным периодам развития культуры [4]. Среднесуточное водопотребление люцерны увеличивается по мере развития травостоя: в период отрастания-ветвления оно колеблется в пределах 10-30 м³/га, ветвления-бутонизации – 30-50 м³/га и в период бутонизации-цвете-

ния – 50-70 м³/га [5]. Водопотребление люцерны имеет характерную для укосов динамику: наибольшее приходится на первый укос (36,3-38,7% от суммарного), несколько меньший расход воды во втором укосе (31,1-33,1%), на третий укос при снижении продуктивности культуры водопотребление составляет порядка 27,5-28,9% от суммарного за вегетацию [6].

Анализ методов определения суммарного водопотребления показывает, что каждый метод имеет свои преимущества и недостатки в конкретных природных условиях. В каждом случае для расчета количества водопотребления необходимо установить эмпирические коэффициенты [7].

Цель исследования – расчет суммарного водопотребления люцерны с использованием биоклиматических коэффициентов и величины активной поверхности почвы для повышения эффективности проведения поливных режимов в разные периоды вегетации при возделывании на темно-каштановых почвах сухостепного Заволжья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Установлено, что основными элементами, формирующими объем суммарного водопотребления, являются оросительная норма и атмосферные осадки за вегетационный период [8].

По обеспеченности дефицита водного баланса (ДВБ) доля атмосферных осадков в общем объеме потребляемой люцерной воды составляет: в среднем по влажности году – 35%, в засушливом – 30,6%, во влажном – 48,4% [9]. Доля увлажнения за счет орошения составила 46,3% (влажный год), 57,1% (средний), 58,6% (сухой). Величина естественных запасов влаги в почве зависела от обеспеченности года исследований и составила в среднем за годы 6,4%, 5,3%, 12,3% от общего водопотребления [10]. Для условий сухостепного Заволжья с учетом формирующегося водного режима почвы, погодных условий, биологических особенностей сельскохозяйственных культур и состояния активной поверхности почвы для определения суммарного водопотребления ЕТ подходит модель, предложенная С.В. Затицаким [11]:

$$ET = \frac{E \cdot A_n}{\left(1 + 10^{\gamma - \beta \frac{W_{act} - W_{pwp}}{W_{FC} - W_{pwp}}}\right)}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где E – испаряемость, мм; $\bar{W}_{act}$ – фактические влагозапасы, мм; W_{pwp} – влагозапасы почвы, соответствующие влажности завядания, мм; W_{FC} – влагозапасы почвы, соответствующие наименьшей влагоемкости, мм; A_n , γ и β – эмпирические коэффициенты, определяющие состояние деятельной (активной) поверхности и биологические особенности культуры в процессе онтогенеза.

Для определения суммарного водопотребления успешно используется уравнение А.М. Алпатьева [12]:

$$E_T = k_6 \Sigma d_{\phi}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) коэффициент состояния активной поверхности:

$$A_n = \frac{k_6 \cdot \Sigma d_{\phi} \cdot (1 + 10^{\gamma - \beta \cdot \bar{W}_{act}})}{E}, \quad (3)$$

где k_6 – биоклиматический коэффициент, мм/мБ; Σd_{ϕ} – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха, мБ; $\bar{W}_{act}$ – относительные запасы продуктивной влаги в почве, %.

Для изучения зависимости общего расхода воды на испарение от относительных продуктивных запасов влаги в почве использовались материалы непосредственных полевых исследований [13]. На основе экспериментальных данных установлено, как меняется общее водопотребление люцерны от испарения в зависимости от относительных запасов продуктивной влаги для определенной фазы развития культуры [14]. Данная модель позволяет оценить влагообеспеченность сельскохозяйственного поля и определить объем суммарного водопотребления с целью получения планируемой урожайности без перерасхода оросительной воды [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На основании расчета испаряемости с водной поверхности методом Будыко-Зубенка были определены значения эмпирических коэффициентов состояния активной поверхности на посевах люцерны в зависимости от суммы среднесуточных температур (табл. 1). Построены криволинейные зависимости отношения суммарного водопотребления к испаряемости от относительных запасов продуктивной влаги для различных этапов роста и развития люцерны.

В результате исследований установлены значения коэффициента состояния активной поверхности. По фазам развития растений этот параметр существенно изменяется от 0,5 в период отрастания-ветвления до 0,78 во время ветвления-

Таблица 1

Table 1

Коэффициенты состояния активной поверхности почвы A_n для трех укосов люцерны (испаряемость по методу Будыко-Зубенка)
ACTIVE SOIL SURFACE COEFFICIENTS A_n FOR THREE ALFALFA HARVESTS (EVAPOTRANSPIRATION DETERMINED USING BUDYKO-ZUBENOK METHOD)

Сумма температур, °С	A_n	Сумма температур, °С	A_n	Сумма температур, °С	A_n
1-100	0,54	1301-1400	1,0	2601-2700	0,97
101-200	0,56	1401-1500	0,52	2701-2800	0,98
201-300	0,58	1501-1600	0,56	2801-2900	0,48
301-400	0,60	1601-1700	0,62	2901-3000	0,52
401-500	0,62	1701-1800	0,66	3001-3100	0,57
501-600	0,65	1801-1900	0,72	3101-3200	0,62
601-700	0,68	1901-2000	0,78	3201-3300	0,68
701-800	0,72	2001-2100	0,79	3301-3400	0,72
801-900	0,76	2101-2200	0,80	3401-3500	0,77
901-1000	0,82	2201-2300	0,82	3501-3600	0,86
1001-1100	0,89	2301-2400	0,86	3601-3700	0,96
1101-1200	0,92	2401-2500	0,90	3701-3800	0,50
1201-1300	0,98	2501-2600	0,94	3801-3900	0,51
-	-	-	-	3901-4000	0,52

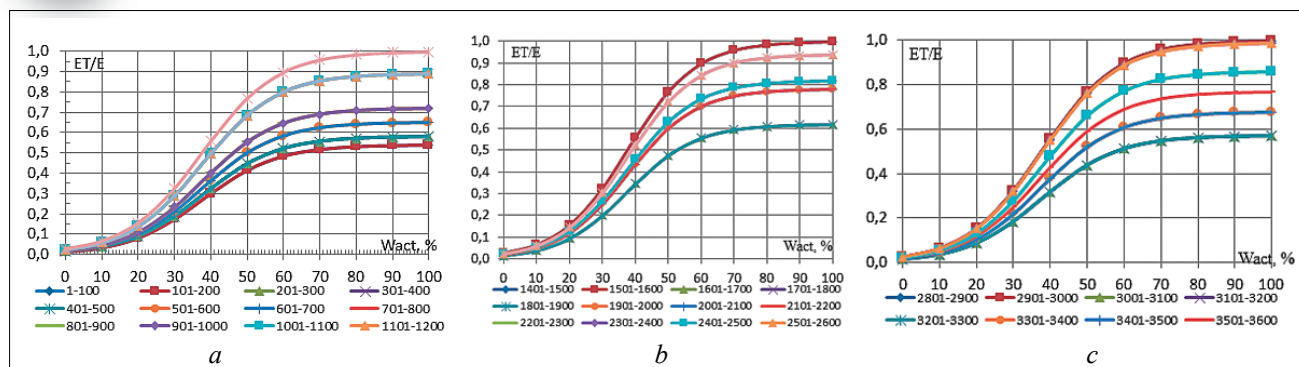


Рисунок. Зависимость отношения суммарного водопотребления к испаряемости (ET/E) от относительных запасов влаги в почве под люцерной: а – I укос (сумма температур 0-1400 °C); б – II укос (1401-2800 °C); в – III укос (2800-4000 °C)

Figure. Relationships between the ratio of total water consumption to evapotranspiration and relative moisture reserves in the soil under alfalfa: а – harvest I (total temperature: 0-1400 °C); б – harvest II (1401-2800 °C); в – harvest III (2800-4000 °C)

бутонизации и до 0,99-1,0 в период бутонизации-цветения.

Графические зависимости отношения суммарного расхода воды к испаряемости (ET/E) от относительных запасов влаги в почве (по методу Будыко-Зубенка) по укосам представлены на рисунке.

На графиках зависимости $ET/E = f(\bar{W}_{act})$ можно выделить три характерные области:

- *участок 1.* Отношение ET/E увеличивается, интенсивность водопотребления растет быстрее и нарушается прямая пропорциональность между относительными продуктивными запасами влаги почвы и водопотреблением;
- *участок 2.* На нем ET/E линейно зависит от относительных запасов продуктивной влаги почвы $\bar{W}_{act}$;
- *участок 3.* Показатель ET/E незначительно увеличивается, асимптотически приближаясь к свое-

му пределу, который можно определить как коэффициент состояния активной поверхности почвы.

В исследовании определили биоклиматические коэффициенты люцерны в зависимости от температурных условий и вегетационного периода от отрастания до скашивания в отдельные укосы. По данным таблицы 2 четко прослеживаются возрастание и спад значений биоклиматических коэффициентов по фазам внутри каждого укоса и начало отрастания следующего укоса. Начало отрастания второго укоса приходится на значение суммы температур 801-900 °C при значении биоклиматических коэффициентов 0,29, третий укос люцерны начинает формироваться при значениях температуры 2301-2400 °C с коэффициентом 0,31.

Сопоставляя значения и делая анализ выше приведенных значений таблиц и зависимостей отношения суммарного водопотребления к испаряемо-

Биоклиматические коэффициенты для люцерны, мм/мб BIOLIMATIC COEFFICIENTS FOR ALFALFA, MM/MB					
Сумма температур, °C	K_6	Сумма температур, °C	K_6	Сумма температур, °C	K_6
1-100	0,29	1401-1500	0,44	2801-2900	0,41
101-200	0,32	1501-1600	0,42	2901-3000	0,38
201-300	0,33	1601-1700	0,43	3001-3100	0,34
301-400	0,35	1701-1800	0,42	3101-3200	0,32
401-500	0,36	1801-1900	0,41	3201-3300	0,29
501-600	0,37	1901-2000	0,40	3301-3400	0,27
601-700	0,34	2001-2100	0,38	3401-3500	0,26
701-800	0,34	2101-2200	0,36	3501-3600	0,25
801-900	0,29	2201-2300	0,34	3601-3700	0,24
901-1000	0,29	2301-2400	0,31	3701-3800	0,22
1001-1100	0,33	2401-2500	0,33	3801-3900	0,24
1101-1200	0,34	2501-2600	0,37	3901-4000	0,27
1201-1300	0,36	2601-2700	0,41		
1301-1400	0,40	2701-2800	0,45		

Таблица 3

Table 3

ЗНАЧЕНИЯ ЭМПИРИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ КРИВЫХ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ЛЮЦЕРНЫ
EMPIRICAL COEFFICIENTS OF BIOLOGICAL CURVES FOR ALFALFA WATER CONSUMPTION

Коэффициент	Период вегетации		
	отрастание–ветвление	ветвление–бутонизация	бутонизация–цветение
A_n	0,54	0,81	1,00
γ	1,54	1,58	1,62
β	0,041	0,042	0,044
k_6	0,31	0,38	0,45

сти от относительных запасов влаги в почве на посевах люцерны, устанавливаем значения эмпирических коэффициентов, учитывающих биологические особенности культуры (таблица 3).

Выводы. Экспериментально установлены криволинейные зависимости отношения суммарного водопотребления к испаряемости от относительных запасов продуктивной влаги для различных фаз роста и развития люцерны.

Точность и достоверность определения интенсивности суммарного водопотребления люцерны

обеспечивалась за счет большой повторяемости измерений. Использование показателей состояния деятельной (активной) поверхности почвы и биологических особенностей люцерны в модели Затицацкого С.В. для расчета суммарного водопотребления с учетом интересующих влагозапасов в период отрастания каждого укоса позволяет разработать экологически и экономически обоснованные режимы орошения люцерны для условий сухостепного Заволжья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grigorov M.S., Chumakova L.N. Maintenance of optimal soil-hydrologic conditions upon irrigation of dark chestnut soils in the Volga Region. *Eurasian Soil Science*. 2000. Vol. 33. N3. 308-310. EDN: LGHQPT.
2. Тимошкин О.А. Конкурентная способность люцерны и кострца в смешанных посевах при возделывании в лесостепи Средневолжья // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2023. N1(391). С. 80-84. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_1_80.
3. Епифанова И.В. Кормовая продуктивность и энергетическая эффективность возделывания люцерны изменчивой в покровных посевах в условиях лесостепи Среднего Поволжья // *Кормопроизводство*. 2024. N3. С. 9-16. DOI: 10.30906/1562-0417-2024-3-9-16.
4. Калайда Д.Д., Василько В.П. Водно-воздушный режим под люцерной 2-го года жизни в зависимости от агроприемов возделывания // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2022. N96. С. 107-113. DOI: 10.21515/1999-1703-96-107-113.
5. Пчелкин В.В., Сухарев Ю.И., Кузина О.М., Владимиров С.О. Суммарное водопотребление люцерны на дерново-подзолистых почвах водоразделов Московской области // *Природообустройство*. 2020. N1. С. 47-53. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-47-54.
6. Чумакова Л.Н., Плотников Д.В., Исаков С.Б. Определение испарения различными методами при возделывании кормовых культур // *Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова*. 2012. N4. С. 36-39. EDN: OXBJPR.
7. Затицацкий С.В., Панкова Т.А., Шмагина Э.Ю., Кочетков А.В. Модели валидации в техническом нормировании (на примере ресурсосберегающих моделей водопотребления) // *Науковедение*. 2014. N5(24). С.49. EDN: TKELUP.
8. Панкова Т.А., Кравчук А.В., Орлова С.С. и др. Адаптивное нормирование орошением // *Природообустройство*. 2023. N2. С. 28-35. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-28-35.
9. Кониева Г.Н., Джиргалова Е.А., Батыров В.А., Оросов С.А. Оптимизация водообеспечения и минерального питания посевов кормовых культур // *Орошаемое земледелие*. 2023. N2(41). С. 41-44. DOI: 10.35809/2618-8279-2023-2-3.
10. Ольгаренко В.И., Ольгаренко И.В., Семененко С.Я., Ольгаренко В.И. Формирование структуры влагообмена зоны аэрации орошаемого поля в условиях присутствия капиллярной каймы в толще грунта // *Мелиорация и гидротехника*. 2023. N3 (13). С. 1-16. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-1-16.
11. Затицацкий С.В., Панкова Т.А. Ресурсосберегающая математическая модель нормирования орошения // *Научное обозрение*. 2013. N11. С. 10-12. EDN: RWISXB.
12. Черемисинов А.А., Черемисинов А.Ю. Обзор расчетных методов определения суммарного испарения орошаемых сельскохозяйственных полей // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2016. N1(21). С. 113-133. EDN: VQUGID.
13. Соловьев Д.А., Камышова Г.Н., Колганов Д.А., Терехова Н.Н. Повышение эффективности орошения на основе внедрения цифровых моделей прогнозирования водопотребления // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2020. N4(60). С. 402-414. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-38.

14. Cao X., Li H., Zheng H. et al. Effects of subsurface drip irrigation on water consumption and yields of alfalfa under different water and fertilizer conditions. *Journal of Sensors*. 2021. 6617437. DOI: 10.1155/2021/6617437.
15. Abdrazakov F.K., Pankova T.A., Zatinatsky S.V. et al. Increasing efficiency of water resources use in forage crops irrigation. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2017. Vol. 8. N1. 283–293. EDN: ZGTLHB.

REFERENCES

1. Grigorov M.S., Chumakova L.N. Maintenance of optimal soil-hydrologic conditions upon irrigation of dark chestnut soils in the Volga Region. *Eurasian Soil Science*. 2000. Vol. 33. N3. 308-310 (In English). EDN: LGHQPT.
2. Timoshkin O.A. Competitive ability of alfalfa and brome in mixed crops when cultivated in the forest-steppe of the Middle Volga. *International Agricultural Journal*. 2023. N1(391). 80-84 (In Russian). DOI: 10.55186/25876740_2023_66_1_80.
3. Epifanova I.V. Fodder productivity and energy efficiency of cultivation of alfalfa variegated in cover crops in the conditions of forest-steppe of the middle Volga region. *Fodder production*. 2024. N3. 9-16 (In Russian). DOI: 10.30906/1562-0417-2024-3-9-16.
4. Kalaida D.D., Vasilko V.P. Water-air regime under alfalfa of the 2nd year of life depending on agro-techniques of cultivation. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2022. N96. 107-113 (In Russian). DOI: 10.21515/1999-1703-96-107-113.
5. Pchelkin V.V., Sukharev Y.I., Kuzina O.M., Vladimirov S.O. Total water consumption of alfalfa on sod-podzolic soils of watersheds of the Moscow region. *Environmental management*. 2020. N 1. 47-53 (In Russian). DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-47-54.
6. Chumakova L.N., Plotnikov D.V., Ishakov S.B. Determination of evaporation of forage crops by different methods. *Bulletin of Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov*. 2012. N4. 36-39 (In Russian). EDN: OXBJPR.
7. Zatinatsky S.V., Pankova T.A., Shmagina E.Yu., Kochetkov A.V. Validation models in technical example of resource-saving models of water consumption). *Internet journal Naukovedenie*. 2014. N5(24). 49 (In Russian). EDN: TKELUP.
8. Pankova T.A., Kravchuk A.V., Orlova S.S., Mikheeva O.V., Mirkina E.N. Adaptive irrigation rationing. *Environmental management*. 2023. N2. 28-35 (In Russian). DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-28-35.
9. Konieva G.N., Dzhirgalova E.A., Batyrov B.A., Orosov C.A. Optimization of water supply and mineral nutrition forage crops. *Irrigated Agriculture*. 2023. N2(41). 41-44 (In Russian). DOI: 10.35809/2618-8279-2023-2-3.
10. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Semenenko S.Ya., Olgarenko V.I. Structure formation of moisture exchange in the aeration zone of an irrigated field in presence of a capillary fringe in soil thickness. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023. N3 (13). 1-16 (In Russian). DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-1-16.
11. Zatinatsky S.V., Pankova T.A. Resource-saving mathematical model of irrigation rationing. *Scientific Review*. 2013. N11. 10-12 (In Russian). EDN: RWISXB.
12. Cheremisinov A.A., Cheremisinov A.Yu. Review of calculating methods for evapotranspiration of irrigated fields. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2016. N1 (21). 113-133 (In Russian). EDN: VQUGID.
13. Solovyev D.A., Kamyshova G.N., Kolganov D.A., Terekhova N.N. Improving irrigation efficiency based on introducing of digital models for forecasting water consumption.. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agro-university complex: science and higher professional education*. 2020. N4(60). 402-414 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-38.
14. Cao X., Li H., Zheng H., Wang J. et al. Effects of subsurface drip irrigation on water consumption and yields of alfalfa under different water and fertilizer conditions. *Journal of Sensors*. 2021. 6617437 (In English). DOI: 10.1155/2021/6617437.
15. Abdrazakov F.K., Pankova T.A., Zatinatsky S.V. et al. Increasing efficiency of water resources use in forage crops irrigation. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2017. Vol.8. N1. 283-293 (In English). EDN: ZGTLHB.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Все авторы внесли равный вклад.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

All authors contributed equally to this publication. The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

03.10.2024
28.11.2024

EDN: OQNYPV

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-55-61



Научная статья

УДК 677.027



Обоснование режимов нового универсального способа сушки короткого льноволокна

Эдуард Валерьевич Новиков,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: e.novikov@fncl.ru;

Ирина Николаевна Алтухова,
старший научный сотрудник,
e-mail: i.altuhova@fncl.ru;

Евгения Николаевна Королева,
старший научный сотрудник,
e-mail: e.koroleva@fncl.ru;
Александр Владиславович Безбабченко,
старший научный сотрудник,
e-mail: a.bezbabchenko@fncl.ru

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

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (FGSS-2022-0007).

Реферат. Часто на предприятия глубокой переработки поступает короткое льноволокно с повышенной влажностью, которое нужно подсушить до технологических параметров. (Цель исследования) Изучить влияние параметров процесса (скорость, расход агента сушки, нагнетание и разрежение воздуха, температура воздуха в сушильной камере) на продолжительность сушки короткого и однотипного льноволокна. (Материалы и методы) Исследования проводились в новой сушильной установке с рециркуляцией воздуха. Льноволокно предварительно увлажняли до 35-40 процентов и загружали в рабочую камеру. Перед началом сушки и затем каждую минуту волокно взвешивалось для определения потери влаги. Также перед началом процесса и далее каждую минуту измерялась температура воздуха на входе в сушильную камеру, на выходе из нее и в камере смешивания. Опыты проводились при различном сочетании в сушильной камере скорости и расхода поступающего и удаляемого воздуха. Начальная температура агента сушки составляла 70-80 градусов Цельсия, относительная влажность 5 процентов; средняя температура воздуха в цехе 17 градусов Цельсия, степень рециркуляции 1,4. (Результаты и обсуждение) Длительность сушки короткого льноволокна от влажности 30 до 14 процентов составляет 1,3-1,9 минуты. Изменение режима продувки с нагнетания на разрежение существенно не влияет на время сушки; для эффективной сушки следует применять скорость воздуха 8-9 метров в секунду. Температура агента сушки постоянно возрастает, температура отработанного воздуха сначала снижается на 25-28 градусов Цельсия, затем возрастает, а температура смешанного воздуха почти не изменяется. (Выводы) Впервые для изучаемого способа сушки короткого льноволокна в новой установке с рециркуляцией воздуха определены рациональные параметры процесса: длительность 1,3-1,4 минуты, температура агента сушки 75-80 градусов Цельсия, а также оптимальные сочетания расхода и скорости подаваемого и удаляемого воздуха.

Ключевые слова: короткое льноволокно, время сушки, скорость воздуха, расход воздуха.

■ **Для цитирования:** Новиков Э.В., Алтухова И.Н., Королева Е.Н., Безбабченко А.В. Обоснование режимов нового универсального способа сушки короткого льноволокна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N4. С. 55-61. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-55-61. EDN: OQNYPV.

Scientific article

Substantiation of Drying Modes for a New Universal Method of Short Flax Fiber Drying

Edward V. Novikov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: e.novikov@fncl.ru;

Irina N. Altukhova,
senior researcher,
e-mail: i.altuhova@fncl.ru;

Evgenya N. Koroleva,
senior researcher,
e-mail: e.koroleva@fncl.ru;
Alexander V. Bezbabchenko
senior researcher,
e-mail: a.bezbabchenko@fncl.ru

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

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state task of the Federal State Budgetary Institution «Federal Scientific Center for Bast Crops» (FGSS-2022-0007).

Abstract. Deep processing enterprises often receive short flax fibers with high moisture content, which must be dried to meet processing requirements. (*Research purpose*) To investigate the effect of process parameters (speed, drying agent consumption, air injection and vacuum, air temperature in the drying chamber) on the drying time of short and uniform flax fibers. (*Materials and methods*) The studies were conducted using a new drying unit with air recirculation. Flax fibers were pre-moistened to a moisture content of 35-40 percent and loaded into the working chamber. Before drying, and then at one-minute intervals during the process, the fibers were weighed to monitor moisture loss. Additionally, the air temperature at the inlet and the outlet of the drying chamber, as well as in the mixing chamber, was measured before the start of the process and then at one-minute intervals. Experiments were conducted using various combinations of speed and flow rates for both incoming and outgoing air in the drying chamber. The initial temperature of the drying agent was 70-80 degrees Celsius, with a relative humidity of 5 percent. The average ambient temperature in the facility was 17 degrees Celsius, and the recirculation degree was 1.4. (*Results and discussion*) The drying duration of short flax fibers from a moisture of 30 to 14 percent is 1.3-1.9 minutes. Switching the airflow mode from injection to vacuum does not significantly affect the drying time; for effective drying, an air speed of 8-9 meters per second should be maintained. The temperature of the drying agent continuously increases, while the exhaust air temperature initially drops by 25-28 degrees Celsius before rising again. The temperature of the mixed air remains almost unchanged. (*Conclusions*) For the first time, optimal process parameters have been determined for drying short flax fibers in a new installation with air recirculation: a drying duration of 1.3-1.4 minutes, a drying agent temperature of 75-80 degrees Celsius, as well as ideal combinations of airflow rate and speed for both the incoming and outgoing air.

Keywords: short flax fiber, drying time, air speed, air flow.

For citation: Novikov E.V., Altukhova I.N., Koroleva E.N., Bezbabchenko A.V. Substantiation of drying modes for a new universal method of short flax fiber drying. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 55-61 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-55-61. EDN: OQNYPV.

Сорта льна-долгунца отечественной селекции по основным признакам технологической ценности льносырья являются конкурентоспособными [1] при низкой себестоимости [2]. Этим обусловлено повышение интереса к применению лубяных волокон для производства текстильных материалов не только бытового, но и технического назначения, а также композиционных материалов [3]. На текстильную промышленность приходится львиная доля использования всего валового сбора лубяных культур [4, 5], и в условиях санкций и импортозамещения значение льна возрастает [6].

Одним из факторов развития аграрного производства является внедрение передовых технологий и обеспечение приоритетных позиций на мировых рынках [7]. Льноводство признано приоритетным направлением сельского хозяйства в 10 субъектах Российской Федерации [8]. В настоящее время теоретические и экспериментальные исследования в области консервирования льняного сырья высокой влажности не имеют практического применения [9]. В связи с этим рассматриваемая в работе конвективная сушка имеет высокую актуальность, она должна быть производительной [10] и с дифференцированным подводом тепловой энергии [11].

Предприятия глубокой переработки льна неоднократно указывали на превышение влажности у

поступающего сырья. Для обеспечения эффективной работы оборудования короткое и однотипное льноволокно необходимо подсушить до технологической влажности.

В ФНИЦ лубяных культур разработан универсальный способ сушки лубяных культур и волокон из них (патент RU 2650234). Его особенность заключается в том, что слой тресты или волокна транспортируется в горизонтальном слое и при этом высушивается потоком теплоносителя, поступающим одновременно с двух сторон. Два потока агента сушки движутся навстречу вдоль стеблей или волокна, высушивая продольный слой, а при встрече в средней части сушильной камеры потоки удаляются сверху вниз, продувая слой поперек.

Новая экспериментальная установка для всестороннего изучения описанного способа сушки представлена в [12]. Начаты полномасштабные исследования [13], в том числе на тресте льна-долгунца в виде путанины. Определено влияние расходов и скорости воздуха на время процесса, обоснованы рациональные режимы сушки.

Предложенный способ конвективной сушки универсален, предназначен для сушки целых параллелизованных, а также ломаных спутанных стеблей тресты льна, конопли и различных волокон из них. Следует изучать этот процесс, в частности на коротком и однотипном льноволокне.

Известно, что основной задачей кинетики сушки является определение длительности сушки, аналитическое решение этого параметра очень сложное и не всегда возможно [14], поэтому принято решение выполнить экспериментальные исследования.

Цель работы. Изучить влияние скорости, расхода агента сушки, процессов нагнетания и разрежения воздуха, а также изменения температуры воздуха в камере во время сушки короткого, однотипного льноволокна, обосновать рациональные режимы работы оборудования.

Материалы и методы. Универсальный способ сушки лубяных культур изучался на новой установке с рециркуляцией воздуха (рис. 1).

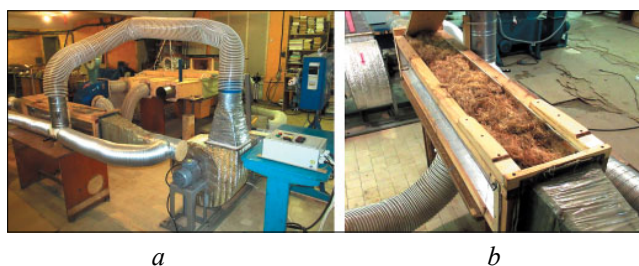


Рис. 1. Общий вид установки со стороны сушильной камеры и электрического теплогенератора (а); сушильная камера с открытой крышкой и загруженным коротким льноволокном (б)

Fig. 1. A general view of the installation showing the drying chamber and electric heat generator (a); a view of the drying chamber with the lid open and loaded with short flax fiber (b)

В опытном исследовании использовано классическое волокно льняное короткое, произведенное на льнозаводе, с показателями качества по ГОСТ Р 54584-2011 «Волокно льняное короткое. Технические условия».

Массовая доля костры и сорных примесей, %	18
Удельный вес костры, %:	
несвязанной	12
связанной	88
Разрывная нагрузка скрученной ленточки:	
кгс	14,5
Н	142,1
даН	14,2
Номер	4
Средняя массодлина, мм	205,1
Линейная плотность, текс	17,2

Льноволокно прочное, содержание костры невысокое, процент несвязанной костры минимальный. После прогрева экспериментальной установки льноволокно вручную помещали в сушильную камеру с влажностью от 35 до 40%. Конструктивно-технологическая схема установки приведена на рисунке 2.

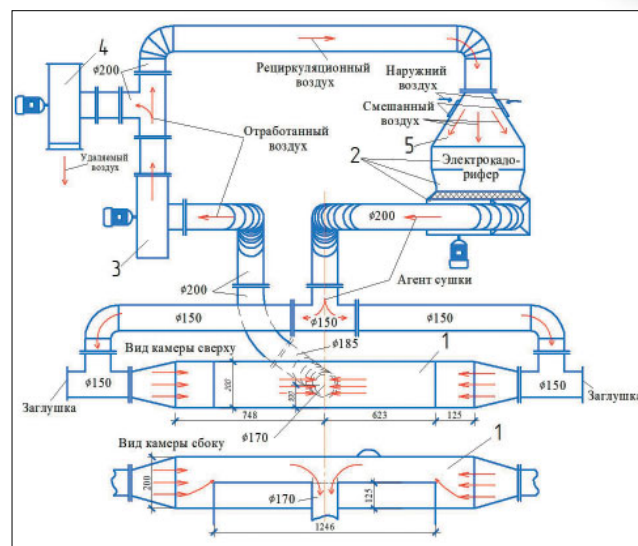


Рис. 2. Экспериментальная сушильная установка
Fig. 2. Experimental drying plant

Перед началом сушки и далее через каждую минуту замерялась температура воздуха t_1 (агента сушки) на входе в сушильную камеру 1, на выходе из нее t_2 (отработанный воздух) и $t_{см}$ (смесь наружного воздуха с рециркуляционным) в камере смешивания 5. Для определения снижения влаги через каждую минуту волокно взвешивалось. Воздух нагревается в электрическом термогенераторе 2.

Принимались различные сочетания скорости и расхода поступающего в сушильную камеру и удаляемого воздуха при нагнетании и разрежении. Режим нагнетания или разрежения устанавливался по расходу воздуха, который регулировали по частотным преобразователям подающих и удаляющих воздух вентиляторов 3 и 4. Расход воздуха изменялся от 700 до 2200 м³/ч, скорость – от 4 до 11 м/с (таблица). Начальная температура агента сушки составляла 70-80 °С, относительная влажность 5%, средняя температура воздуха в цехе 17 °С при рециркуляции 1,4.

По полученным данным построены графические зависимости изменения влажности волокна от времени сушки $W = f(\tau)$, по которым определялась продолжительность при влажности от 30 до 14%. Опыты проводились в шестикратной повторности, относительная гарантийная ошибка не превышала 10%.

Результаты и обсуждение. Исследования изучаемого способа сушки короткого льноволокна на 12 режимах показали, что в начале сушки короткого льноволокна отсутствует процесс прогрева (рис. 3).

При высушивании волокна от влажности 30 до 14% время, определенное по кривой сушки, составляет 1,3-1,9 мин (рис. 4). Сравнивая время сушки при режимах нагнетания и разрежения, например, режимы 1, 6, 9, 10 и другие, следует отметить, что смена продува воздуха с нагнетания на разрежение

Режим сушки	Показания частотного преобразователя вентилятора (ЧРП), Гц		Скорость воздуха, м/с	Расход агента сушки/удаляемого воздуха, м³/ч	Нагнетание или разрежение
	при подаче агента сушки в камеру	при удалении отработанного воздуха			
1	40	30	4	800/700	Нагнетание
2		50	6	1200/1300	Разрежение
3		70	8	1600/1700	
4		90	10	2000/2100	Нагнетание
5	45	30	5	1000/900	
6		50	7	1300/1400	
7		70	9	1700/1800	
8		90	11	2100/2200	Разрежение
9	50	30	6	1100/1000	
10		50	7	1200/1300	
11		70	8	1400/1500	
12		90	9	1600/1700	

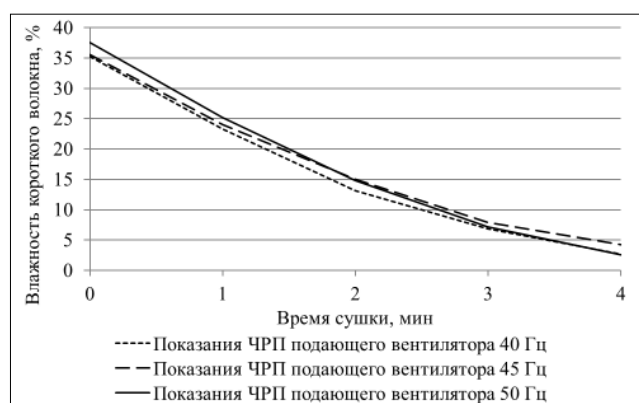


Рис. 3. Кривые сушки короткого льноволокна (согласно данным, приведенным в таблице)
Fig. 3. Drying curves of short flax fiber (according to the data provided in the table)

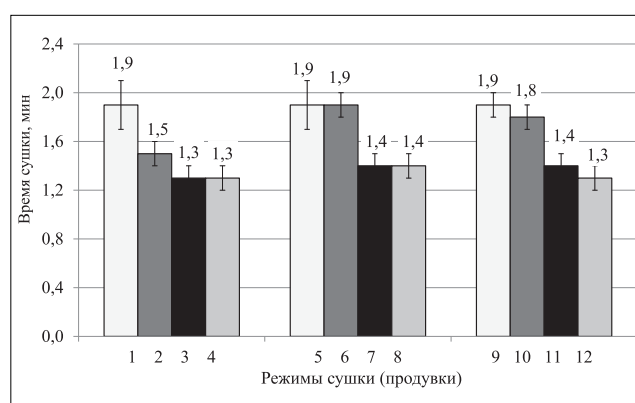


Рис. 4. Время сушки короткого льноволокна от влажности 30 до 14% при различных расходах агента сушки
Fig. 4. Drying time of short flax fibers from 30 up to 14% moisture content at various consumption rates of drying agent

не приводит к существенному изменению времени сушки. Однако только при разрежении будет обеспечена герметичность камеры, причем количество удаляемого из камеры воздуха должно быть на 100 м³/ч больше, чем поступающего.

Полученные значения времени сушки можно разделить на две группы: при расходах подаваемого и удаляемого в сушильную камеру воздуха от 900 до 1300 м³/ч (режимы 1, 2, 5, 6, 9, 10 и при расходах от 1400 до 2200 м³/ч (режимы 3, 4, 7, 8, 11, 12). Первые режимы обеспечивают время сушки 1,6-1,9 мин, вторые – 1,3-1,4 мин. Это указывает на то, что для сушки короткого и однотипного льноволокна в установке следует применять расходы подаваемого и удаляемого воздуха не менее 1400 м³/ч при скорости агента сушки не ниже 8 м/с (так как в соответствии с таблицей график зависимости времени сушки от скорости агента сушки будет выглядеть аналогично гра-

фику на рисунке 4, только по оси абсцисс будут расположены значения скорости). При этом время сушки в сравнении с меньшим расходом снижается на 0,3-0,6 минуты.

На основании предыдущего вывода для эффективной сушки и создания недорогой сушильной машины для короткого и однотипного льноволокна следует применять скорость воздуха 8-9 м/с.

Температура агента сушки постоянно возрастает, в среднем по всем режимам она составляла 79 °С, температура отработанного воздуха сначала снижается на 25-28 °С, затем возрастает, а температура смешанного воздуха (наружного, смешанного с рециркуляционным перед нагреванием в теплогенераторе) почти не изменяется (рис. 5).

Для дальнейших исследований представленно-го способа продувки нецелесообразно применять следующие режимы сушки: 1, 2, 5, 6, 9, 10 и 12 (по данным таблицы и рис. 4).

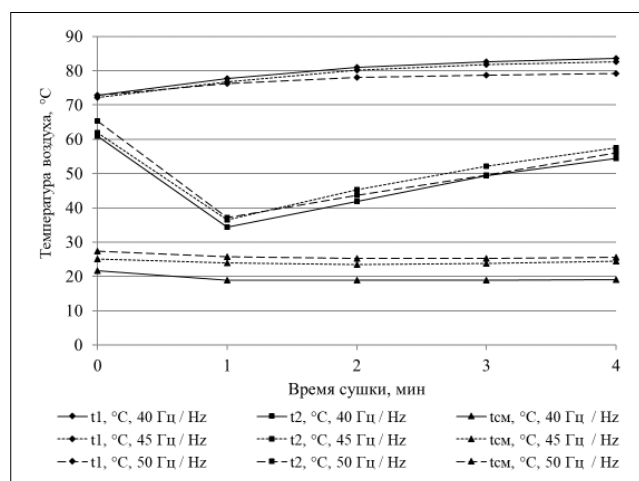


Рис. 5. Зависимость средних значений температуры воздуха от времени сушки короткого льноволокна при различных режимах продувки

Fig. 5. Dependence between average air temperatures and drying duration at various airflow drying modes for short flax fibers

Сравнивая результаты представленных исследований с результатами конвективной сушки, выполненной на других недавно разработанных аналогичных машинах для сушки рулонов тресты в модернизированной машине СЛР-2М [15], тресты в слое при продувке вдоль стеблей в машинах УПСЛТ-1,3 [16] и МС-1 [17], тресты в слое в другом

перспективном способе [18], можно отметить меньшее время сушки в исследованном и предлагаемом конвективном процессе, а значит его более высокую эффективность.

Выводы. Продолжены исследования новой экспериментальной сушильной установки, реализующей универсальный способ конвективной сушки лубяных культур и волокон из них на коротком и однотипном льноволокне.

Впервые для изучаемого способа определено влияние скорости, расхода агента сушки и удаляемого воздуха на время сушки короткого и однотипного льноволокна. Обоснованы рациональные параметры: время сушки 1,3-1,4 мин, температура агента сушки 75-80 °C.

Энергосберегающее высушивание должно проходить при разрежении и следующих режимах: расход входящего/удаляемого воздуха: 1400/1500 м³/ч при скорости агента сушки 8 м/с (режим 11); 1600/1700 и 1700/1800 м³/ч при скоростях 8 и 9 м/с (режимы 3 и 7). В крайнем случае, можно применить менее энергосберегающие режимы 2000/2100 м³/ч при скорости воздуха 10 м/с и 2100/2200 м³/ч при скорости 11 м/с (режимы 4 и 8).

Полученные данные необходимы для дальнейших исследований нового универсального способа сушки на примере других лубяных культур и волокон из них при меньших затратах времени, электрической и тепловой энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудряшова Т.А., Виноградова Т.А., Козьякова Н.Н. Сравнительный анализ результатов переработки льнотресты сортов льна-долгунца отечественной и иностранной селекции по основным хозяйственно-ценным признакам // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021. N2 (392). С. 61-67. DOI: 10.47367/0021-3497-2021-2-61.
2. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Кудрявцев Н.А. и др. Влияние факторов окружающей среды на урожай и качество льняного сырья // *Вестник аграрной науки*. 2020. N5 (86). С. 3-10. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2020.5.3.
3. Дягилев А.С., Быковский Д.И., Реймер В. и др. Сравнительный анализ физико-механических свойств длинного трепаного льноволокна и бананового волокна // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. N1 (397). С. 143-148. DOI: 10.47367/0021-3497-2022-1-143.
4. Смирнов В.Н. Исследования рынка сырьевых культур для текстильной промышленности России // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021. N4 (394). С. 94-96. DOI: 10.47367/0021-3497-2021-4-94.
5. Королева Е.Н., Новиков Э.В., Безбабченко А.В. Возможность получения длинного волокна из тресты масличного льна на различном технологическом оборудовании // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N 2. С. 19-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-2-19-25.
6. Перов М.Г. Анализ состояния и пути повышения качества льнотресты // *Наука в Центральной России*. 2022. Т. 58. N4. С. 53-61. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-4-53-61.
7. Лаврентьева Е.П., Санина О.К., Белоусов Р.О. Глубокая переработка лубяных волокон – путь к возрождению национальных традиций России // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. N3 (399). С. 130-139. DOI: 10.47367/0021-3497-2022-3-130.
8. Борисова О.В., Жилин И.Е. Развитие льноперерабатывающей промышленности на юге Сибири. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2022. Vol. 5-4 (68). С. 69-72. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-5-4-69-72.
9. Berezovsky Yu., Kuzmina T., Yedinovich M. et al. Technical and technological solutions for producing fibre from bast crops. *Inmateh Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 64. N2.
10. Павлов С.А., Фролова Т.Ф. Исследование сушки зер-

- на в автоматизированном сушильном агрегате // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 29-34. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34.
11. Пастухов А.Г., Добрицкий А.А., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф. Исследование физико-механических свойств семян тыквы как объекта сушки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N1. С. 52-59. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-52-59.
 12. Новиков Э.В., Алтухова И.Н., Королева Е.Н., Безбабченко А.В. Универсальный способ сушки лубяных культур // *Аграрный научный журнал*. 2023. N9. С. 128-133. DOI: 10.28983/asjy2023i9pp128-133.
 13. Новиков Э.В., Алтухова И.Н., Королева Е.Н., Безбабченко А.В. Сравнительные исследования инновационного способа конвективной сушки лубяных культур // *Техника и оборудование для села*. 2022. N8 (302). С. 18-21. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-8-18-21.
 14. Олышанский А.И., Котов А.А. Тепломассоперенос в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов // *Вестник Витебского Государственного технологического университета*. 2020. N1 (38). С. 79-90. DOI: 10.24411/2079-7958-2020-13808.
 15. Носов А.Г., Киселев Н.В. Определение проницаемости льняной тресты высокой плотности // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2014. N5 (353). С. 36-39. EDN: TKPFJB.
 16. Васильев Ю.В., Киселев Н.В., Смирнов А.М. Оценка технологической эффективности нового способа термовлажностной подготовки льняной тресты // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2011. N5(334). С. 21-24. EDN: TMJHTN.
 17. Новиков Э.В., Алтухова И.Н., Королева Е.Н., Безбабченко А.В. Обоснование параметров и режимов работы конвективной и инфракрасной сушки технической конопли для производства пеньки однотипной неориентированной // *Таврический вестник аграрной науки*. 2022. N1(29). С. 112-122. EDN: JQBMPS.
 18. Шушков Р.А., Трушанин А.С., Булатов А.М. Моделирование процесса сушки льнотресты и обоснование рациональных режимов работы перспективной сушильной машины // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020. N4(61). С. 172-180. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-14172.

REFERENCES

1. Kudryashova T.A., Vinogradova T.A., Kozyakova N.N. Comparative analysis of results of processing of flax varieties of long-term flax of domestic and foreign selection by main economic and valuable characteristics. *Izvestiya vuzov. Textile Industry Technology*. 2021. N2 (392). 61-67 (In Russian). DOI: 10.47367/0021-3497-2021-2-61.
2. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Kudryavtsev N.A. et al. The influence of environmental factors on the crop and quality of fiber flax. *Bulletin of Agrarian Science*. 2020. N5 (86). 3-10 (In Russian). DOI: 10.17238/issn2587-666X.2020.5.3.
3. Dyagilev A.S., Bykovski D.I., Reimer V. et al. Comparative analysis of physical and mechanical properties of long scutched flax fiber and banana fiber. *Izvestiya vuzov. Textile Industry Technology*. 2022. N1 (397). 143-148 (In Russian). DOI: 10.47367/0021-3497-2022-1-143.
4. Smirnov V.N. Market research of commodity crops for the textile industry of Russia. *Izvestiya vuzov. Textile Industry Technology*. 2021. N4 (394). 94-96 (In Russian). DOI: 10.47367/0021-3497-2021-4-94.
5. Koroleva E.N., Novikov E.V., Bezbabchenko A.V. The possibility of obtaining long fiber from oilseed flax trusts on various technological equipment. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N2. 19-25 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-2-19-25.
6. Perov M. Analysis of the state and ways to improve the quality of flax. *Science in the Central Russia*. 2022. Vol. 58. N4. 53-61 (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2022-4-53-61.
7. Lavrenteva E.P., Sanina O.K., Belousov R.O. The deep processing of bast fibers as the way to the revival of the national traditions of Russia. *Izvestiya vuzov. Textile Industry Technology*. 2022. N3 (399). 130-139 (In Russian). DOI: 10.47367/0021-3497-2022-3-130.
8. Borisova O.V., Zhilin I.E. Development of the flax processing industry in the south of Siberia. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2022. Vol. 5-4 (68). 69-72 (In Russian). DOI: 10.24412/2500-1000-2022-5-4-69-72.
9. Berezovsky Yu., Kuzmina T., Yedinovich M. et al. Technical and technological solutions for producing fibre from bast crops. *Inmateh Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 64. N2. (In English).
10. Pavlov S.A., Frolova T.F. Investigation of graindrying in an automated drying unit. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N4. 29-34 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34.
11. Pastukhov A.G., Dobritsky A.A., Bakharev D.N., Volvak S.F. Investigation of the physico-mechanical properties of pumpkin seeds as an object of drying. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 52-59 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-52-59.
12. Novikov E.V., Altukhova I.N., Koroleva E.N., Bezbabchenko A.V. A universal method of drying bast crops. *Agrarian Scientific Journal*. 2023. N9. 128-133 (In Russian). DOI: 10.28983/asjy2023i9pp128-133.
13. Novikov E.V., Altukhova I.N., Koroleva E.N., Bezbabchenko A.V. Comparative studies of innovative method of convective drying of bast crops. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N8 (302). 18-21 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-8-18-21.
14. Alshanski A.I., Kotow A.A. Heat and mass transfer during

- convective drying of thin flat wet materials. *Bulletin of the Vitebsk State University of Technology*. 2020. N1(38). 79-90 (In Russian). DOI: 10.24411//2079-7958-2020-13808.
15. Nosov A.G., Kiselev N.V. Research of the flax stalks permeability at high density. *Izvestiya vuzov. Textile Industry Technology*. 2014. N5 (353). 36-39 (In Russian). EDN: TKPFJB.
16. Vasiliev Yu.V., Kiselyov N.V., Smirnov A.M. Estimation of technological efficiency of a new method of hydrothermal preparation of a flax stock. *Izvestiya vuzov. Textile Industry Technology*. 2011. N5(334). 21-24 (In Russian). EDN: TMJHTN.
17. Novikov E.V., Altukhova I.N., Koroleva E.N., Bezbabchenko A.V. Justification of parameters and operating modes of convective and infrared drying of technical hemp for the production of undifferentiated non-oriented hemp fiber. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2022. N1(29). 112-122 (In Russian). EDN: JQBMPs.
18. Shushkov R.A., Trushanin A.S., Bulatov A.M. Modeling of the drying process of flax straw and justification of rational operating modes of a perspective dryer. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2020. 4(61). 172-180 (In Russian). DOI: 10.24411/2078-1318-2020-14172.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Новиков Э.В. – определение направлений исследования, работа с текстом, формирование общих выводов;
Алтухова И.Н. – сбор данных, обработка материала, работа с текстом;
Королева Е.Н. – сбор данных, литературный анализ, обработка материала, работа с иллюстрациями и текстом;
Безбабченко А.В. – подготовка установки, работа с иллюстрациями и текстом.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Novikov E.V. – formulation of research directions, developing the manuscript text, formation of general conclusions;
Altukhova I.N. – data collection, material processing, developing the manuscript text;
Koroleva E.N. – data collection, literature review, material processing, working on the tables and diagrams for the manuscript;
Bezbabchenko A.V. – equipment setup, working on the tables and diagrams for 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

28.09.2024
25.10.2024

EDN: UDDXFB

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-62-70



Научная статья

УДК 678:633.1



Технология предпосевного капсулирования колосьев с применением биоразлагаемых полимерных материалов

Мария Олеговна Кульпина,
инженер,
e-mail: markulpina@yandex.ru;
Татьяна Васильевна Чаплыгина,
специалист, магистрант,
e-mail: ivanovatatyana1994@mail.ru;

Кирилл Александрович Степанов,
младший научный сотрудник,
e-mail: 89999878895@mail.ru;
Никита Дмитриевич Блинов,
младший научный сотрудник,
e-mail: nik.blinov76@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Для совершенствования технологических процессов в селекции зерновых культур был предложен способ защиты посевного материала и разработано устройство для посева семян необмолоченными колосьями, повышающие производительность труда при посеве и обеспечивающие сортовую чистоту. Отмечено возможное застревание колосков в механизмах сеялки в процессе высеве и снижение продуктивности семян в колосе. Для устранения выявленных недостатков предлагается применять биоразлагаемые полимерные материалы из поливинилового спирта и полилактида для капсулирования колосьев, высеваемых колосковой сеялкой. *(Цель исследования)* Анализ влияния капсулирования колосьев пшеницы сорта Рима биоразлагаемыми материалами на качество посева колосковой сеялкой и показатели продуктивности семян. *(Материалы и методы)* Качество посева оценивалось по коэффициенту вариации интервалов между соседними колосьями. Продуктивность семян анализировали по показателям роста и развития стеблей лабораторно-вегетационным методом, а также по динамике биохимического состава растений методом инфракрасной спектроскопии. *(Результаты и обсуждение)* Установили, что средний коэффициент вариации при посеве колосковой сеялкой контрольных образцов (без обработки) составил 15,5 процента, обработанных поливиниловым спиртом – 11,3 процента и обработанных полилактидом – 9,7 процента. Средний коэффициент вариации при ручном посеве контрольных образцов составил 13,1 процента. На 19-е сутки показатели роста растений из семян колосьев, обработанных ПВС, в сравнении с контролем были выше на 7 процентов, а из обработанных полилактидом снизились на 13 процентов. Биохимический анализ растений из семян колосьев, обработанных поливиниловым спиртом, в сравнении с контролем показал увеличение содержания воды на 19,3 процента, жиров на 42,9 процента, углеводов на 57,2 процента, снижение содержания белков на 21,6 процента. В растениях из семян колосьев, обработанных полилактидом, в сравнении с контрольными содержание жиров увеличилось на 44,5 процента, углеводов на 60,3%, снизилось содержание воды на 59,7 процента и белков на 9,3 процента. *(Выводы)* Показано, что перспективным решением задачи повышения посевных и урожайных качеств семян в селекции зерновых культур является использование биоразлагаемых материалов из поливинилового спирта и полилактида для капсулирования колосьев. Эта технология способствует снижению коэффициента вариации интервалов между соседними колосьями при высеве, увеличению высоты растений и содержания питательных веществ. Среди исследованных полимерных материалов поливиниловый спирт благодаря своим свойствам наиболее перспективен для применения в селекционных процессах.

Ключевые слова: пшеница, колос, биоразлагаемые полимерные пленки, капсулирование, колосковая сеялка, посев.

■ **Для цитирования:** Кульпина М.О., Чаплыгина Т.В., Степанов К.А., Блинов Н.Д. Технология предпосевного капсулирования колосьев с применением биоразлагаемых полимерных материалов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 62-70. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-62-70. EDN: UDDXFB.

Scientific article

Technology for Pre-sowing Encapsulation of Ears Using Biodegradable Polymer Materials

Maria O. Kulpina,
engineer, e-mail: markulpina@yandex.ru;
Tatyana V. Chaplygina,
specialist, master's student,
e-mail: ivanovatatyana1994@mail.ru;

Kirill A. Stepanov,
junior researcher, e-mail: 89999878895@mail.ru;
Nikita D. Blinov,
junior researcher,
e-mail: nik.blinov76@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that for enhancing technological processes in grain crop breeding, a method for protecting seed material was proposed, accompanied by the development of a device for sowing seeds with unthreshed ears. This approach improves labor productivity during sowing and ensures varietal purity. However, challenges, such as ear jamming in seeder mechanisms and reduced seed productivity per ear were identified. To address these issues, the use of biodegradable polymeric materials, including polyvinyl alcohol and polylactide, is proposed for encapsulating ears sown with a spikelet seeder. (*Research purpose*) The paper examines the impact of encapsulating Rima wheat ears with biodegradable materials on the quality of sowing using a spikelet seeder and on seed productivity indicators. (*Materials and methods*) Sowing quality was evaluated using the coefficient of variation of distances between adjacent ears. Seed productivity was evaluated based on stem growth and development using the laboratory-vegetative method, as well as by analyzing the dynamics of plant biochemical composition with infrared spectroscopy. (*Results and discussion*) The study found that the average variation coefficient during seeding with a spikelet seeder was 15.5 percent for untreated control samples, 11.3 percent, for ears treated with polyvinyl alcohol, and 9.7 percent for those treated with polylactide. For manual seeding, the variation coefficient of control samples averaged 13.1 percent. By the 19th day, plants grown from ear seeds treated with polyvinyl alcohol exhibited growth indices 7 percent higher than the control samples, while those treated with polylactide showed a 13 percent decrease. Biochemical analysis revealed that plants grown from seeds of ears treated with polyvinyl alcohol showed a 19.3 percent increase in water content, a 42.9 percent increase in fats, a 57.2 percent increase in carbohydrates, and a 21.6 percent decrease in protein content compared to the control samples. For plants grown from seeds of ears treated with polylactide, fat content increased by 44.5 percent and carbohydrates by 60.3 percent, while water content decreased by 59.7 percent and proteins by 9.3%, compared to the control samples. (*Conclusions*) The study demonstrates that encapsulating ears with biodegradable materials such as polyvinyl alcohol and polylactide is a promising solution for enhancing the sowing and yield qualities of seeds in grain crop breeding. This technology reduces the coefficient of variation in adjacent ear spacing during sowing, increases plant height, and improves nutrient content. Among the materials studied, polyvinyl alcohol proved to be the most effective for seed breeding due to its superior properties

Keywords: wheat, ear, ear density, biodegradable polymer films, encapsulation, ear seeder, spikelet seeder, sowing.

■ **For citation:** Kulpina M.O., Chaplygina T.V., Stepanov K.A., Blinov N.D. Technology for pre-sowing encapsulation of ears using biodegradable polymer materials. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 62-70 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-62-70. EDN: UDDXFB.

В соответствии со Стратегией научно-технологического развития, утвержденной Указом Президента РФ № 145 от 28 февраля 2024 г., к важнейшим вопросам сельскохозяйственного производства относится развитие технологии промышленного семеноводства, обеспечивающей стабильно высокие посевные и урожайные качества семян. Реализация потенциала посевного материала зависит от способа посева и применяемых для его осуществления технических средств. Для выполнения основной задачи особое внимание следует уделить сельскохозяйственным машинам, отвечающим агротехническим требованиям [1, 2]. В России проводятся работы по проектированию и созданию машин разного типа, выполняющих различные способы посева [3-6].

Для совершенствования процессов селекции сельскохозяйственных культур специалистами лаборатории технологий и машин для посева и уборки зерна и семян был предложен способ посева колосьями при помощи специальной сеялки [7]. При ее использовании увеличивается скорость посева по сравнению с посевом вручную, сокращаются затраты труда на отбор колосьев и обмолот, отсутствует фактор смешения и засорения другим сортом [8]. Но возникает проблема застревания колоса в высевальном аппарате, семяпроводе и сошнике.

Нарушение качества высева и потери семян могут негативно отразиться на стабильности урожая. Также отмечается снижение продуктивности семян при выращивании в колосе (Скатова С.Е. Использование способа посева тритикале ярового колосом в первичном семеноводстве центра Нечерноземной зоны. Тритикале: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону: Юг, 2016. С. 196-204).

Полимеры широко применяются в различных сферах благодаря своим физико-механическим, химическим и технологическим свойствам, а также возможности их модификации. Полимерные материалы и изделия используются в строительной, нефтегазовой, пищевой отраслях, в автомобилестроении, а также медицине и сельском хозяйстве [9].

Китай является мировым лидером по использованию агропромышленным комплексом полимерных материалов в производстве – около 20% от всего мирового производства полимеров. Это пленки для теплиц, мульчирования, силосования, емкости для посева, пикировки и выращивания растений, контейнеры (Подзорова М.В., Тертышная Ю.В. Экоматериалы для агропромышленного комплекса на основе полиэфиров. Инновационные технологии в науке и образовании; матер. конф. ИТНО, 2023. С. 285-288). Примером служит использование в не-

которых регионах России «зерновых рукавов» – герметичных полимерных мешков вместимостью от 65 до 300 т. В таких упаковках можно хранить сухое зерно, создавая в них вакуум [11].

Следует также упомянуть о применении ленточных материалов в качестве субстрата для посева семян. Технология высевы лентами позволяет снизить расход семян и повысить экономическую эффективность [12].

В целях повышения качества высевы колосковой сеялкой предлагается использовать полимерные пленки для защиты колосьев с зерном. При выборе материала для капсулирования колосьев необходимо учитывать его дальнейшее влияние на окружающую среду. В качестве материалов для технологии посева зерновых культур колосьями рассматриваются биоразлагаемые полимеры, такие как поливиниловый спирт и полилактид.

Полилактид (ПЛА) — термопластичный биоразлагаемый материал, получаемый путем полимеризации молочной кислоты. Сырьем для ПЛА служат кукуруза, сахарный тростник, зерновые культуры и другие возобновляемые природные ресурсы (Кочеткова В.А. Экологические аспекты применения биополимеров на основе полилактида. Актуальные проблемы нефти и газа: сб. тр. VI Всерос. молодежной науч. конф. – М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2023. С. 271-274). Изделия из полилактида прозрачные, прочные, способны сохранять форму после сжатия или кручения.

Поливиниловый спирт (ПВС) — синтетический полимер, обладающий хорошими физическими и механическими свойствами [13]. Электропроводность ПВС, растворимость в воде, проницаемость газов и термические характеристики можно варьировать в зависимости от степени кристалличности, которая зависит от молекулярного веса полимера.

Цель исследования. Анализ влияния биоразлагаемых материалов для капсулирования колосьев пшеницы на качество посева колосковой сеялкой и показатели продуктивности семян.

Материалы и методы. В исследовании в качестве биоразлагаемых материалов были выбраны поливиниловый спирт в виде промышленной пленки и полилактид марки 4032D. Были отобраны и подготовлены колосья яровой пшеницы сорта Рима. Использовались термостат, сушильный шкаф, климатическая камера, инфракрасный спектрометр с алмазной приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Для эксперимента готовили три образца колосьев (рис. 1).

В 400 мл хлороформа растворяли 11,8 г ПЛА, интенсивно перемешивая верхнеприводной мешалкой АКМЛАВ модели OS-10L. Полученный раствор наносили на отобранные колосья пшеницы путем на-



Рис. 1. Образцы колосьев: а – контрольные; б – завернутые в ПВС; с – с напылением ПЛА

Fig. 1. Ear samples: a – control untreated sample; b – sample wrapped in Polyvinyl alcohol (PVA); c – sample coated with Polylactide (PLA)

пыления и высушивали на воздухе. Таким образом колосья покрывались защитным слоем полимера. Другие образцы заворачивали в пленку ПВС, смачивая ее края водой для плотного закрепления на колосе.

В исследованиях оценивали четыре варианта посева и обработки образцов:

- посев сеялкой контрольных колосьев;
- посев сеялкой колосьев, завернутых в ПВС;
- посев сеялкой колосьев, обработанных ПЛА;
- ручной посев контрольных колосьев.

Механизированный посев осуществляли экспериментальным образцом однорядной сеялки с диско-кассетным высевочным устройством, разработанной в ВИМ на основе Патента RU2784081 «Сеялка с дисковыми кассетами для посева сельхозкультур» (рис. 2). Опыты проводились в трехкратной повторности.

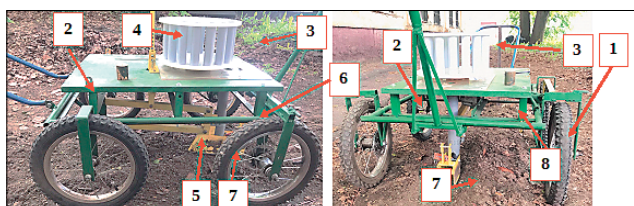


Рис. 2. Экспериментальный образец однорядной сеялки для посева колосьями с диско-кассетным высевочным устройством

Fig. 2. Experimental model of a single-row seeder designed for sowing ears using a disk-cassette seeding mechanism

Высевочное устройство 3 соединено с семяпроводом 6, сошником 7 и расположено на раме 2. Сеялка снабжена механизмом регулирования глубины хода и подъема сошника 4, подвеской сошника 5, приводом высевочного устройства 8, опорно-приводными колесами 1.

Качество (равномерность) высева оценивали по коэффициенту вариации интервалов между соседними колосьями:

$$c_v = \frac{\sigma \cdot 100}{\bar{x}}, \% \quad (1)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \text{ см}, \quad (2)$$

где x_i – расстояние между соседними колосьями, см; $\bar{x}$ – среднее арифметическое измерений, см; N – количество измерений.

К расчету коэффициента вариации принималось расстояние между соседними колосьями x_i в пределах:

$$\bar{x} - 3\sigma \leq x_i \leq \bar{x} + 3\sigma. \quad (3)$$

Продуктивность семян оценивалась лабораторно-вегетационным методом по росту и развитию растений, корневой системы, стеблей в фазы вегетации, а также по анализу биохимического состава методом инфракрасной спектроскопии.

Колосья сеяли в подготовленную почву на глубину 5 см. Почва была привезена с опытных полей Рязанской области, так как в исследованиях использовались районированные для этого региона сорта пшеницы. В каждом варианте обработки колоса использовались по два образца. Для наблюдения за биодеградацией материалов вторую партию образцов высаживали в прозрачные емкости с универсальной почвой максимально близко к стенкам на глубину 5 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Экспериментальные данные для оценки качества посева по расстоянию между соседними колосьями представлены в *таблице 1*. Установлено, что расстояние между всеми соседними колосьями находится в выбранном интервале (3) и по этим значениям можно проводить расчет коэффициента вариации. Средний коэффициент вариации при посеве сеялкой контрольных образцов колосьев составил 15,5%; завернутых в ПВС, – 11,3%; обработанных ПЛА, – 9,7%; при ручном посеве контрольных колосьев – 13,1%.

Для оценки продуктивности семян проводили наблюдения за их всхожестью и ростом. Ростки появляются уже на 9-е сутки, при этом у контрольного и обработанного раствором ПЛА образцов отмечен более активный рост (*рис. 3*).

Изучали процесс роста корневой системы и появление первых ростков (*рис. 4*).

Для изучения влияния на семена биodeградируемых материалов, используемых для капсулирования колосьев, рассматривался процесс развития корневой системы. Колосья высаживали в прозрачные емкости, заполненные почвой, привезенной из Рязанской области, и в универсальный грунт, приобретенный в специализированном магазине (*рис. 5*).

Корни растения в прозрачной емкости (*рисунки 5, 6*) равномерно распределены по всему объему почвы.

Таблица 1

Table 1

РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ КОЛОСЬЯМИ В РАЗНЫХ ВАРИАНТАХ ПОСЕВА И ОБРАБОТКИ КОЛОСЬЕВ
SPACING OF ADJACENT EARS FOR DIFFERENT SOWING AND TREATMENT OPTIONS

Проход сеялки	Интервал между колосьями (x_i), см																Среднее значение	σ , см	c_v , %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
Посев сеялкой контрольных колосьев																			
1	46	40	41	48	47	41	44	44	51	50	30	55	52	39	44,8	6,46	14,4		
2	52	40	45	42	51	49	33	53	37	50	48	39	39	37	43,9	6,56	14,9		
3	67	32	50	48	50	40	47	43	40	50	40	50	45	44	46,1	7,97	17,2		
Посев сеялкой колосьев, завернутых в ПВС																			
1	43	55	35	54	44	43	46	51	37	47	47	45	44	43	45,2	5,56	12,2		
2	44	43	45	58	41	49	35	46	43	49	44	41	47	40	44,6	5,34	11,9		
3	49	46	46	40	55	47	45	53	38	42	46	43	46	45	45,7	4,52	9,8		
Посев сеялкой колосьев, обработанных ПЛА																			
1	42	40	54	51	51	44	41	40	49	44	38	48	46	44	45,1	4,84	10,7		
2	51	50	42	48	48	46	48	38	47	43	43	42	46	42	45,2	3,68	8,1		
3	45	44	46	39	49	50	40	43	40	54	45	45	53	42	45,4	4,68	10,3		
Ручной посев контрольных колосьев																			
1	49	50	56	44	52	50	57	56	49	59	57	38	46	61	51,7	6,4	12,3		
2	44	54	44	51	40	48	57	47	59	50	61	51	53	43	50,1	6,27	12,5		
3	71	56	50	56	39	55	46	58	49	63	50	59	49	53	53,8	7,8	14,4		



Рис. 3. Появление ростков на 9-е сутки (сверху) и прорастание пшеницы на 11-е сутки (внизу) из образцов колосьев (слева направо): контроль; завернутые в ПВС; с напылением ПЛА

Fig. 3. Sprout emergence on day 9 (on top) and wheat germination on day 11 (on bottom) in ear samples (from left to right): control; wrapped in PVA; coated with PLA

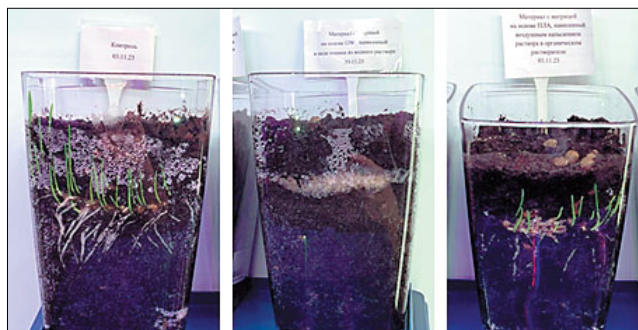


Рис. 4. Рост корневой системы и появление ростков на 6-е сутки после высадки колосьев в почву (слева направо): контроль; завернутые в ПВС; с напылением ПЛА

Fig. 4. Root system growth and the emergence of first sprouts on 6th day after planting ears in the soil (from left to right): control; wrapped in PVA; coated with PLA

Стоит отметить удовлетворительное прорастание зародышевых и coleoptельных корней у данного образца колоса. Такое наблюдение дает возможность определить в дальнейшем качество урожая развивающегося растения (на 13-й день прорастания сформировались первичные корни).

У образцов пшеницы из колосьев, завернутых в ПВС (рис. 5), разный характер развития корневой системы. Необходимо обратить внимание, что на 13-й день прорастания (рис. 6) некоторые зерновки только начинают пускать первые ростки. Дан-



Рис. 5. Корневая система колосьев, высаженных в почву из Рязанской области (сверху вниз): контроль; завернутые в ПВС; с напылением ПЛА

Fig. 5. Root system of ears planted in soil from the Ryazan region (from top to bottom): control; wrapped in PVA; coated with PLA



Рис. 6. Корневая система образцов, высаженных в универсальный грунт (слева направо): контроль; завернутые в ПВС; с напылением ПЛА

Fig. 6. Root system of samples planted in the universal soil (from left to right): control; wrapped in PVA; coated with PLA

ный процесс замедления всхожести не имеет негативного влияния на рост корней и образование первичной корневой системы, но оказывает важное значение с точки зрения применения ПВС на более ранних сроках посева.

При обработке колосьев ПЛА (рисунки 5, 6) корневая система также активно развивается. На 9-й день заметно появление зародышевых и coleoptельных корней.

Динамика роста и развития ростков пшеницы (рис. 7) представлена в виде зависимости высоты от физиологического возраста растения. Данная зависимость наглядно изображает разницу высоты образцов пшеницы на 10-, 16-, 18- и 19-е сутки от посадки растений. На начальных этапах контрольный образец показывал лучшие результаты роста по сравнению с обработанными колосьями. Но начиная с 15-16 суток их высота была практически одинаковая. Затем на 18-е сутки высота растения,

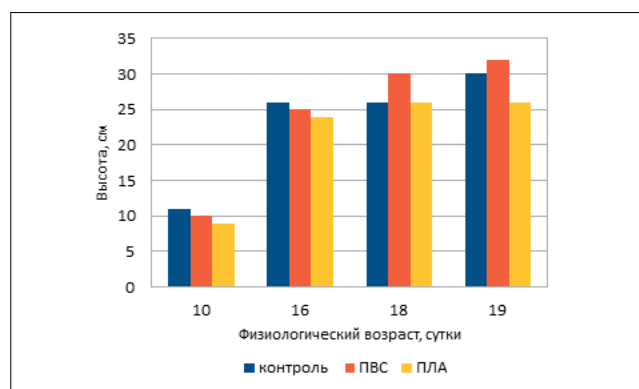


Рис. 7. Зависимость высоты ростков пшеницы из образцов колосьев от физиологического вегетационного периода

Fig. 7. Relationship between the height of wheat sprouts grown from ear samples, and the physiological stage of the vegetation period

колос которого был завернут в ПВС перед посадкой, увеличивается на 4 см относительно контроля и образца с напылением раствора ПЛА. На 19-е сутки высота его не изменяется, но у остальных образцов рост стремительно увеличивался. Значительно заметен рост пшеницы, высаженной в колосе с оболочкой из ПВС.

По истечении 19 дней после высева колосьев были получены ИК-спектры корневой системы, листьев и стеблей пшеницы и проведен их качественный анализ (рис. 8). Инфракрасная спектроскопия относится к экспресс-методам неразрушающего контроля и позволяет получить изменение качественного и количественного состава образца. По полученным данным (рис. 8а) видно, как меняется интенсивность полос спектра.

Для образцов, посаженных колосьями, завернутыми в ПВС, в диапазоне волнового числа 3400-3190 cm^{-1} наблюдается увеличенная интенсивность в отличие от контрольного образца и обработанного раствором ПЛА.

На данных рисунках «check sample» обозначает контрольный образец «PLA» – полилактид, «PVA» – поливиниловый спирт.

Основные интервалы волновых чисел ИК-спектра и соответствующие им функциональные группы и химические вещества корневой системы, листьев и стеблей образцов пшеницы приведены в таблице 2.

Важными компонентами являются сахара, белки, вода. Анализ изменения питательных веществ частей растения, выращенных при посеве колосьев пшеницы, обработанных поливиниловым спиртом и полилактидом в сравнении с контрольными образцами проводили по закону Бугера–Ламберта–Бера с учетом того, что концентрация в условиях анализа пропорциональна интенсивности пика (табл. 3).

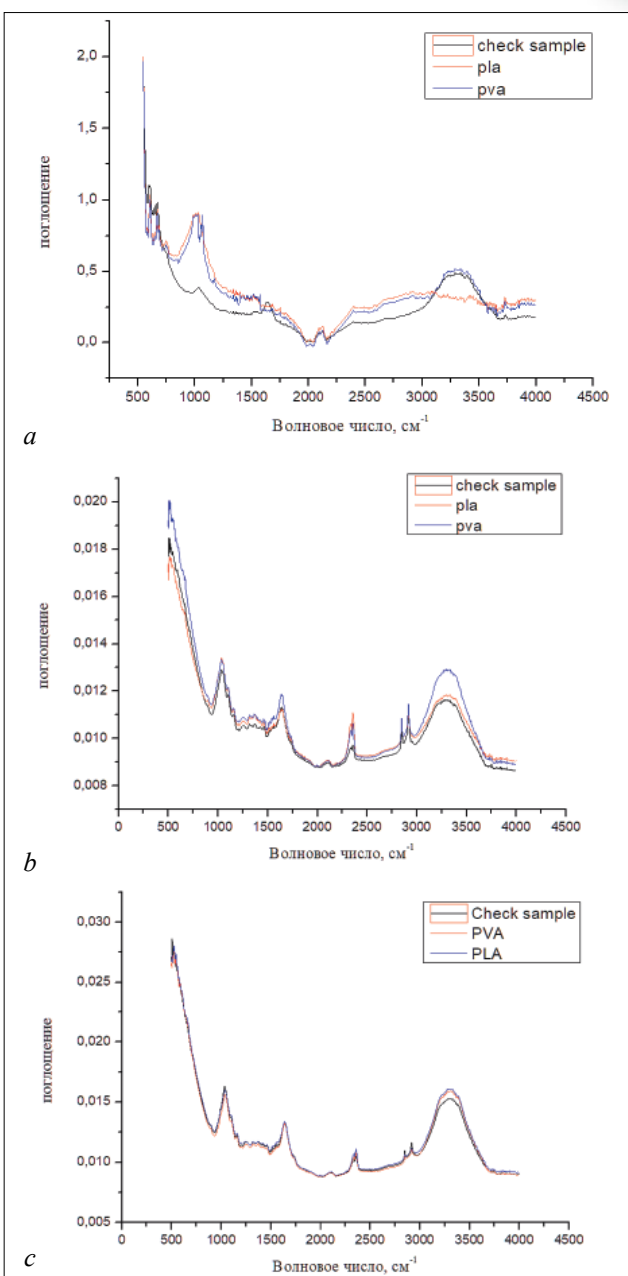


Рис. 8. ИК-спектры корневой системы (а), листьев (b) и стеблей (c) пшеницы

Fig. 8. IR spectra of the root system (a), leaves (b), and stems (c) of wheat plants

Как следует из анализа ИК-спектров, происходит изменение химического состава в разных частях растения:

- в листьях и стеблях образцов, обработанных ПВС, содержание воды увеличилось на 19,3% по сравнению с контролем, а при использовании ПЛА увеличилось количество углеводов на 60,3% и жиров на 44,5%. Однако так как вода является главной составной частью растений и участвует во всех жизненно важных процессах растения, выбор сделан в пользу использования поливинилового спирта при капсулировании колосьев пшеницы;

Таблица 2 Table 2	
ОСНОВНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ВОЛНОВОГО ЧИСЛА ИК-СПЕКТРА ПШЕНИЦЫ СОРТА РИМА PRIMARY WAVELENGTH RANGES OF THE IR-SPECTRUM FOR THE RIMA WHEAT VARIETY	
Волновое число, см ⁻¹	Функциональная группа
~3400-3190	NH -OH H ₂ O
~1635	Аминокислотная полоса (белки)
~1456-1316	Высшие карбоновые кислоты (жиры)
~1035	Вторичные и третичные спирты (сигналы -ОН групп углеводов)

Таблица 3 Table 3				
ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ В РАЗНЫХ ЧАСТЯХ РАСТЕНИЯ ИЗ КОЛОСЬЕВ, ОБРАБОТАННЫХ ПВС И ПЛА PO COMPARISON WITH CONTROL SAMPLES CHANGES IN NUTRIENT CONTENT IN DIFFERENT PARTS OF THE PLANT GROWN FROM EARS TREATED WITH PVA AND PLA COMPARED TO CONTROL UNTREATED SAMPLES				
Функциональная группа	Изменение питательных веществ, %			
	Корневая система	Листья	Стебли	Всего
Растения из колосьев, обработанных ПВС				
Вода	+5,2	+9,6	+4,4	+19,3
Белки	-27,2	+0,9	+4,6	-21,6
Жиры	+40,8	-1,6	+3,7	+42,9
Углеводы	+57,7	-4,1	+3,6	+57,2
Растения из колосьев, обработанных ПЛА				
Вода	-67,4	+5,9	+1,7	-59,7
Белки	-10,5	+1,4	+0,3	-9,3
Жиры	+40,8	0	+3,7	+44,5
Углеводы	+58,0	-1,6	+3,8	+60,3

• на основе анализа спектра корней сделан вывод о преобладающем положительном влиянии аморфного ПВС за счет сохранения большого количества влаги и сахаров. Эти вещества нужны как для развития корневой системы, так и для обеспечения хорошего питания растений при их развитии.

В целом, исходя из анализа интенсивностей ИК-полос установлено преобладание положитель-

ного влияния полностью аморфного полимерного материала, примером которого является ПВС. Поэтому для достижения наилучшего стимулирующего эффекта необходимо использовать ПВС-пленку для обработки колосьев перед высевом.

По интенсивности ИК-полос заметно более высокое содержание в растениях сахаров (положение -ОН групп) и белков при посеве колосьями, обработанными раствором полилактида.

Совокупность высоты растений и увеличения содержания питательных веществ в растениях из семян колосьев, завернутых в пленку ПВС, является фактором роста будущего урожая [14].

Выводы

Показали перспективность применения биоразлагаемых полимерных материалов из поливинилового спирта и полилактида для капсулирования колосьев, высеваемых колосковой сеялкой.

Склеивание путем оборачивания и/или напыления гидрофильных и полностью аморфных полимерных материалов, не препятствующих росту растений, позволит колосьям легче проходить по механизмам сеялки. Коэффициент вариации интервалов при посеве колосьев, завернутых в ПВС, в среднем ниже на 4,2% по сравнению с контрольными образцами и на 5,8% ниже при посеве колосьев, обработанных ПЛА.

Высота растений из колосьев, завернутых в ПВС, по сравнению с контролем увеличилась до 7% и до 57,2% повысилось содержание питательных веществ, как факторов будущего урожая.

Сочетание улучшенных посевных свойств и показателей продуктивности семян дает основание для выбора поливинилового спирта, как наиболее перспективного полимерного материала для использования в процессах селекции зерновых культур.

Задачи дальнейших исследований заключаются в обосновании технологии и параметров устройства для предпосевной обработки колосьев в условиях селекционного хозяйства, разработке рецептуры материала с различными добавками (фунгициды, гербициды, антибиотики, органические и минеральные удобрения) и обоснование технологии его крупносерийного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Камбулов С.И., Пархоменко Г.Г., Божко И.В., Бойко А.А. Результаты экспериментальных исследований сеялки для рядового посева СЗД4,0 // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N2. С. 41-45. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-41-55.
- Давыдова С.А., Чаплыгин М.Е. Техническая оснащённость селекции и семеноводства кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 66-74. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-66-74.
- Лобачевский, Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
- Кем А.А., Михальцов Е.М., Чекусов М.С., Шмидт А.Н. Сеялка для разноглубинного посева зерновых и внесения минеральных удобрений // *Сельскохозяйствен-*

- ные машины и технологии. 2022. Т. 16. N2. С. 62-68. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-62-68.
5. Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М., Чулков А.С., Подзоров А.В. Определение показателей ленто-кассетного высевающего устройства для селекционного посева зерновых культур колосьями // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 56-61. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-56-61.
 6. Завражнов А.А., Измайлов А.Ю., Завражнов А.И. и др. Инновационные технологии и технические средства для промышленного питомниководства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N4. С. 16-24. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-4-16-24.
 7. Шайхов М.М., Чулков А.С., Подзоров А.В. и др. Разработка однорядной сеялки с диско-кассетным высевающим устройством для посева зерновых культур колосьями // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 82-88. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-82-88.
 8. Шайхов М.К., Жалнин Э.В., Шайхов М.М., Блохин В.И. К разработке селекционной сеялки для посева зерновых культур колосьями // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N3(32). С. 114-120. EDN: SIXFHN.
 9. Бозарова Г.К., Хачатуров А.Е. Место биodeградируемых полимеров в общем объеме производства и использования пластиков // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. N4. С. 93-99. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-4-093-099.
 10. Гражулевичене В., Аугулис Л., Гражулевичюс Ю. В., Кушлене Г. Биodeградирующие композиты из поливинилового спирта и водосточного ила для сельскохозяйственных нужд // *Журнал прикладной химии*. 2009. Т. 82. N7. С. 1201-1204. EDN: NXSKVW.
 11. Подзорова, М.В., Тertyshnaya Ю.В. Перспективы применения полимерных материалов в сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. N5. С. 31-34. EDN: TCGGOH.
 12. Zhang B., Liu D., Xi X. et al. The analysis of the applications of crop seed tape sowing technology and equipment: a review. *Applied Sciences*. 2021. Т. 11. N23. 11228. DOI: 10.3390/app112311228.
 13. Павленок А.В., Давыдова О.В., Дробышевская Н.Е. и др. Получение и свойства биоразлагаемых композиционных материалов на основе поливинилового спирта и крахмала // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2018. N1(72). С. 38-46. EDN: XTGIQX.
 14. Косенко С.В., Кривобочек В. Г. Влияние высоты растений на урожайность и элементы продуктивности озимой мягкой пшеницы в условиях лесостепи Среднего Поволжья // *Нива Поволжья*. 2009. 3(12). С. 46-48. EDN: KUFTRD.

REFERENCES

1. Kambulov S.I., Parkhomenko G.G., Bozhko I.V., Boyko A.A. Results of experimental studies of the seed drill for row sowing SZD4.0. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N2. 41-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-41-55.
2. Davydova S.A., Chaplygin M.E. Technical equipment of corn breeding and seed production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N3. 66-74 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-66-74.
3. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
4. Kem A.A., Mikhaltsov E.M., Chekusov M.S., Shmidt A.N. Seeder for different depths of grain sowing and mineral fertilizers application. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 62-68 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-62-68.
5. Chaplygin M.E., Shaykhov M.M., Chulkov A.S., Podzorov A.V. Specifying the indicators of a breeding tape cassette sowing device for sowing grain crops by ears. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N2. 56-61 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-56-61.
6. Zavrazhnov A.A., Izmaylov A.Yu., Zavrazhnov A.I. et al. Innovative technologies and technical means for industrial nursery farming. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N4. 16-24 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-4-16-24.
7. Shaykhov M.M., Chulkov A.S., Podzorov A.V. et al. Development of a single-row ear seeder equipped with a disk-cassette sowing device. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 82-88 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-82-88.
8. Shaykhov M.K., Zhalnin E.V., Shaykhov M.M., Blokhin V.I. To development of selection seeder for sowing grain cultures by ears. *Bulletin of VIESH*. 2018. N3(32). 114-120 (In Russian). EDN: SIXFHN.
9. Bozarova G.K., Khachaturov A.E. The place of biodegradable polymers in the total volume of plastics production. *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. N4. 93-99 (In Russian). DOI: 10.25750/1995-4301-2020-4-093-099.
10. Grazhulevichene V., Augulis L., Grazhulyavicius Yu.V., Kushline G. Biodegradable composites of polyvinyl alcohol and sewage sludge for agricultural needs. *Journal of Applied Chemistry*. 2009. Vol. 82. N7. 1201-1204 (In Russian). EDN: NXSKVW.
11. Podzorova M.V., Tertyshnaya Yu.V. Prospects for application of polymeric materials for agricultural production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014. N5. 31-34 (In Russian). EDN: TCGGOH.
12. Zhang B., Liu D., Xi X. et al. The analysis of the applications of crop seed tape sowing technology and equipment:

- a review. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. N23. 11228 (In English). DOI:10.3390/app112311228.
13. Pavlenok A.V., Davydova O.V., Drobyshevskaya N.E. et al. Preparation and properties of biodegradable composite materials based on polyvinyl alcohol and starch. *Bulletin of the P.O. Sukhoi Gomel State Technical University*. 2018. N1(72). 38-46 (In Russian). EDN: XTGIQX.
14. Kosenko S.V., Krivobochek V.G. The influence of plant height on yield and productivity elements of winter soft wheat in the conditions of the forest-steppe of the Middle Volga region. *Niva Povolzhya*. 2009. 3(12). 46-48. EDN: KUFTRD.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Кульпина М.О. – научное руководство, формулирование основных целей и задач исследования, подготовка первоначального варианта текста, доработка текста, формирование общих выводов;

Чаплыгина Т.В. – формулирование основной концепции исследования ее целей и задач, подготовка первоначального варианта текста, анализ литературных источников, визуализация, доработка текста и оформление материалов, формирование частных и общих выводов;

Степанов К.А. – формулирование целей и задач, анализ литературных источников, визуализация, доработка текста и оформление материалов, формирование частных и общих выводов;

Блинов Н.Д. – формулирование целей и задач, подготовка первоначального варианта текста, анализ литературных источников, визуализация, доработка текста и оформление материалов, формирование частных и общих выводов, итоговая переработка статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kulpina M.O. – scientific supervision, formulation of the research primary goals and objectives, preparation of the draft manuscript, text refinement, and formulation of general conclusions;

Chaplygina T.V. – formulation of the main research concept, goals, and objectives, preparation of the draft manuscript, literature review, visualization, text refinement, material formatting, and development of specific and general conclusions;

Stepanov K.A. – formulation of the research goals and objectives, literature review, visualization, text refinement, material formatting, and development of specific and general conclusions;

Blinov N.D. – formulation of the research goals and objectives, preparation of the draft manuscript, literature review, visualization, text refinement, material formatting, development of specific and general conclusions, and manuscript 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

03.10.2024
29.11.2024

EDN: UIZOXV

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-71-78

Научная статья

УДК 628.9.037: 632.4



Прибор фотолюминесцентного контроля зараженности семян фузариозом

Максим Николаевич Московский,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

Михаил Владимирович Беляков,
доктор технических наук, главный научный
сотрудник, e-mail: bmw20100@mail.ru;
Игорь Юрьевич Ефременков,
младший научный сотрудник,
e-mail: matiusharius@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Болезни растений снижают урожайность сельскохозяйственных культур и могут серьезно повлиять на устойчивость аграрной отрасли. Для контроля и эффективной борьбы болезнями важно их выявлять на раннем этапе. Провели анализ оптических методов и приборов диагностики зараженности растений. *(Цель исследования)* Разработать прибор оптической фотолюминесцентной диагностики заражения семян злаковых растений фузариозом. *(Материалы и методы)* Исследовали зараженные фузариозом семена озимой пшеницы сорта Иришка 172 и ячменя Московский 86. *(Результаты и обсуждение)* В универсальном приборе, измеряющем зараженность пшеницы и ячменя, необходимо иметь три источника излучения с длиной волны 362, 424 и 485 нанометров. Для возбуждения люминесценции на длине волны 362 нанометра наиболее подходит светодиод VLMU3510-365-130, на 424 нанометра – светодиод CREELED424, на 485 нанометра – светодиод XPEBBL-L1. Для регистрации люминесценции семян в диапазонах 390-550 и 510-670 нанометров выбран фотодиод VEMD5510, а в диапазоне 450-600 нанометров – фотодиод BPW21R. Также выбраны микроконтроллер, операционный усилитель, дисплей, клавиатура и другие компоненты. Разработана структурная схема, включающая светооптический и электронный блоки, а также блок питания. При лабораторных испытаниях прототипа прибора «ЛЮМ ВИМ-1» получены зависимости фотосигналов при 362, 424 и 485 нанометрах для семян пшеницы и ячменя различной степени зараженности. Методика определения зараженности фузариозом включает пробоподготовку, возбуждение и регистрацию фотолюминесценции, усиление соотношения фотосигналов и расчет зараженности по градуировочным уравнениям. *(Выводы)* На основе критерия энергоэффективности выбраны источники и приемники излучения для прибора экспресс-контроля степени заражения фузариозом семян пшеницы и ячменя. В ходе лабораторных испытаний подтверждены ранее полученные зависимости потоков фотолюминесценции семян от зараженности и уточнены градуировочные характеристики разработанного прибора.

Ключевые слова: семена, заражение, фузариоз, пшеница, ячмень, метод контроля, фотолюминесценция, регрессионные модели, эффективная отдача излучения.

■ **Для цитирования:** Московский М.Н., Беляков М.В., Ефременков И.Ю. Прибор фотолюминесцентного контроля зараженности семян фузариозом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 71-78. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-71-78. EDN: UIZOXV.

Scientific article

Photoluminescent Device for Monitoring Fusarium Infection in Seeds

Maxim N. Moskovsky,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

Mikhail V. Belyakov,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: bmw20100@mail.ru;
Igor Yu. Efremenkov,
junior researcher, e-mail: matiusharius@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Plant diseases reduce crop yields and can significantly undermine the sustainability of the agricultural sector. Early detection is crucial for effective disease control and management. An analysis of optical methods and devices for diagnosing

plant infestations was carried out. (*Research purpose*) To develop a device for optical photoluminescence diagnostics of Fusarium infestation in cereal seeds. (*Materials and methods*) Fusarium-infected seeds of Irishka 172 winter wheat and Moskovsky 86 barley were studied. (*Results and discussion*) A universal device for measuring wheat and barley infestation must be equipped with three radiation sources, operating at wavelengths of 362, 424, and 485 nanometers. The *VLMU3510-365-130* LED is most suitable for exciting luminescence at 362 nanometers, the *CREELED424* LED is optimal for 424 nanometers, and the *XPEBBL-L1* LED is ideal for 485 nanometers. The *VEMD5510* photodiode was chosen to detect seed luminescence in the ranges of 390–550 and 510–670 nanometers, while the *BPW21R* photodiode was selected for the range of 450–600 nanometers. Additionally, a microcontroller, operational amplifier, display, keyboard and other components were also selected. A block diagram was developed that includes incorporating light-optical and electronic units, along with a power supply. During laboratory tests of the LUM VIM-1 device prototype, photosignal responses were observed at 362, 424 and 485 nanometers for wheat and barley seeds with varying infestation levels. The method for determining Fusarium infection includes sample preparation, excitation and detection of photoluminescence, amplification of the photoluminescence signal ratio, and calculation of infection levels using calibration equations. (*Conclusions*) Based on the energy efficiency criterion, radiation sources and receivers were selected for the device used in the express monitoring of Fusarium infection levels in wheat and barley seeds. During laboratory tests, previously obtained dependencies of seed photoluminescence fluxes on infection levels were confirmed, and the calibration characteristics of the developed device were refined.

Keywords: seeds, infection, Fusarium, wheat, barley, control method, photoluminescence, regression models, radiation efficiency.

■ **For citation:** Moskovsky M.N., Belyakov M.V., Efremkov I.Yu. Photoluminescent device for monitoring Fusarium infection in seeds. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 71-78 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-71-78. EDN: UIZOXV.

Для современного сельского хозяйства необходима оптимизация управления производством путем внедрения новейших технологий и снижения расходов [1]. В связи с этим актуально привлечение современной вычислительной микропроцессорной техники и цифровых технологий [2]. К основным факторам, влияющим на потери урожая, относятся болезни сельскохозяйственных растений. В результате заражения культур снижается их продуктивность, что может серьезно повлиять на устойчивость отрасли. Для производителей растениеводческой продукции важно контролировать, выявлять болезни на раннем этапе и эффективно с ними бороться. Повысить производительность, снизить затраты, обеспечить экологическую безопасность, в том числе путем предотвращения случаев заболеваний растений, возможно за счет создания и внедрения средств автоматизации, роботизации, цифровых технологий, искусственного интеллекта [3].

Оперативность принятия управленческих решений зависит от наличия актуальной информации. Традиционно болезни растений выявляют путем интерпретации визуальных симптомов с последующей лабораторной оценкой [4]. Эти методы требуют навыков и опыта в определении патологии, значительного времени для завершения диагностики, дорогостоящих химических реактивов и оборудования. Развитие технологий машинного зрения и дистанционного зондирования для обнаружения и идентификации больных растений позволяют надежно, точно и быстро оценить болезнь [5].

Технологии зондирования и идентификации основаны на измерении оптических свойств растений

в различных спектральных диапазонах. Методы оптической визуализации *RGB*, мульти- и гиперспектральные датчики, термография или флуоресценция хлорофилла доказали свой потенциал в автоматизированных объективных и воспроизводимых системах идентификации и количественной оценки болезней растений на ранних этапах проявления и распространения [6].

С помощью инфракрасной термографии, визуализации флуоресценции хлорофилла и гиперспектральной визуализации проводили мониторинг фузариозного поражения пшеницы на чешуе колосков. Для категоризации сорного риса из культивируемого использовалась спектроскопия в ближнем инфракрасном диапазоне с приставкой для определения коэффициента отражения [7]. В качестве средства оценки микробного загрязнения и времени хранения листовых зеленых овощей использовали спектральный анализ отражения в ближней инфракрасной области и пропускания (поглощения) в видимой области [8]. Проводился анализ эффективности раннего выявления трех эндемичных для Европы болезней пшеницы – септориоза, ржавчины и пятнистости [9].

Гиперспектральная визуализация используется для обнаружения фузариоза [10]. Гиперспектральные изображения были получены в диапазоне длины волн 400–1000 нм. На основе датчиков спектров отражения разработана автоматизированная система обнаружения и мониторинга миртовой ржавчины [11].

С использованием флуоресценции хлорофилла и гиперспектральной визуализации возможно определить инфицирование пшеницы *Fusarium spec.* [12].

Для обнаружения бурой ржавчины озимой пшеницы разработано оптическое сенсорное устройство, которое возбуждает флуоресценцию хлорофилла на дискретных длинах волн и выявляет индуцированное излучение [13].

Для мониторинга здоровья растений используются дистанционные датчики, как способ неразрушающего контроля и количественной оценки болезней растений на различных уровнях измерения. Применение на различных платформах этих опτικο-электронных датчиков открывает новые возможности для прогнозирования стресса, болезней растений и реагирования на них. Переносные приборы измерения коэффициента отражения в ближней инфракрасной области использованы при оценке кормов на фермах, в том числе прогнозирования уровня сырого протеина, кислотно-детергентной клетчатки и других компонентов [14].

Для анализа распределения содержания хлорофилла в целых листьях было разработано устройство *LeafScanner* на основе светодиодов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, позволяющее получать изображения в данных областях спектра [15]. В этих же целях в диапазоне 400-1000 нм разработан детектор хлорофилла сельскохозяйственных культур на основе оптического сенсора с интерференционным фильтром [16]. Предложена портативная система ближней инфракрасной спектроскопии для быстрого измерения содержания воды в листьях рапса. Для сбора спектров использовали интегрированный спектрометр от 900 до 1700 нм [17].

Показана результативность использования многокритериальной экспресс-аналитической колориметрической установки фотосепарации зерен пшеницы для определения зараженности фузариозом и головней [18].

Вместе с тем недостаточно внимания уделяется люминесцентным методам и приборам определения заражения растений, которые тоже позволяют с высокой чувствительностью, но меньшими затратами диагностировать патологии растений.

Цель исследования – разработка прибора оптической фотолюминесцентной диагностики инфицирования фузариозом семян злаковых растений. Для этого необходимо на основе ранее полученных спектральных характеристик установить зависимости люминесцентных потоков от зараженности и разработать методику определения доли пораженных болезнью семян в пробе. Для практической реализации методики выбрать узлы и детали прибора по критерию энергоэффективности.

Материалы и методы. В качестве образцов исследованы семена озимой пшеницы сорта Иришка 172 и ячменя сорта Московский 86. Степень заражения семян определяли по ГОСТ 31646-2012

«Зерновые культуры. Метод определения содержания фузариозных зерен». Кроме того, для определения токсина Т-2 по флуоресценции в длинноволновом ультрафиолетовом свете использовали метод хроматографии (ГОСТ 28001-88 «Зерно фуражное, продукты его переработки, комбикорма. Методы определения микотоксинов: Т-2 токсина, зеараленона (Ф-2) и охратоксина А»).

На основе ранее полученных результатов для длин волн максимумов возбуждения λ_e (362, 424 и 485 нм) измерили спектры люминесценции $\varphi_l(\lambda)$ и рассчитали интегральные потоки в спектральных диапазонах соответственно 390-550, 450-600, 510-670 нм [19].

Потоки фотолюминесценции Φ были рассчитаны с использованием программного пакета *Panorama Pro*:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_l(\lambda) d\lambda, \text{ отн. ед.}, \quad (1)$$

где $\varphi_l(\lambda)$ – спектральная характеристика фотолюминесценции, отн. ед/нм; λ_1 - λ_2 – границы рабочего спектрального диапазона фотолюминесценции, нм.

Критерием энергоэффективности для выбора источника и приемника излучения была эффективная отдача излучения:

$$k_{\text{эф}} = \frac{\Phi_{\text{эф}}}{\Phi_{\text{полн}}} = \frac{\int_0^\infty \varphi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{эф}}$ – эффективный поток, отн. ед.; $\Phi_{\text{полн}}$ – полный поток излучения, отн. ед.; $S(\lambda)$ – спектральная чувствительность приемника излучения, отн. ед/нм; $\varphi(\lambda)$ – спектр излучения источника, отн. ед/нм.

Результаты и обсуждение. Ранее авторами были получены градуировочные уравнения [20]:

для пшеницы

$$\beta = 287 \frac{\Phi_{362}}{\Phi_{424}} - 137, \quad (3)$$

для ячменя

$$\beta = 245 \frac{\Phi_{362}}{\Phi_{485}} - 57. \quad (4)$$

Коэффициенты детерминации R^2 для уравнений (3) и (4) равны соответственно 0,88 и 0,96.

На основе полученных результатов разработана методика определения степени заражения семян фузариозом, включающая следующие этапы.

1. Подготовка проб, в том числе отбор по ГОСТ 12036-85 «Семена сельскохозяйственных культур. Правила приемки и методы отбора проб». Затем пробы помещают в темную светонепроницаемую камеру.

2. Возбуждение фотолюминесценции в течение 20 мкс последовательно двумя источниками излучения.

3. Люминесценция через $0,75^{-1}$ мкс регистрируется после выключения источника излучения двумя фотоприемниками.

4. Электрический сигнал (отношение сигналов) с приемников усиливается усилителем, преобразуется в цифровую форму и поступает на микроконтроллер.

5. На микроконтроллере происходит расчет степени заражения с учетом фотосигнала и градуировочных уравнений (3), (4).

6. Результат поступает на выходное индикаторное устройство. По полученным данным принимается решение о возможных дальнейших действиях с семенами.

В универсальном приборе для измерения зараженности пшеницы и ячменя необходимы три источника излучения: 362, 424 и 485 нм. Наиболее предпочтительны светодиоды, имеющие узкий спектр и отличное быстродействие, дающее возможность переключать источники.

Главным численным критерием выбора светодиода является его эффективная отдача ($k_{\text{эф,сд}}$) при возбуждении, определяемая по формуле (2). К другим критериям относятся величина потока излучения и угол свечения. Результаты расчетов эффективной отдачи светодиодов представлены в таблице 1.

Таблица 1 Table 1		
РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ОТДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ RESULTS OF CALCULATING THE EFFECTIVE LED RADIATION OUTPUT		
Длина волны возбуждения, нм	Источник излучения	$k_{\text{эф,сд}}$
362	VLMU3510-365-130	0,98
	NICHIA NCSU276A	0,97
	NICHIA NVSU233B	0,97
	NICHIA NCSU033C	0,97
424	CREELED424	0,95
	LHUV-0420-0550	0,94
	LZ4-00UA00-00U6	0,73
485	XPEBBL-LI-0000-00201	0,93
	MLEBLU-AI-0000-000T01	0,90
	LICUBLU1000000000	0,92

Для возбуждения люминесценции при $\lambda_b = 362$ нм лучше всего подходит светодиод VLMU3510-365-130: $k_{\text{эф,сд}} = 0,98$ (максимальный из предложенных источников излучения), угол излучения $\varphi = 160^\circ$, поток излучения $\Phi_{\text{эф}} = 0,95$ Вт.

Светодиод CREELED424 самый оптимальный для возбуждения люминесценции на длине волны 424 нм благодаря близкому к единице значению $k_{\text{эф,сд}}$, широкому углу излучения и относительно большому потоку $\Phi_{\text{эф}} = 0,8$ Вт.

Наиболее подходящий для $\lambda_b = 485$ нм светодиод XPEBBL-LI-0000-00201 из-за высокого $k_{\text{эф,сд}}$ и потока излучения $\Phi_{\text{эф}} = 3,5$ Вт. Хотя у данного светодиода угол излучения на 10° меньше, чем у аналогичных излучателей, это не является критичным.

Главным условием выбора приемника излучения также является согласование спектра чувствительности приемника излучения со спектром фотолюминесценции семян, определяемое коэффициентом $K_{\text{эф}}$. Кроме того важны интегральная чувствительность и темновой ток. В качестве приемника излучения наиболее оптимальны фотодиоды с высоким быстродействием и малыми габаритными размерами.

Для регистрации люминесценции в диапазонах 390-550, 450-600, 510-670 нм рассматривались несколько фотодиодов по их эффективной отдаче люминесценции (табл. 2).

Таблица 2 Table 2		
РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ОТДАЧИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ для фотодиодов RESULTS OF CALCULATING THE EFFECTIVE LUMINESCENCE OUTPUT FOR PHOTODIODES		
Диапазон регистрации излучения, нм	Приемник излучения	$k_{\text{эф,сд}}$
380-550	VEMD5510CF	0,68
	FGAP71	0,66
	Hamamatsu S8265	0,75
	Hamamatsu S1133	0,79
450-600	Hamamatsu S7686	0,49
	BPW21R	0,87
	VBPW34S	0,26
510-670	VEMD5510CF	0,76
	SFH 2711	0,79
	SLD-70 BG2A	0,89

При использовании фотодиода Hamamatsu S1133 для регистрации люминесценции семян в диапазоне 390-550 нм коэффициент $K_{\text{эф,фд}} = 0,79$, т.е. он максимальный. Но для данного диапазона этот фотодиод слишком широкополосный, регистрирует излучение до 730 нм.

По этой причине выбран фотодиод VEMD5510CF ($K_{\text{эф,фд}} = 0,79$), к его преимуществам также относится оптимальный диапазон регистрации потока. Но значение темнового тока составляет $2 \cdot 10^5$ фА, т.е. максимальное из всех предложенных приемников для $\lambda_b = 362$ нм, и в дальнейшем может негативно повлиять на измерения низкой интенсивности излучения люминесценции. Длина волны наибольшей чувствительности составляет 540 нм, а пики полученных спектральных характеристик люминесценции при $\lambda_b = 362$ нм находятся в диапазоне 450-480 нм, чувствительность $S = 0,2$ А/Вт. Следовательно, поток фотолюминесценции должен быть достаточно мощным, чтобы в дальнейшем его мог зарегистрировать данный фотодиод (<https://www.vishay.com/docs/84387/vemd5510cf.pdf>; accessed: 2023-01-09).

Для регистрации люминесценции в пределах 450–600 нм оптимальным по спектральному диапазону и коэффициенту эффективной отдачи люминесценции является *BPW21R* (<https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/vishay/81519.pdf>; accessed: 2023-01-09). Его чувствительность $S = 0,009$ А/Вт, а величина темнового тока составляет $2 \cdot 10^{-7}$ фА.

Значения $K_{\text{эф,ФД}}$ наибольшие у фотодиода *SLD-70 BG2A*, но достаточно широкий диапазон делает его не самым лучшим для спектра волн 510–670 нм, поэтому выберем фотодиод *VEMD5510CF* (<https://www.vishay.com/docs/84387/vemd5510cf.pdf>; accessed: 2023-01-09).

Для предотвращения перекрытия диапазонов излучения источника и чувствительности приемника в предлагаемых пределах регистрации люминесценции использование задержки измерений является обязательным. Время между облучением семян и регистрацией потока фотолюминесценции должно быть близко к 0,75–1 мкс.

В качестве микроконтроллера решено использовать *ATmega328P*, а в качестве операционного усилителя *AD820ANZ*. Для устройства визуализации выбран экран *LCD 2004 с I2C*. Экран способен отображать одновременно до 80 символов (20 столбцов и 4 строки), что достаточно для вывода названия сельскохозяйственной культуры, сигнала с фотодиодов, уравнений регрессии, а также итогового значения заражения β (%).

Ввод данных осуществляется клавиатурой через обращение к операциям, проводимым в процессоре и отображаемым на экране. Клавиатура выполнена в виде матрицы 4×4, каждая кнопка является областью воздушного зазора между двумя диэлектрическими слоями с нанесенными на них токопроводящими покрытиями.

Потребляемая мощность составляет 11266 мВт, потребляемый ток 2686 мА не должен превышать ток нагрузки источника напряжения.

Питание прибора будет осуществляться от трех литий-ионных аккумуляторов, соединенных последовательно.

Для реализации методики определения степени заражения фузариозом разработана структурная схема прибора (рис. 1). Условно схему можно разделить на блоки: светооптический, электронный и блок питания.

Светооптический блок включает в себя три балластных резистора, три светодиода с разной длиной волны излучения, три фотодиода с разным спектральным диапазоном, а также три операционных усилителя сигнала с фотодиодов и передачи на микроконтроллер.

Электронный блок состоит из микроконтроллера с подключенным к нему дисплеем.

В **блок питания** входит источник питания с тремя подключенными последовательно аккумуляторами суммарным напряжением при максимальном

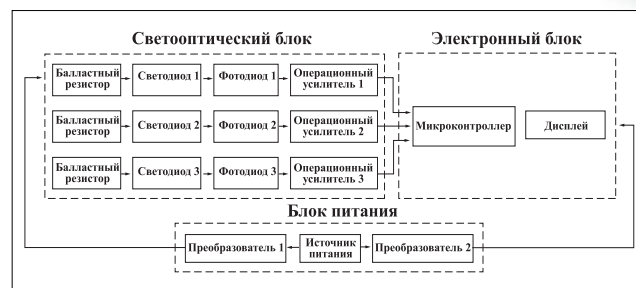


Рис. 1. Обобщенная структурная схема прибора для определения степени заражения семян

Fig. 1. Generalized block diagram of the device for determining seed infection levels

заряде 12,6 В и с двумя *DC-DC* преобразователями. Преобразователь 1 уменьшает напряжение питания до 5 В и подает на светооптический блок, преобразователь 2 уменьшает напряжение питания до 9 В и подает его на электронный блок.

Конструктивно корпус будет состоять из нескольких блоков, изготовленных при помощи 3D-принтеров из *ABS*-пластика на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Благодаря свойствам этих компонентов возможно создавать ударопрочные, термостойкие изделия.

Светооптический блок состоит из трех частей:

- светонепроницаемого черного контейнера в виде куба с закругленными гранями и прямоугольным вырезом для резервуара с семенами;

- черной измерительной камеры для исследуемых семян с ручкой для удобного извлечения;

- шести шарниров (для трех источников и приемников) с регулировкой по вертикали и горизонтали с целью получения максимального сигнала люминесценции семян.

Соединительная часть совместно с верхней образуют электронный блок. В верхней части предусмотрены отверстия для дисплея, кнопки выключения и выдавленная область под клавиатуру 4×4. Общая 3D-модель корпуса и внешний вид прототипа прибора представлены на рисунке 2.

При лабораторных испытаниях прототипа прибора (рабочее название «ЛЮМ ВИМ-1») были измерены фотонапряжения $U_{\text{ф,362}}$, $U_{\text{ф,424}}$, $U_{\text{ф,485}}$ для фотолюминесценции семян пшеницы и ячменя различной зараженности β .

При этом фотосигналы

$$U_{\text{ф}} = U - U_{\text{т}}, \quad (5)$$

где U – общее напряжение на фотодиоде; $U_{\text{т}}$ – темновое напряжение;

$$U_{\text{ф}} = S_{\text{У}} \cdot \Phi, \quad (6)$$

где $S_{\text{У}}$ – вольтовая чувствительность фотодиода.

Отличие градуировочных уравнений $\Phi(\beta)$ от показаний прибора $U(\beta)$ объясняется темновым на-



Рис. 2. 3D-модель корпуса (слева) и внешний вид прототипа оптического устройства экспресс-диагностики заражения семян фузариозом (справа)

Fig. 2. 3D model of the case (left) and the prototype of the optical device for rapid diagnosis of Fusarium infected seed (right)

пряжением и чувствительностью фотодиодов. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 3.

Сравнивая зависимости (3) и (4) с результатами в таблице 3, можно отметить, что для семян пшеницы при увеличении зараженности фотонапряжение $U_{\phi,362}$ растет, хотя значение его невелико. Фотосигнал $U_{\phi,424}$ незначительно растет, фотосигнал $U_{\phi,485}$ изменяется несистемно. Результаты испытаний семян ячменя гораздо лучше совпадают с ранее полученными по формуле (4). Сохраняется тенденция роста $U_{\phi,362}$ и снижения $U_{\phi,485}$ при увеличении зараженности. Сигнал $U_{\phi,424}$ изменяется несистемно. С учетом результатов лабораторных испытаний формулы (3) и (4) могут быть записаны в виде:

для пшеницы

$$\beta = 12746 \frac{U_{\phi,362}}{U_{\phi,424}} - 50, \quad (7)$$

для ячменя

$$\beta = 7035 \frac{U_{\phi,362}}{U_{\phi,485}} - 22. \quad (8)$$

Таблица 3		Table 3		
РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОТОТИПА ПРИБОРА «ЛЮМ ВИМ-1» RESULTS OF LABORATORY TESTS FOR THE LUM VIM-1 DEVICE PROTOTYPE				
Культура	β , %	$U_{\phi,362}$, мВ	$U_{\phi,424}$, мВ	$U_{\phi,485}$, мВ
Пшеница	0	4,89	968	166
	25	4,89	987	406
	50	9,78	997	386
	75	9,78	982	694
	100	9,78	1036	313
Ячмень	0	4,89	880	1457
	25	9,78	865	1320
	50	14,66	934	1329
	75	14,66	938	1325
	100	19,55	943	1085

Коэффициенты детерминации 0,71 и 0,93 соответственно. Сравнительно малый сигнал с первого фотодиода стал причиной снижения коэффициента детерминации для семян пшеницы и в меньшей степени для ячменя.

Выводы

Методика определения зараженности семян фузариозом включает: пробоподготовку, возбуждение и регистрацию фотолюминесценции в спектральных диапазонах 390-550, 450-600 и 510-670 нм, усиление соотношения фотосигналов и расчет зараженности на основе градуировочных уравнений.

На основе критерия энергоэффективности (эффektivной отдачи излучения $k_{эф}$) выбраны источники и приемники излучения для прибора экспресс-контроля степени заражения фузариозом на примере семян пшеницы и ячменя.

В лабораторных испытаниях в целом подтверждены ранее полученные зависимости потоков фотолюминесценции от зараженности и уточнены градуировочные характеристики разработанного прибора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К. и др. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
- Альт В.В., Исакова С.П. Планирование производства продукции растениеводства с применением цифровых технологий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N3. С. 12-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-12-19.
- Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
- Alemu K. Detection of diseases, identification and diversity of viruses: A review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. 2015. N5(1). 132-141.
- Mohd Ali M., Bachik N.A., Muhadi N.A. et al. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2019. 108. 101426. DOI: 10.1016/j.pmp.2019.101426.
- Mahlein A.-K., Alisaac E., Al Masri A. et al. Comparison and combination of thermal, fluorescence, and hyperspectral imaging for monitoring Fusarium head blight of wheat on spikelet scale. *Sensors*. 2019. N19(10). 2281. DOI: 10.3390/s19102281.

7. Makmuang S., Nootchanat S., Ekgsat S., Wongravee K. Non-destructive method for discrimination of weedy rice using near infrared spectroscopy and modified Self-Organizing Maps (SOMs). *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. 191. 106522. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106522.
8. Tsakanikas P., Fengou L.-C., Manthou E. et al. A unified spectra analysis workflow for the assessment of microbial contamination of ready-to-eat green salads: Comparative study and application of non-invasive sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N155. 212-219. DOI: 10.1016/j.compag.2018.10.025.
9. Johannes A., Picon A., Alvarez-Gila A. et al. Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. N138. 200-209. DOI: 10.1016/j.compag.2017.04.013.
10. Zhang D.-Y., Chen G., Yin X. et al. Integrating spectral and image data to detect Fusarium head blight of wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. N175. 105588. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105588.
11. Heim R.H.J., Wright I.J., Chang H.C. et al. Detecting myrtle rust (*Austropucciniopsis*) on lemon myrtle trees using spectral signatures and machine learning. *Plant Pathology*. 2018. N67(5). 1114-1121. DOI: 10.1111/ppa.12830.
12. Bauriegel E., Herppich W.B. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging for early detection of plant diseases, with special reference to Fusarium spec. infections on wheat. *Agriculture*. 2014. 4(1). 32-57. DOI: 10.3390/AGRICULTURE4010032.
13. Tischler Y.K., Thiessen E., Hartung E. Early optical detection of infection with brown rust in winter wheat by chlorophyll fluorescence excitation spectra. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N146. 77-85. DOI: 10.3389/fpls.2019.01239.
14. Berzaghi P., Cherney J.H., Casler M.D. Prediction performance of portable near infrared reflectance instruments using preprocessed dried, ground forage samples. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. N182. 106013. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106013.
15. Zhang L., Wang L., Wang J. et al. Leaf Scanner: A portable and low-cost multispectral corn leaf scanning device for precise phenotyping. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N167. 105069. DOI: 10.1016/j.compag.2019.105069.
16. Song D., Qiao L., Gao D. et al. Development of crop chlorophyll detector based on a type of interference filter optical sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. 187. 106260. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106260.
17. Zhou L., Zhang C., Taha M.F. et al. Determination of leaf water content with a portable NIRS system based on deep learning and information fusion analysis. *Transactions of the ASABE*. 2021. N64(1). 127-135. DOI: 10.13031/trans.13989.
18. Лебедев Д.В., Рожков Е.А. Отсортровка по цвету зараженных фузариозом и головней семян пшеницы в многокритериальном фотоэлектронном сепараторе // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N 4(37). С. 25-29.
19. Bashilov A.M., Efremkov I.Y., Belyakov M.V. et al. Determination of main spectral and luminescent characteristics of winter wheat seeds infected with pathogenic microflora. *Photonics*. 2021. N8. 494. DOI: 10.3390/photonics8110494.
20. Moskovskiy M.N., Belyakov M.V., Dorokhov A.S. et al. Design of device for optical luminescent diagnostic of the seeds infected by *Fusarium*. *Agriculture*. 2023. N13(3). 619. DOI: 10.3390/agriculture13030619.

REFERENCES

1. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Khoroshenkov V.K. et al. Optimization of technological process control in crop production *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 4-11 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
2. Alt V.V., Isakova S.P. Crop production planning using digital technologies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N3. 12-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-12-19.
3. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. N15(4). 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
4. Alemu K. Detection of diseases, identification and diversity of viruses: A review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. 2015. N5(1) 132-141 (In English).
5. Mohd Ali M., Bachik N.A., Muhadi N.A. et al. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2019. 108. 101426 (In English). DOI: 10.1016/j.pmpp.2019.101426.
6. Mahlein A.-K., Alisaac E., Al Masri A. et al. Comparison and combination of thermal, fluorescence, and hyperspectral imaging for monitoring Fusarium head blight of wheat on spikelet scale. *Sensors*. 2019. N19(10). 2281 (In English). DOI: 10.3390/s19102281.
7. Makmuang S., Nootchanat S., Ekgsat S., Wongravee K. Non-destructive method for discrimination of weedy rice using near infrared spectroscopy and modified Self-Organizing Maps (SOMs). *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. N191. 106522 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2021.106522.
8. Tsakanikas P., Fengou L.-C., Manthou E. et al. A unified spectra analysis workflow for the assessment of microbial contamination of ready-to-eat green salads: Comparative study and application of non-invasive sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N155. 212-219 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2018.10.025.
9. Johannes A., Picon A., Alvarez-Gila A. et al. Automatic

- plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. 138. 200-209 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2017.04.013.
10. Zhang D.-Y., Chen G., Yin X. et al. Integrating spectral and image data to detect Fusarium head blight of wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. N175. 105588 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2020.105588.
 11. Heim R.H.J., Wright I.J., Chang H.C. et al. Detecting myrtle rust (*Austropuccinia psidii*) on lemon myrtle trees using spectral signatures and machine learning. *Plant Pathology*. 2018. N67(5). 1114-1121 (In English). DOI: 10.1111/ppa.12830.
 12. Bauriegel E., Herppich W.B. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging for early detection of plant diseases, with special reference to Fusarium spec. infections on wheat. *Agriculture*. 2014. N4(1). 32-57 (In English). DOI: 10.3390/AGRICULTURE4010032.
 13. Tischler Y.K., Thiessen E., Hartung E. Early optical detection of infection with brown rust in winter wheat by chlorophyll fluorescence excitation spectra. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N146. 77-85 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2019.01239.
 14. Berzaghi P., Cherney J.H., Casler M.D. Prediction performance of portable near infrared reflectance instruments using preprocessed dried, ground forage samples. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. N182. 106013 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2021.106013.
 15. Zhang L., Wang L., Wang J. et al. Leaf Scanner: a portable and low-cost multispectral corn leaf scanning device for precise phenotyping. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N167. 105069 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2019.105069.
 16. Song D., Qiao L., Gao D. et al. Development of crop chlorophyll detector based on a type of interference filter optical sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. N187. 106260 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2021.106260.
 17. Zhou L., Zhang C., Taha M.F. et al. Determination of leaf water content with a portable NIRS system based on deep learning and information fusion analysis. *Transactions of the ASABE*. 2021. N64(1). 127-135 (In English). DOI: 10.13031/trans.13989.
 18. Lebedev D.V., Rozhkov E.A. Sorting by color of wheat seeds infected with fusarium and smut in a multicriteria photoelectronic separator. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2019. N 4(37). 25-29 (In Russian).
 19. Bashilov A.M., Efremkov I.Y., Belyakov M.V. et al. Determination of main spectral and luminescent characteristics of winter wheat seeds infected with pathogenic microflora. *Photonics*. 2021. N8. 494 (In English). DOI: 10.3390/photonics8110494.
 20. Moskovskiy M.N., Belyakov M.V., Dorokhov A.S. et al. Design of device for optical luminescent diagnostic of the seeds infected by Fusarium. *Agriculture*. 2023. N13(3). 619 (In English). DOI: 10.3390/agriculture13030619.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Московский М.Н. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок;
Беляков М.В. – формулирование основных направлений исследования, обзор литературы, обработка результатов исследований, доработка текста, формирование общих выводов;
Ефремов И.Ю. – получение исследуемых образцов, проведение измерений и расчетов, обработка результатов, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Moskovsky M.N. – scientific supervision, formulation of the main research directions, development of theoretical premises.
Belyakov M.V. – formulation of the main research directions, literature review, processing of research results, refinement of the manuscript, formulation of general conclusions.
Efremkov I.Yu. – obtaining the samples under study, conducting measurements and calculations, processing research results, 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

28.08.2024
25.10.2024

EDN: VCWBKC

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-79-85



Научная статья

УДК 631.171



Интеллектуальная полевая сенсорная станция для мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования в системе точного земледелия

Сергей Анатольевич Васильев^{1,2},
доктор технических наук, профессор,
e-mail: vsa_21@mail.ru;

Сергей Евгеньевич Лимонов^{1,2},
аспирант,
e-mail: limonov.msf@gmail.com;

Сергей Александрович Мишин²,
ассистент,
e-mail: supers.ya@yandex.ru

¹Княгининский университет, г. Княгинино, Российская Федерация;

²Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Российская Федерация

Реферат. Современные тенденции в сельском хозяйстве свидетельствуют о широком внедрении информационных технологий и сети датчиков интернета вещей для мониторинга агрофизических параметров почвы и фенотипирования объектов. Этот подход обеспечивает точный анализ данных в реальном времени, способствуя оптимизации агротехнических процессов и созданию адаптивных систем управления. Слияние информационных технологий с мониторингом агрофизических параметров и фенотипирования объектов подчеркивает стратегическую важность данного подхода, особенно в условиях изменчивости климата и необходимости повышения устойчивости производства. *(Цель исследования)* Разработать интеллектуальную полевую сенсорную станцию, обеспечивающую высокую точность мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования растений в реальном времени с использованием сети датчиков интернета вещей. *(Материалы и методы)* Проанализированы и изучены существующие методы мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования объектов. На основе различных методов мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования объектов разработана конструкция и выбраны датчики для интеллектуальной полевой сенсорной станции. *(Результаты и обсуждение)* Интеллектуальная полевая сенсорная станция успешно продемонстрировала свою эффективность, подтвердив работоспособность и надежность в одновременном получении данных. Собранные данные об агрофизических параметрах почвы, метеорологических условиях и фенотипе растений предоставляют обширную информацию для точного земледелия и оптимизации сельскохозяйственных процессов. *(Выводы)* Светло-серая лесная почва с высокой пористостью и нейтральным уровнем pH благоприятна для возделывания сельскохозяйственных культур. Предварительный химический анализ почвы выявил умеренные значения содержания органического вещества, подвижного фосфора и калия, что указывает на потенциально плодородный участок. Метеорологические данные представляли собой ключевой аспект для агрометеорологического анализа, который в свою очередь оказывает существенное влияние на сельскохозяйственные процессы. Разработанная станция представляет инновационный взгляд на мониторинг сельскохозяйственных параметров, обещая перспективы в современном земледелии.

Ключевые слова: агрофизические параметры, фенотипирование растений, точное земледелие, датчики интернета вещей, полевая станция, техническое средство, инновационные технологии.

■ **Для цитирования:** Васильев С.А., Лимонов С.Е., Мишин С.А. Интеллектуальная полевая сенсорная станция для мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования в системе точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 79-85. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-79-85. EDN: VCWBKC.

Scientific article

Intelligent Field Sensor Station for Monitoring Agrophysical Parameters and Phenotyping in Precision Agriculture System

Sergey A. Vasilyev^{1,2},
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: vsa_21@mail.ru;

Sergey Ye. Limonov^{1,2},
Ph.D.(Eng.) student, e-mail: limonov.msf@gmail.com;

Sergey A. Mishin²,
assistant of the department,
e-mail: supers.ya@yandex.ru

¹Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics (Knyaginino University), Knyaginino, Russian Federation;

²Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation

Abstract. Current trends in agriculture highlight the widespread adoption of information technology and Internet of Things (IoT) sensor networks for monitoring agrophysical soil parameters and phenotyping objects. This approach enables precise, real-time data analysis, optimizing agricultural processes and supporting the development of adaptive management systems. The integration of information technology with the monitoring of agrophysical parameters and phenotyping objects underscores the strategic importance of this approach, especially in the context of climate variability and the growing need to enhance production sustainability. *(Research purpose)* To develop an intelligent field sensor station for precision farming that ensures high-accuracy, real-time monitoring of agrophysical parameters and plant phenotyping using an Internet of Things sensor network. *(Materials and methods)* Existing methods for monitoring agrophysical parameters and phenotyping objects were analyzed. Based on these methods, a design for an intelligent field sensor station was developed, and suitable sensors were selected. *(Results and discussion)* The intelligent field sensor station successfully demonstrated its efficiency, confirming both its functionality and reliability in simultaneous data collection. The data collected on soil agrophysical parameters, meteorological conditions and plant phenotyping provide extensive knowledge for precision farming and optimizing agricultural processes. *(Conclusions)* Light gray forest soil with high porosity and neutral pH level provided favorable conditions for crops. Preliminary chemical analysis of the soil revealed moderate levels of organic matter, mobile phosphorus, and potassium, indicating a potentially fertile site. Meteorological data played a key role in agrometeorological analysis, significantly impacting agricultural processes. The developed station introduces an innovative approach to monitoring agricultural parameters, offering promising prospects for modern agriculture.

Keywords: agrophysical parameters, plant phenotyping, precision farming, Internet of Things, IoT sensors, field station, technical means, innovative technologies.

■ **For citation:** Vasiliev S.A., Limonov S.E., Mishin S.A. Intelligent field sensor station for monitoring agrophysical parameters and phenotyping in precision agriculture system. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 79-85 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-79-85. EDN: VCWBKC.

Современные тенденции в растениеводстве свидетельствуют о все более широком использовании информационных технологий для улучшения методов наблюдения и обработки почвенных данных на сельскохозяйственных угодьях. Основой этой эволюции становятся современные аппаратно-программные комплексы, включающие в себя сеть датчиков интернета вещей, которые направлены на сбор и анализ цифровой информации в течение вегетационного периода [1]. Это открывает перспективы для разработки интеллектуальных средств наблюдения, способных собирать и обрабатывать информацию об агротехнических показателях на полевых угодьях.

Агрофизические показатели плодородия почв, такие как гранулометрический и минералогический состав, структура, плотность, порозность, воздухоёмкость и влагоёмкость, а также агротехнологические параметры, представляют собой существенные характеристики, определяющие условия для развития растений [2]. Эти параметры создают оптимальные условия для водного, воздушного, теплового и питательного режимов, влияя на урожайность и качество сельскохозяйственных культур. Динамичность перечисленных показателей в течение вегетационного периода подчеркивает необходимость систематического мониторинга для эффективного управления земельными ресурсами.

Слияние информационных технологий с мониторингом агрофизических показателей плодородия почвы приобретает стратегическую важность в кон-

тексте современного сельского хозяйства [3]. Актуальность этого подхода проявляется в возможности для сельскохозяйственных предприятий не только оптимизировать текущие агротехнические процессы, но и создавать адаптивные системы управления, способные эффективно реагировать на изменчивость окружающей среды.

Информационные технологии и сеть датчиков интернета вещей предоставляют доступ к реальным временным данным, а также возможность более точно оценивать агрофизические параметры почвы в динамике вегетационного периода [4]. Это позволяет выстраивать стратегии управления ресурсами, основанные на конкретных потребностях почвы и растений [5].

Учитывая нестабильность климатических условий, давление на устойчивость сельского хозяйства и необходимость повышения эффективности производства, современные подходы к мониторингу агрофизических показателей и фенотипированию объектов становятся критическими для достижения устойчивого развития в сельском хозяйстве [6]. Это также открывает перспективы для разработки инновационных решений и технологий, направленных на повышение производительности и уменьшение негативного воздействия на окружающую среду [7].

Цель исследования: разработать интеллектуальную полевую сенсорную станцию для мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования в системе точного земледелия, которая будет обеспечивать высокую точность собранных данных об агрофизических параметрах в реальном времени с

использованием полевого технического средства, оснащенного сетью датчиков интернета вещей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для мониторинга агрофизических показателей плодородия почвы нами предлагается использовать разнообразные методы и технические средства, которые позволяют измерять и анализировать физические характеристики почвы [8-10]. На [рисунке 1](#) указаны методы мониторинга агрофизических показателей почвы и фенотипирования растений [11-13].

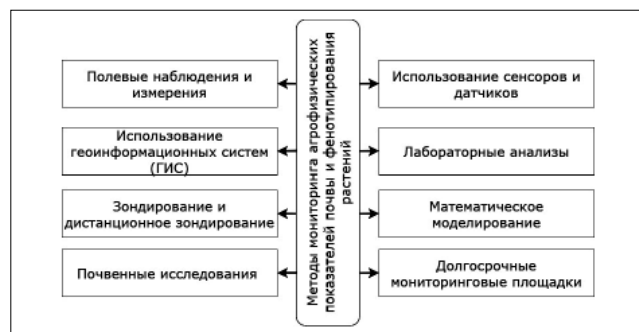


Рис. 1. Методы мониторинга агрофизических показателей плодородия почвы и фенотипирования растений
Fig. 1. Methods of monitoring agrophysical soil fertility indicators and plant phenotyping

Почвенные исследования. Основаны на сборе образцов почвы на участках сельскохозяйственной земли. Лабораторный анализ образцов позволяет измерить текстуру, структуру, плотность, влажность, проводимость и водоудерживающую способность почвы.

Дистанционное зондирование. Использует спутники, дроны и аэрокосмические платформы. Позволяет измерять параметры, такие как влажность, структуру и температуру, на больших территориях с использованием специализированных датчиков.

Геоэлектрические исследования. Изучают физические характеристики почвы через электрическое сопротивление грунта с использованием электродов. Применяются для определения структуры, влажности, оптимизации полива и выявления грунтовых вод.

Акустические методы. Основаны на анализе скорости распространения звуковых волн в почве. Позволяют определить плотность, структуру и компактность почвы, а также контролировать эрозию и улучшать водоудерживающие свойства.

Зондирование ядрами. Исследуют агрофизические характеристики почвы через внедрение зондов на определенную глубину. Обеспечивают детальное изучение физических свойств почвы на различных уровнях и создание подробных карт характеристик.

Использование датчиков. Осуществляется установкой датчиков в почве или на ее поверхности для непрерывного мониторинга параметров. Позволяет собирать данные в реальном времени о влажно-

сти, температуре, электропроводности, оптимизировать агротехнические процессы [14, 15].

Прецизионное земледелие и GIS. Совмещает прецизионное земледелие с геоинформационными системами. Обеспечивает точный анализ и оптимизацию агротехнических мероприятий, управление ресурсами и мобильной техникой, повышение продуктивности и минимизацию воздействия на окружающую среду [16, 17].

На основе перечисленных методов нами была разработана интеллектуальная полевая сенсорная станция ([рис. 2](#)). Она представляет собой комплексный инструмент для мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования растений.

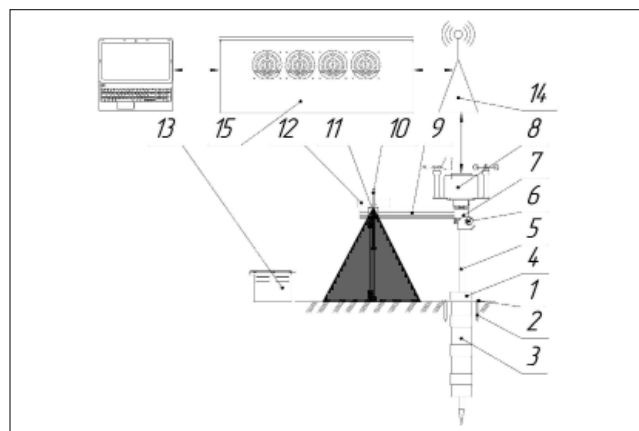


Рис. 2. Схема интеллектуальной полевой сенсорной станции для мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования растений в системе точного земледелия

Fig. 2. Diagram of an intelligent field sensor station for monitoring agrophysical parameters and plant phenotyping in a precision farming system

Интеллектуальная полевая сенсорная станция представляет собой опору 1, в ней для устойчивости установлены штыри 2. В трубе 3 размещены сенсоры для измерения влажности и получение параметров структуры почвы. Блок управления 4 и стойка 5 с электродвигателем постоянного тока 6 обеспечивают плавное перемещение профиля 9. Метеостанция 8 размещена на стойке 7 и собирает информацию о метеорологических параметрах. Профиль 9 с регулировочным стержнем 10, лазерным сканером 11 и цифровой камерой 12 обеспечивают точный сбор данных. Обработанные данные передаются на сервер 15 через модуль GSM 14, где они хранятся и становятся доступными для дополнительного анализа. Персональный компьютер имеет доступ к серверу и служит для подробного анализа собранных данных и принятия обоснованных управленческих решений.

Станция оборудована встроенными сенсорами, в том числе электродами для геоэлектрических ис-

следований, датчиками скорости и направления воздушного потока, влажности, температуры, атмосферного давления, уровня жидких осадков, ультрафиолета, освещенности. Дистанционное зондирование осуществляется с использованием лазерного сканера и камеры глубины для создания трехмерной модели поверхности почвы, а также наблюдения за ростом культуры. Станция оснащена геоинформационными системами, обеспечивающими точный анализ данных для оптимизации агротехнических процессов.

Важно отметить независимость работы станции от внешних источников энергии или связи в удаленных или недоступных местах, где нет электропитания. Автономными источниками питания могут быть батареи, солнечные панели или другие.

Встроенное программное обеспечение дает возможность подключения сенсорной станции к ноутбуку по *Bluetooth*. Кроме того, имеется функция передачи и получения информации с сервера по сети *GSM*.

Таким образом, интеллектуальная полевая сенсорная станция служит инструментом для получения и обработки информации о состоянии почвы и сельскохозяйственных культур на пахотных угодьях и может быть включена в сеть датчиков интернета вещей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Исследования проводились на сельских угодьях в поселке Опытный Цивильского района Чувашской Республики с целью анализа агрофизических параметров и фенотипирования растений на примере выращивания гороха сорта Томас. В качестве технического средства использовалась интеллектуальная полевая станция, оснащенная различными сенсорами и устройствами.

Станция представляет собой компактное устройство высотой 2 м, длиной 1,2 м и шириной 1,2 м. Главной ее особенностью является модульность, что обеспечивает гибкость в настройке и возможности дополнительного оснащения различными датчиками при необходимости. Разборная конструкция значительно упрощает транспортировку и установку станции в местах проведения исследований.

Интеллектуальная полевая сенсорная станция включает в себя: камеру глубины *OrbbecAstra*, обеспечивающую 3D-визуализацию окружающей среды с точностью $\pm 1-3$ мм на 1 м, лазерный сканер *Riftek* с точностью $\pm 0,1$ мм для измерения расстояний и сканирования объектов, метеостанцию для мониторинга метеорологических параметров. Также предусмотрены дополнительные устройства, включая акселерометр, гироскоп, электродвигатель постоянного тока, контроллеры *RaspberryPi* и *STM32*, источник питания 12 В. Диаметр области наблюдения в установленной точке составляет 2 м.

Перед размещением сенсорной станции на исследованном участке проведен предварительный забор проб почвы на глубине до 1 метра при использовании бензинового бура. Пробы затем были проанализированы в лабораторных условиях с целью определения ключевых характеристик почвы, важных для агрофизического мониторинга, особенно влажности почвы. Место испытания характеризовалось светло-серой лесной почвой с плотностью $1,14 \text{ г/см}^3$, плотностью твердой фазы $2,54 \text{ г/см}^3$, пористостью 0,55, удельной поверхностью $127,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и коэффициентом фильтрации $2,28 \times 10^{-5}$. Получены результаты химического анализа почвы.

Органическое вещество (гумус), %	4,8
по ГОСТ 26213-2021	
Подвижный фосфор, мг/кг	480
по ГОСТ Р 54650-2011	
Подвижный калий, мг/кг	231
по ГОСТ Р 54650-2011	
pH (KCl)	6,8
по ГОСТ 26483-85	

Далее на этом участке установили интеллектуальную полевую сенсорную станцию (рис. 3). Она может работать с разной периодичностью по времени. Оборудованная лазерным сканером и камерой глубины, станция выполняет сканирование по периферии участка, создавая трехмерное облако точек с точностью 0,1 мм по вертикали.



Рис. 3. Полевые испытания интеллектуальной сенсорной станции

Fig. 3. Field testing of an intelligent sensor station

После завершения вегетационного периода собранные данные переносились на персональный компьютер и проводился тщательный их анализ. С использованием компьютерного зрения проводился детальный расчет информации с координатами (x, y, z), что позволяло определить форму, структуру и агрегатный состав поверхности почвы (рис. 4). Полученная точная цифровая модель системы «почва-растения-окружающая среда» применяется в сельском хозяйстве для анализа агрофизических показателей и параметров почвы, фенотипирования растений и сорняков,

оптимизации вегетационных процессов. Фенотипирование в данном случае представляло собой процесс сбора данных о внешних характеристиках растений, таких как размер, форма, цвет, структура листьев и другие морфологические параметры.

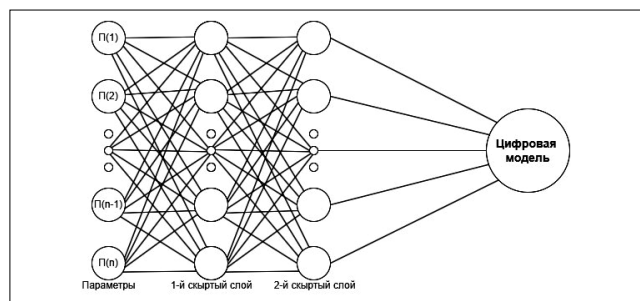


Рис. 4. Двухслойная нейронная сеть с агрофизическими параметрами

Fig. 4. A two-layer neural network using agrophysical parameters

На входе в нейронную сеть для комплексного анализа факторов передаются показатели, получаемые с интеллектуальной сенсорной станции [18, 19].

В процессе вегетации растений на основе собранных данных определялись следующие параметры: скорость и направление воздушного потока, влажность воздуха и почвы в профиле до 1 м, температура воздуха и почвы в профиле до 1 м, атмосферное давление воздуха, уровень жидких осадков, индекс ультрафиолетового излучения, интенсивность света, фактическая норма высева и всхожесть семян, прямолинейность посевов, наличие огрехов и просевов, густота стояния сельскохозяйственных культур, высота растений, цифровая модель поверхности почвы и растений, включая сорняки.

Метеостанция зафиксировала следующие показатели: скорость ветра колебалась от 2,88 до 3,2 м/с, направление ветра по азимуту варьировалось от 205° до 224°, абсолютная влажность воздуха изменялась в пределах 10–15 мм, а количество осадков и температура изменялись от 40 мм до 65 мм и от 6 до 40 °C соответственно.

Также имеется возможность проводить оценку фенотипа растения, анализ болезней и вредителей растений (рис. 5).



Рис. 5. Наблюдение за горохом сорта Томас: а – 45 день после посадки; б – 90 день после посадки

Fig. 5. Observation of Thomas variety peas: a – 45 days after planting; b – 90 days after planting

После вегетационного периода был проделан тщательный анализ собранных данных о количестве стеблей, бобов и зерен гороха сорта Томас. Общее количество стеблей достигло 22 шт. на одном квадратном метре, это свидетельствует о хорошем разветвлении растений. Количество бобов составило 85 шт., путем ручного подсчета установлено 475 горошин с общей массой 91,87 г, что подчеркивает высокий уровень продуктивности гороха на данном участке. Это указывает на успешное прохождение вегетационного периода и эффективное воздействие агротехнических мероприятий, содействующих высокой урожайности сорта Томас.

При фенотипировании гороха сорта Томас не было выявлено серьезных проблем. Растения не подверглись воздействию вредителей, не было признаков сухости листьев, и частота всхожести оказалась на ожидаемом уровне. Полученные результаты свидетельствуют о благоприятных условиях для роста и развития растений на исследуемом участке.

Выводы. Разработана интеллектуальная полевая сенсорная станция для мониторинга агрофизических параметров и фенотипирования растений в рамках системы точного земледелия.

Станция показала свою работоспособность, а также подтвердила эффективность и надежность в сборе данных в условиях реального времени.

Получена всесторонняя информация о ее месте установки, включая почвенные характеристики, метеорологические условия и структурные особенности поверхности. Светло-серая лесная почва с высокой пористостью и нейтральным уровнем pH представляла благоприятные условия для сельскохозяйственных культур. Химический анализ почвы выявил умеренные значения содержания органического вещества, подвижного фосфора и калия, что указывает на потенциально плодородный участок.

В результате фенотипирования гороха сорта Томас не выявлено серьезных проблем, отсутствуют признаки воздействия вредителей и сухости листьев, а частота всхожести соответствует ожиданиям. Анализ данных по урожайности, проведенный после вегетационного периода, подтвердил высокий уровень продуктивности участка, выраженный в хорошем разветвлении, обильном формировании бобов и количестве горошин. Метеорологические данные представляли собой ключевой аспект для агрометеорологического анализа, который в свою очередь оказывает существенное влияние на сельскохозяйственные процессы.

Разработанная станция представляет собой инновационный подход к мониторингу агрофизических параметров. Тестирование и последующий анализ данных подтверждают ее эффективность и перспективность внедрения в систему современного земледелия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Friedli M., Kirchgessner N., Grieder C. et al. Terrestrial 3D laser scanning to track the increase in canopy height of both monocot and dicot crop species under field conditions. *Plant Methods*. 2016. N12. 9. DOI: 10.1186/s13007-016-0109-7.
- Barreto B.B., Rivera F.P., McKenzie B.M. et al. Analysis of the effect of tilling and crop type on soil structure using 3D laser profilometry. *Agriculture*. 2023. N13. 2077. DOI: 10.3390/agriculture13112077.
- Kazemi M., Samavati F.F. Automatic soil sampling site selection in management zones using a multi-objective optimization algorithm. *Agriculture*. 2023. N13. 1993. DOI: 10.3390/agriculture13101993.
- Yue J., Zhou C., Feng H. et al. Novel applications of optical sensors and machine learning in agricultural monitoring. *Agriculture*. 2023. N13. 1970. DOI: 10.3390/agriculture13101970.
- Rossi R., Costafreda-Aumedes S., Leolini L. et al. Implementation of an algorithm for automated phenotyping through plant 3D-modeling: A practical application on the early detection of water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 197. 106937. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106937.
- Songhee C., Taehyeong K., Dae-Hyun J. et al. Plant growth information measurement based on object detection and image fusion using a smart farm robot. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 207. 2023. 107703. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107703.
- Zimmermann G.G., Samir J., Savi D. et al. Development of an electronic profilometer to measure mobilization variables in soil harrowing. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2023. N3. e0204. DOI: 10.5424/sjar/2023212-19811.
- Vasilyev A.A., Vasilyev S.A., Shkilev N.P. Mechanized spraying of liquid meliorants. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2020. N1. 421(3):032026. DOI: 10.1088/1755-1315/421/3/032026.
- Васильев С.А., Алексеев В.В., Речнов А.В. Экспресс-метод количественной оценки пожнивных остатков на поверхности почвы // *Аграрный научный журнал*. 2015. N9. С. 11-13. EDN: UJURLH.
- Васильев С.А. Интеллектуальная технология контроля качества обработки почвы в системе точного земледелия // *Земледелие*. 2022. N3. С. 36-41. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-3-36-41.
- Пустовалов Р.А., Коротенко Т.Л. Фенотипирование по морфологическим и агрономическим признакам агроэкоотипов мирового разнообразия риса в условиях Южного региона России // *Рисоводство*. 2022. N2(55). С. 11-19. DOI: 10.33775/1684-2464-2022-55-2-11-19.
- Маракаева Т.В. Фенотипическая изменчивость селекционных линий чечевицы (*Lensculinaris* L.) по элементам семенной продуктивности в экологических условиях Омской области. // *Аграрный вестник Урала*. 2024. Т. 24. N1. С. 86-97. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-01-86-97.
- Фадеев А.А., Фадеева М.Ф., Никифорова И.И., Иванова И.Ю. Перспективные селекционные линии сои северного экоотипа для создания сортов кормового назначения // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022. Т. 23. N2. С. 203-210. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.2.203-210.
- Носкова А.И., Токранова М.В. Обзор автоматизированных систем мониторинга // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2017. N1. С. 42-47. EDN: ZIAHDL.
- Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 40-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48.
- Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф., Размук В.А и др. Анализ современных информационных систем мониторинга процессов производства в сельском хозяйстве // *Агро-ЭкоИнженерия*. 2021. N1(106). С. 4-14. EDN: LKMFTU.
- Лачуга Ю.Ф., Годжаев З.А., Редько И.Я. Создание и применение мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2022. Т. 23. N1. С. 23-29. DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29.
- Кутырев А.И., Смирнов И.Г. Сверточная нейронная сеть (Seg-CNN) для распознавания, классификации и сегментации ветвей с плодами яблони и плодоножек на изображениях // *Садоводство и виноградарство*. 2024. N2. С. 53-62. DOI: 10.31676/0235-2591-2024-2-53-62.
- Кутырев А.И., Смирнов И.Г. Нейронная сеть для распознавания и классификации плодов яблони // *Аграрный научный журнал*. 2023. N8. С. 123-133. DOI: 10.28983/asjy2023i8pp123-133.

REFERENCES

- Friedli M., Kirchgessner N., Grieder C. et al. Terrestrial 3D laser scanning to track the increase in canopy height of both monocot and dicot crop species under field conditions. *Plant Methods*. 2016. N12. 9 (In English). DOI: 10.1186/s13007-016-0109-7.
- Barreto B.B., Rivera F.P., McKenzie B.M. et al. Analysis of the effect of tilling and crop type on soil structure using 3D laser profilometry. *Agriculture*. 2023. N13. 2077 (In English). DOI: 10.3390/agriculture13112077.
- Kazemi M., Samavati F.F. Automatic soil sampling site selection in management zones using a multi-objective optimization algorithm. *Agriculture*. 2023. N13. 1993 (In English). DOI: 10.3390/agriculture13101993.
- Yue J., Zhou C., Feng H. et al. Novel applications of optical sensors and machine learning in agricultural monitoring. *Agriculture*. 2023. N13. 1970 (In English). DOI: 10.3390/agriculture13101970.
- Rossi R., Costafreda-Aumedes S., Leolini L. et al. Imple-

- mentation of an algorithm for automated phenotyping through plant 3D-modeling: A practical application on the early detection of water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 197. 106937 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2022.106937.
6. Songhee C., Taehyeong K., Dae-Hyun J. et al. Plant growth information measurement based on object detection and image fusion using a smart farm robot. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 207. 107703 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2023.107703.
 7. Zimmermann G., Jasper S., Savi D. et al. Development of an electronic profilometer to measure mobilization variables in soil harrowing. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2023. 21(2): e0204. DOI: 10.5424/sjar/2023212-19811.
 8. Vasilyev A.A., Vasilyev S.A., Shkilev N.P. Mechanized spraying of liquid meliorants. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2020. 421(3):032026 (In English). DOI:10.1088/1755-1315/421/3/032026.
 9. Vasiliev S.A., Alexeyev V.V., Rechnov A.V. Rapid method for quantitative evaluation of residue on the soil surface. *Agrarian Scientific Journal*. 2015. N9. 11-13 (In Russian). EDN: UJURLH.
 10. Vasiliev S.A. Intelligent technology for quality control of tillage in the precision farming system. *Zemledeliye*. 2022. N3. 36-41 (In Russian). DOI: 10.24412/0044-3913-2022-3-36-41.
 11. Pustovalov R.A., Korotenko T.L. Phenotyping according to morphological and agronomic characteristics of agroecotypes of the world variety of rice in the conditions of the southern region of Russia. *Rice Growing*. 2022. N2(55). 11-19 (In Russian). DOI: 10.33775/1684-2464-2022-55-2-11-19.
 12. Marakaeva, T.V. Phenotypic variability of breeding lines of lentils (*Lens culinaris* L.) according to elements of seed productivity in the environmental conditions of the Omsk region. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024. Vol. 24. N1. 86-97 (In Russian). DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-01-86-97.
 13. Fadeev A.A., Fadeeva M.F., Nikiforova I.I., Ivanova I.Yu. Promising soybean breeding lines of the northern ecotype for developing forage crops. *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2022. Vol. 23. N2. 203-210 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.2.203-210.
 14. Noskova A.I., Tokranova M.V. Overview of automated monitoring systems. *Intellectual Technologies on Transport*. 2017. N1. 42-47 (In Russian). EDN: ZIAHDL.
 15. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Development of an experimental phytotron and its application in the research on the energy-ecological efficiency of indoor plant lighting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 40-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48.
 16. Timofeev E.V., Erk A.F., Razmuk V.A. et al. Survey of modern information systems for monitoring of production processes in agriculture. *AgroEcoEngineering*. 2021. N1. 4-14 (In Russian). DOI: 10.24411/2713-2641-2021-10274.
 17. Lachuga Yu.F., Godzhaev Z.A., Redko I.Ya. Creation and application of mobile multifunctional energy technology complexes. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022. Vol. 23. N1. 23-29 (In Russian). DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29.
 18. Kutyrev A.I., Smirnov I.G. A convolutional neural network (Seg-CNN) for recognition, classification, and segmentation of apple fruit branches and stems in images. *Horticulture and Viticulture*. 2024. N2. 53-62 (In Russian). DOI: 10.31676/0235-2591-2024-2-53-62.
 19. Kutyrev A.I., Smirnov I.G. Neural network for apple fruit recognition and classification. *Agricultural Scientific Journal*. 2023. N8. 123-133 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2023i8pp123-133.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Васильев С.А. – научное руководство, постановка проблемы, разработка теоретических предпосылок, формулирование основной концепции, целей и задач исследования, доработка текста, формирование общих выводов;
 Лимонов С.Е. – разработка и обоснование конструкции интеллектуальной полевой сенсорной станции, формулирование основных целей и задачи исследования, доработка текста и оформление материалов, анализ литературных источников, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи, апробация сенсорной станции;
 Мишин С.А. – разработка программного обеспечения интеллектуальной полевой сенсорной станции, апробация сенсорной станции, анализ параметров.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Vasiliev S.A. – scientific supervision, problem statement, development of theoretical premises, definition of the basic concept, setting research goals and objectives, manuscript refinement, formulating general conclusions;
 Limonov S.E. – development and justification of the design for an intelligent field sensor station, formulation of the research goals and objectives, manuscript refinement and material design, literature review, formulating general conclusions, manuscript proofreading, sensor station testing;
 Mishin S.A. – development of software for the intelligent field sensor station, sensor station testing, analysis of agrophysical parameters.

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

28.08.2024

25.10.2024



Определение теплофизических коэффициентов зерновоздушной смеси семян горчицы в условиях повышенной температуры

Алексей Петрович Евдокимов,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: apevdokimov@yandex.ru;

Алексей Андреевич Лещенко,
аспирант,
e-mail: leshchenko.el41@gmail.com

Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Реферат. Отмечено, что моделирование процесса высушивания пробы семян горчицы при термогравиметрическом измерении влажности позволит определить наиболее эффективные варианты конструкции сушильных камер. Семена горчицы в данном процессе представляют собой зерновоздушную смесь с определенными теплофизическими характеристиками. (*Цель исследования*) Измерить основные теплофизические коэффициенты зерновоздушной смеси горчицы для различных значений влажности при высокой температуре. (*Материалы и методы*) Использованы образцы семян горчицы влажностью от 3,24 до 15,07 процентов. Метод цилиндрического слоя позволяет равномерно распределить тепло при размещении нагревателя в центре слоя материала. Сконструированы экспериментальные установки для измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности семян горчицы. Коэффициенты объемной и удельной теплоемкости определены расчетным путем. (*Результаты и обсуждение*) Построены графики зависимости коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, объемной и удельной теплоемкости, а также объемной плотности зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности. Найдены аппроксимирующие функции этих зависимостей в исследуемом диапазоне. (*Выводы*) В диапазоне влажности от 3,24 до 15,07 процентов коэффициент теплопроводности зерновоздушной смеси семян горчицы возрастает от 0,156 до 0,176 киловатта на метр и градус Кельвина; коэффициент температуропроводности повышается от $6,29 \cdot 10^{-8}$ до $7,70 \cdot 10^{-8}$ метр квадратный на секунду; объемная теплоемкость зерновоздушной смеси уменьшается с 2490,8 до 2286,9 килоджоуля на метр кубический и градус Кельвина. Установлено, что объемная плотность в том же диапазоне влажности сначала растет, а после достижения максимума при влажности около 7,5 процентов снижается. Удельная теплоемкость, напротив, уменьшается до точки минимума при влажности примерно 9 процентов, а затем возрастает.

Ключевые слова: семена горчицы, высушивание, зерновоздушная смесь, влажность, термогравиметрический метод, теплофизические свойства, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость.

■ **Для цитирования:** Евдокимов А.П., Лещенко А.А. Определение теплофизических коэффициентов зерновоздушной смеси семян горчицы в условиях повышенной температуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 86-93. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-86-93. EDN: VWLFYX.

Scientific article

Thermophysical Coefficients of Mustard Seeds Grain-Air Mixture under High-Temperature Conditions

Aleksei P. Evdokimov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: apevdokimov@yandex.ru;

Aleksei A. Leshchenko,
Ph.D.(Eng.) student,
e-mail: leshchenko.el41@gmail.com

Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that modeling the drying process of mustard seed samples using thermogravimetric moisture measurement enables the identification of the most effective design options for drying chambers. In this process, mustard seeds form a grain-air mixture with specific thermophysical properties. (*Research purpose*) To measure the key thermophysical coefficients of the mustard grain-air mixture at different moisture content levels and high temperatures. (*Materials and methods*) Mustard seed samples with moisture content ranging from 3.24 to 15.07 percent were used. The cylindrical layer method enables uniform heat distribution by positioning the heater at the center of the material layer. Experimental setups were

designed to measure the thermal conductivity and thermal diffusivity coefficients of the mustard seeds, while the volumetric and specific heat capacity coefficients were calculated. (*Results and discussion*) Graphs illustrating the dependence of thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric and specific heat capacity, as well as the bulk density of the mustard seed grain-air mixture on moisture content were constructed. Approximating functions for these dependencies were identified within the studied range. (*Conclusions*) In the moisture content ranged from 3.24 to 15.07 percent, the thermal conductivity coefficient of the mustard seed grain-air mixture increases from 0.156 to 0.176 kW/(m·K); the thermal diffusivity coefficient rises from $6.29 \cdot 10^{-8}$ to $7.70 \cdot 10^{-8}$ m²/s; while the volumetric heat capacity of the mixture decreases from 2490.8 to 2286.9 kJ/(m³·K). It was found that the bulk density initially increases within the same moisture content range, reaching a maximum at around 7.5 percent, and then decreases. Conversely, the specific heat capacity decreases to a minimum point at approximately 9 percent moisture content, and then begins to rise.

Keywords: mustard seeds, drying, grain-air mixture, moisture content, humidity, thermogravimetric method, thermophysical properties, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity.

■ **For citation:** Evdokimov A.P., Leshchenko A.A. Thermophysical coefficients of mustard seeds grain-air mixture under high-temperature conditions. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 86-93 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-86-93. EDN: VWLFYX.

Измерение влажности материала термогравиметрическим методом основано на прямом вычислении его значения через массу испарившейся при высушивании влаги. Внутри семян происходят сложные процессы тепло- и влагопереноса [1-3]. Схема тепло- и влагопереноса в устройстве измерения влажности пробы термогравиметрическим методом в общем виде приведена на *рисунке 1*. Тепло от источника, размещенного на некотором расстоянии от пробы, через воздушную среду передается находящимся в контейнере семенам. Испаряющаяся из семян влага выделяется в окружающую среду, а тепло передается контейнеру и от него окружающей воздушной среде.

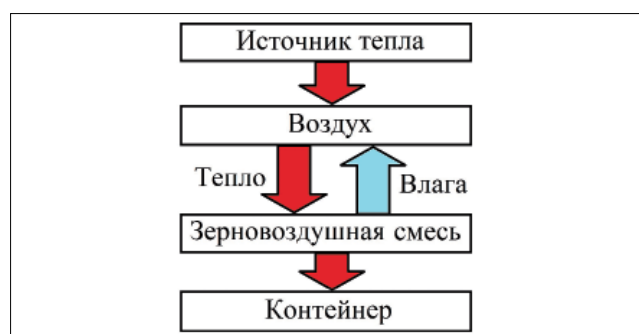


Рис. 1. Схема тепло- и влагопереноса при высушивании пробы семян горчицы для измерения влажности термогравиметрическим методом

Fig. 1. Diagram illustrating thermal and moisture conductivity during the drying of mustard seed sample used for thermogravimetric moisture measurement

Семена в контейнере могут располагаться в несколько слоев, тепло- и влагообмен происходит как в местах их соприкосновения, так и через воздушные промежутки между семенами [4, 5]. Образец с точки зрения процессов тепло- и влагообмена представляет собой сложную систему из семян и

воздуха между ними, которую при высушивании следует рассматривать как зерновоздушную смесь [6].

Термогравиметрический метод является перспективным направлением для создания новых и модернизации существующих приборов измерения влажности [7-10]. С помощью микропроцессорных средств и алгоритмов, разработанных с учетом свойств исследуемого материала, можно сократить время измерения, сохраняя низкую погрешность, свойственную приборам данного типа. Теплофизические свойства материала дают возможность для описания механизма высушивания и поиска эффективных режимов. Моделирование процесса позволит определить наилучший вариант конструкции сушильной камеры [11-13].

Теплофизические свойства сыпучих веществ, качественно характеризующих материалы, исследовались преимущественно в строительных, конструкционных материалах, горных породах и т.п. [14]. В отношении сыпучих сельскохозяйственных материалов теплофизические свойства известны лишь в диапазонах температуры, при которых происходят основные технологические процессы: уборка, сортировка, хранение, кондиционирование по влажности и т.п. [15]. В основном это диапазон от -10 до +60 °C.

Известно, что значения теплофизических параметров зависят от температуры и влажности материала [16]. Для семян горчицы теплофизические коэффициенты обычно определяются косвенно как результат расчета по известным их значениям для белков, липидов, углеводов, воды и других веществ в составе семян. Содержание воды является определяющей величиной в выражении значений теплофизических коэффициентов. Следует отметить, что это имеет значение только непосредственно для семян, а не для зерновоздушной смеси. В работе [17]

приводится сравнительный анализ теплофизических свойств двух сортов семян горчицы в широком диапазоне температуры, но не зависимости этих параметров от влажности.

При измерении влажности семян масличных культур высушивание проводится при 130 °С, однако данные о теплофизических свойствах при такой высокой температуре отсутствуют.

Задача моделирования процесса сушки связана с нахождением полей влагосодержания $u(x, y, z, \tau)$ и температуры $T(x, y, z, \tau)$. Температурное поле описывается уравнением теплопроводности, которое в декартовой системе координат имеет вид:

$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где $c\rho$ – объемная теплоемкость материала (произведение удельной теплоемкости на объемную плотность), Дж/(м³·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); τ – время, с.

Коэффициент теплопроводности связан с другими тепловыми параметрами вещества выражением:

$$\lambda = a \cdot c\rho, \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Коэффициент температуропроводности a характеризует теплоинерционные свойства материала. Он, как и объемная теплоемкость, зависит от температуры, влажности и плотности материала. Очевидно, что численные значения коэффициентов в выражении (2) могут быть найдены через измерение двух из них и расчет третьей величины. Например, коэффициенты теплопроводности λ и температуропроводности a можно найти экспериментальным путем, а коэффициент объемной теплоемкости $c\rho$ – расчетным [18].

Получение аналитических формул для выражения теплофизических коэффициентов в отношении зерновоздушной смеси семян горчицы не представляется возможным. Задача осложняется тем, что семена горчицы по своей геометрической форме (рис. 2) представляют сфероид, т.е. эллипсоид, у которого диаметры по двум из трех осей равны, и задача плотнейшей упаковки для таких тел значительно сложнее, чем для сфер [19].

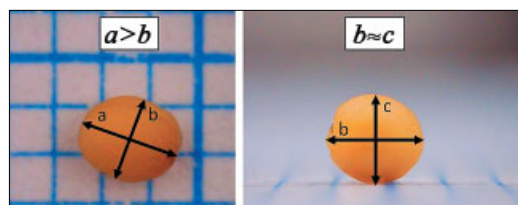


Рис. 2. Зерно горчицы в двух проекциях: a – длина; b – ширина; c – толщина

Fig. 2. Mustard seed shown in two projections: a – length; b – width; c – thickness

Таким образом, при построении модели тепло- и влагопереноса зерновоздушную смесь семян горчицы следует считать одним телом со своими значениями коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости.

Цель исследования – измерить основные теплофизические коэффициенты зерновоздушной смеси горчицы для различных значений влажности при высокой температуре.

Материалы и методы. Для исследования теплофизических свойств зерновоздушной смеси горчицы был использован метод цилиндрического слоя материала. Данный метод позволяет равномерно распределять тепло при размещении нагревателя в центре слоя материала [20, 21].

Уравнение теплопроводности в этом случае удобнее записать, используя цилиндрическую систему координат:

$$c\rho \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где r – радиус, отсчитываемый от оси цилиндрического слоя.

Коэффициенты тепло- и температуропроводности семян горчицы измеряли на экспериментальных установках (рис. 3).

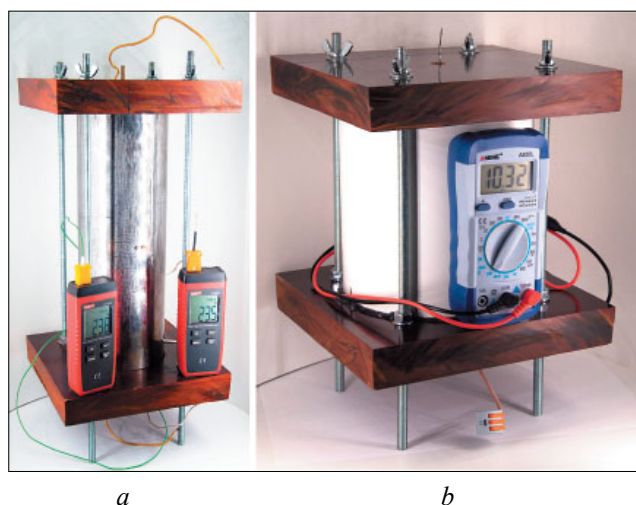


Рис. 3. Установки для измерения коэффициентов теплопроводности (а) и температуропроводности (б)
Fig. 3. Setups for measuring the thermal conductivity coefficient (a) and thermal diffusivity coefficient (b)

Установка для измерения коэффициента теплопроводности (λ) представляет собой две коаксиальные трубы длиной $l = 290$ мм с диаметрами $d_1 = 42,2$ мм и $d_2 = 101,4$ мм. Во внутренней трубе помещался электрический нагреватель, его мощность регулировалась с помощью лабораторного автотрансформатора. На внутренней поверхности внешней трубы и внешней поверхности внутренней трубы располагались термопары, подключенные к

отдельным измерителям температуры. В полость между внутренней и внешней трубами помещались семена горчицы в виде цилиндрического слоя. Торцы труб закрыты карболитовыми плитами толщиной 31 мм. Для лучшей термоизоляции концов труб в местах их соприкосновения с торцевыми плитами уложено асбестовое волокно. Части конструкции фиксировались разборным шпильчным соединением.

После загрузки исследуемого материала и полной сборки установку переводили в горизонтальное положение. На нагревателе устанавливалась мощность, достаточная для того, чтобы при достижении стационарного теплового режима ($T_1 = const$, $T_2 = const$, $P = U \cdot I = const$) температура T_1 внутренней поверхности цилиндрического слоя семян была равна $130 \pm 2^\circ\text{C}$. В момент достижения такого режима фиксировались значения T_1 , T_2 и P .

В стационарном режиме коэффициент теплопроводности цилиндрического слоя семян может быть найден из выражения:

$$\lambda = \frac{P \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (4)$$

где P – электрическая мощность нагревателя в стационарном тепловом режиме, Вт; d_1 и d_2 – внутренний и внешний диаметры цилиндрического слоя семян, м; l – длина цилиндрического слоя, м; T_1 и T_2 – температура соответственно внутренней и внешней поверхностей цилиндрического слоя, $^\circ\text{C}$.

Установка для измерения коэффициента температуропроводности (рис. 3а) выполнена в виде цилиндрической трубы диаметром 150 мм и отрезка соосно расположенной нихромовой проволоки диаметром 1 мм такой же длины. В пространство между ними помещались семена, образующие цилиндрический слой. На расстоянии $r_0 = 10$ мм от нихромовой проволоки располагался терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом, подключенный к измерителю сопротивления. По торцам установка закрыта карболитовыми плитами толщиной 31 мм. Концы нихромовой проволоки подключали к источнику переменного на-

пряжения $U = 3,3$ В. Экспериментально определено, что при таком напряжении за 30 секунд поверхность нихромовой проволоки нагревается до температуры $130 \pm 2^\circ\text{C}$.

Установка с семенами располагалась вертикально. С подачи на концы проволоки напряжения начинался отсчет времени до $\tau_{\text{имп}} = 30$ с, и напряжение отключалось. В течение 30 секунд измерялось сопротивление терморезистора внутри пробы семян. По достижении минимального сопротивления фиксировалось значение времени τ_{max} , соответствующее моменту наступления пиковой температуры в слое семян на расстоянии r_0 от нагревателя.

Расчетная формула для коэффициента температуропроводности имеет вид:

$$a = \frac{r_0^2}{4 \cdot \tau_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где r_0 – расстояние от нагревательной проволоки до терморезистора, м; τ_{max} – время достижения пиковой температуры на терморезисторе с момента начала подачи импульса, с.

Значения объемной теплоемкости были найдены из выражения (2) как соотношение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности: $cp = \lambda/a$.

Для расчета коэффициента удельной теплоемкости c через коэффициент объемной теплоемкости cp дополнительно измерены значения объемной плотности ρ путем взвешивания фиксированного объема зерновоздушной массы.

Определен диапазон влажности семян горчицы для исследования от 3,0 до 15,0%, соответствующий уровню влажности семян на предприятиях переработки семян горчицы. Семена, влажность которых находится за пределами этого диапазона, не должны подлежать дальнейшей переработке. Для исследования были подготовлены пробы семян влажностью 3,24% (подсушенные), 5,88% (исходные), 9,11, 11,87 и 15,07% (увлажненные). Для каждого из уровней влажности проводилось по три измерения. Данные обрабатывались с помощью программного обеспечения *Microsoft Excel* и *MathCAD*.

Таблица

Table

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ (λ), КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ (a), ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ (ρ), ОБЪЕМНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ (cp) И УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ (c)
VALUES OF THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT (λ), THERMAL DIFFUSIVITY COEFFICIENT (a), BULK DENSITY (ρ), VOLUMETRIC HEAT CAPACITY (cp) AND SPECIFIC HEAT CAPACITY (c)

Показатель	Влажность семян горчицы, %				
	3,24	5,88	9,11	11,87	15,07
$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	156,59±0,86	159,35±0,86	166,05±1,34	172,56±1,60	176,20±2,03
$a \cdot 10^8$, м ² /с	6,29±0,06	6,61±0,02	7,03±0,08	7,35±0,11	7,70±0,04
cp , кДж/(м ³ ·К)	2490,8±30,0	2411,4±17,9	2362,4±27,4	2346,8±37,9	2286,9±14,9
ρ , кг/м ³	667,05±2,78	674,83±1,05	683,62±1,96	663,04±7,76	644,01±3,01
c , кДж/(кг·К)	3,73±0,04	3,57±0,03	3,46±0,04	3,54±0,06	3,55±0,02

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Измеренные значения коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности a , объемной плотности ρ , а также рассчитанные с помощью выражения (2) значения объемной теплоемкости $ср$ и удельной теплоемкости c представлены в **таблице**. Проведена статистическая обработка данных, их средние значения для каждого уровня влажности W семян горчицы.

Получены зависимости коэффициентов теплопроводности и температуропроводности зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности (**рис. 4**).

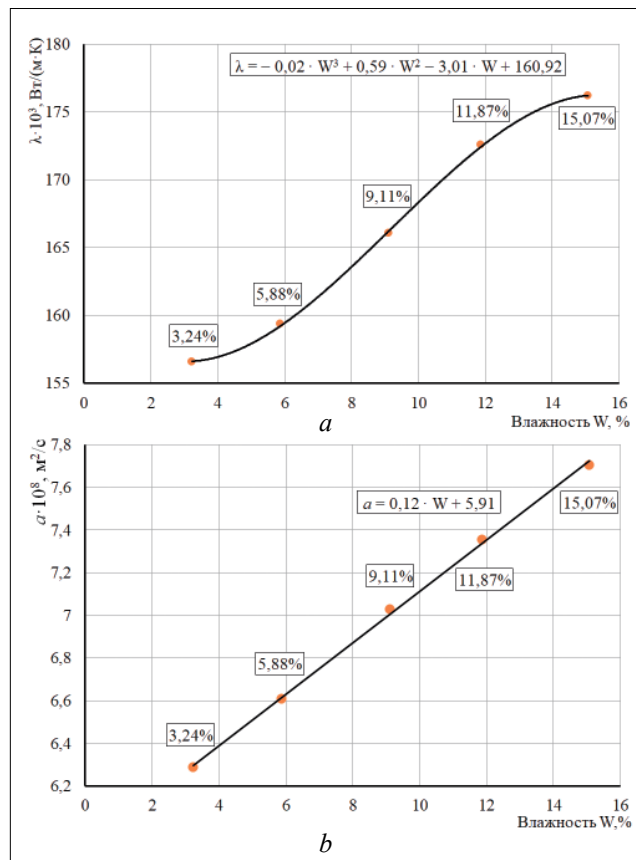


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности (а) и коэффициента температуропроводности (б) зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности

Fig. 4. Dependence of thermal conductivity of mustard seed grain-air mixture on moisture content

Увеличение коэффициента теплопроводности зерновоздушной смеси с увеличением ее влажности (**рис. 4а**) может быть связано с тем, что значение λ для сухой зерновоздушной смеси горчицы меньше, чем для воды [$\lambda_{\text{вода}} = 0,603 \text{ Вт/(м·К)}$]. Влага заполняет поры в семенах, вытесняя из них воздух, который препятствует прохождению тепла, поэтому по мере повышения влажности растет и коэффициент теплопроводности. Величина средней ошибки аппроксимации экспериментальных данных полиномиальной функцией третьего порядка $E_{\text{отн}} = 0,49\%$.

Аналогично изменяется коэффициент температуропроводности a (**рис. 4б**): его значение для сухой зерновоздушной смеси горчицы также меньше, чем для воды ($a_{\text{воды}} = 14,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$). Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных выражается линейной функцией $E_{\text{отн}} = 0,62\%$.

Расчетная зависимость объемной теплоемкости $ср$ зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности представлена на **рисунке 5а**.

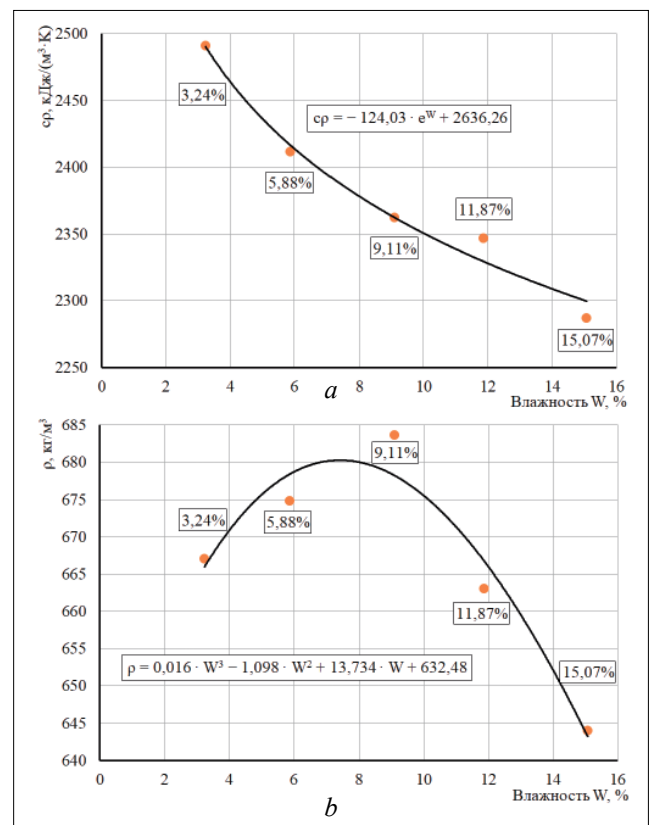


Рис. 5. Зависимость объемной теплоемкости $ср$ (а) и объемной плотности ρ (б) зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности

Fig. 5. Dependence of volumetric heat capacity $ср$ (а) and bulk density ρ (б) of the mustard seed grain-air mixture on moisture content

В пределах заданного диапазона влажности наблюдается монотонное уменьшение объемной теплоемкости зерновоздушной смеси горчицы. С другой стороны, с ростом влажности объемная теплоемкость должна стремиться к значению воды, т.е. к $ср = 4200 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$. Следовательно, должна быть точка минимума, в которой характер кривой изменится на увеличение, однако эта точка будет за пределами исследованной зоны влажности. Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных $E_{\text{отн}} = 0,78\%$.

Также установлена зависимость объемной плотности зерновоздушной массы горчицы от влажности (**рис. 5б**). Сначала с ростом влажности пустоты

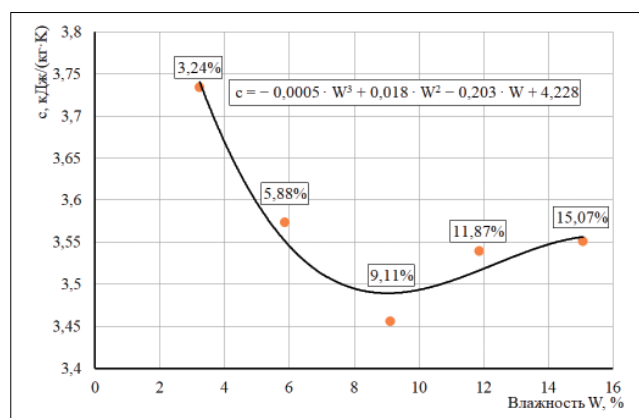


Рис. 6. Зависимость удельной теплоемкости c зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности

Fig. 6. Dependence of specific heat capacity a of the mustard seed grain-air mixture on moisture content

в семенах наполняются влагой и плотность повышается до максимума при влажности примерно 7,5%, после чего происходит снижение. Это, вероятно, происходит из-за того, что семена начинают расширяться (разбухать), воздушные промежутки между ними увеличиваются, и плотность смеси падает.

Расчетная зависимость удельной теплоемкости зерновоздушной смеси семян горчицы от влажности представлена на **рисунке 6**.

Аппроксимирующая функция представлена в виде полинома третьего порядка при средней ошибке аппроксимации $E_{\text{отн}} = 0,86\%$. Так же, как и для объемной плотности, наблюдается смена характе-

ра динамики удельной теплоемкости в зависимости от влажности. По мере роста влажности зерновоздушной смеси горчицы сначала происходит снижение теплоемкости, а при влажности около 9% кривая плавно переходит в рост.

Выводы

Исследование теплофизических коэффициентов зерновоздушной смеси семян горчицы при температуре 130 °С в диапазоне влажности от 3,24 до 15,07% позволило установить следующее:

- коэффициент теплопроводности (λ) с увеличением влажности возрастает от 0,156 до 0,176 Вт/(м·К);
- коэффициент температуропроводности (a) с повышением влажности увеличивается от $6,29 \cdot 10^{-8}$ до $7,70 \cdot 10^{-8}$ м²/с;
- объемная теплоемкость ($c\rho$) зерновоздушной смеси уменьшается с 2490,8 до 2286,9 кДж/(м³·К).

Объемная плотность (ρ) в том же диапазоне влажности сначала растет, достигая точки максимума при влажности около 7,5%, а затем падает. Удельная теплоемкость (c), напротив, уменьшается до точки минимума при влажности примерно 9%, а затем возрастает.

Полученные зависимости теплофизических коэффициентов семян горчицы от влажности и их аппроксимирующие функции позволят учесть влияние влажности семян на процесс тепло- и влагообмена. Эти параметры будут использованы при моделировании процесса высушивания семян горчицы в сушильной камере устройства термогравиметрического измерения влажности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Загоруйко М.Г., Марин Р.А. Тепломассоперенос в зерновке при переменных режимах // *Аграрный научный журнал*. 2021. N7. С. 84-87. DOI: 10.28983/asjy2021i7pp84-87.
2. Павлов С.А., Пехальский И.А., Марин Р.А. Экспериментальные исследования массопереноса в зерновке при осциллирующей сушке зерна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N4. С. 32-37.
3. Ольшанский А.И., Жерносек С.В., Гусаров А.М. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2022. Т. 65. N2. С. 156-168. DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168.
4. Павлов С.А., Левина Н.С., Лукин И.Д. Исследование сушки селекционных семян в плотном слое // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N1. С. 22-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-22-26.
5. Сорочинский В.Ф., Догадин А.Л. Изменение полей влагосодержания и температуры в зерне при сушке // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2019. N1. С. 47-56. DOI: 10.36107/spfp.2019.78.
6. Юнин В.А., Захаров А.М., Кузнецов Н.Н., Зыков А.В. Процесс сушки измельченного растительного материала в барабанной сушилке // *Известия НВ АУК*. 2020. N1(57). С. 335-349. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-33.
7. Каландаров П.И. Термогравиметрический метод измерения влажности: оценка точности и эффективность применения в агропромышленном комплексе // *Метрология*. 2021. N2. С. 44-62. DOI: 10.32446/0132-4713.2021-2-44-62.
8. Avezova N.I., Matyakubova P.M., Boboyev G.G. Ways to develop innovative processes in grain production. *ICISCT*. 2019. 1-4. DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9012034.
9. Ерошенко Г.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н., Евстафьев Д.П. Особенности разработки электротехнических устройств контроля параметров сельскохозяйственных продуктов // *Измерительная техника*. 2018. N10. С. 61-65. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-10-61-65.
10. Дринча В.М., Ценч Ю.С. Основы и перспективы развития технологий послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.

11. Шевцов А.А., Лыткина Л.И., Ткач В.В. и др. Моделирование тепловой обработки семян масличных культур высокотемпературным теплоносителем // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2018. N4. С. 163-171. DOI: 10.36107/spfp.2018.68.
12. Sorokovaya N.N., Snezhkin Yu.F., Shapar R.A., Sorokovoi R.Ya. Mathematical simulation and optimization of the continuous drying of thermolabile materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. N3. 1180–1190. DOI: 10.1007/s10891-019-02032-3.
13. Глухарев В.А., Сивицкий Д.В., Попов И.Н., Верзилин А.А. Определение оптимальных режимов энергоэффективного процесса сушки зерна // *Аграрный научный журнал*. 2018. N5. С. 42-45. DOI: 10.28983/asj.v0i5.349.
14. Кутузов С.В., Васильченко Г.Н., Чирка Т.В., Панов Е.Н. Теплопроводность сырого и графитированного кокса // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2013. N3. С. 29-33. DOI: 10.17073/1683-4518-2013-1-43-48.
15. Paziuk V. Study of the properties of rapeseed as a drying object. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 2023. 86-93. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-10.
16. Дранников А.В., Тертычная Т.Н., Шевцов А.А. и др. Исследование теплофизических характеристик зерна тритикале сорта Горка методом нестационарного теплового режима // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2021. Т. 83. N2(88). С. 17-22. DOI: 10.20914/2310-1202-2021-2-17-22.
17. Ropelewska E., Jankowski K.J., Zapotoczny P., Bogucka B. Thermophysical and chemical properties of seeds of traditional and double low cultivars of white mustard. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2018. N105 (3). 257-264. DOI: 10.13080/z-a.2018.105.033.
18. Ходунков В.П., Заричняк Ю.П. Перспективные методы измерения теплопроводности твердых тел // *Известия вузов. Приборостроение*. 2022. Т. 65. N9. С. 668-676. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.
19. Казаков А.Л., Лемперт А.А., Та Ч.Т. Вычислительный алгоритм для решения задачи упаковки шаров двух различных типов в трехмерное множество с неевклидовой метрикой // *Вычислительные методы и программирование*. 2020. Т. 21. N2. С. 152-163. DOI: 10.26089/NumMet.v21r213.
20. Пономарев С.В., Буланов Е.В., Буланова В.О., Дивин А.Г. Минимизация погрешностей измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного источника теплоты // *Измерительная техника*. 2018. N12. С. 43-45. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-45.
21. Tymchik G. Improving the way of determination substances thermal physical characteristics by direct heating thermistor method. *Przegląd elektrotechniczny*. 2019. N1. 123-128. DOI: 10.15199/48.2019.04.21.

REFERENCES

1. Zagoruiko M., Marin R. Heat and mass transfer in the grain under variable conditions. *Agrarian Scientific Journal*. 2021. 84-87 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2021i7pp84-87.
2. Pavlov S.A., Pekhal'skiy I.A., Marin R.A. Experimental studies of mass transfer in caryopsis at grain oscillating drying. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N4. 32-37 (In Russian).
3. Ol'shanskii A.I., Zhernosek S.V., Gusarov A.M. Investigation of heat and mass transfer in the processes of heat treatment and drying of thermal insulation materials. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2022. Vol. 65. N2. 156-168 (In Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168.
4. Pavlov S.A., Levina N.S., Lukin I.D. Research of selection seeds drying in dense layer. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N1. 22-26 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-22-26.
5. Sorochinsky V.F., Dogadin A.L. Change of limits for humidity and temperature when drying grain crops. *Storage and Processing of Farm Products*. 2019. N1. 47-56 (In Russian). DOI: 10.36107/spfp.2019.78.
6. Yunin V.A., Zakharov A.M., Kuznetsov N.N., Zykov A.V. The drying process of crushed plant material in a drum dryer. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2020. N1(57). 335-349 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-33.
7. Kalandarov P.V. Assessment of the accuracy of the thermogravimetric method for measuring humidity and the effectiveness of the application of this method in the agro-industrial complex. *Metrology*. 2021. N2. 44-62 (In Russian). DOI: 10.32446/0132-4713.2021-2-44-62.
8. Avezova N.I., Matyakubova P.M., Boboyev G.G. Ways to Develop Innovative Processes in Grain Production. *ICISCT*. 2019. N1-4 (In English). DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9012034.
9. Eroshenko G.P., Sharuev N.K., Sharuev V.N., Evstafyev D.P. Design features electrical devices control parameters of agricultural products. *Measurement Techniques*. 2018. N10. 61-65 (In Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-10-61-65.
10. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
11. Shevtsov A.A., Lytkina L.I., Tkach V.V. et al. Modeling of heat treatment of oilseeds high temperature coolant. *Storage and Processing of Farm Production*. 2018. N4. 163-171 (In Russian). DOI: 10.36107/spfp.2018.68.
12. Sorokovaya N.N., Snezhkin Yu.F., Shapar' R.A., Sorokovoi R.Ya. Mathematical simulation and optimization of the continuous drying of thermolabile materials. *Journal of*

- Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. N3. 1180-1190 (In English). DOI: 10.1007/s10891-019-02032-3.
13. Glucharev V.A., Sivitskiy D.V., Popov I.N., Verzilin A.A. Optimization of parameters of energy unit drying agent for grain crops drying. *Agrarian Scientific Journal*. 2018. N 5. 42-45 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.v0i5.349.
 14. Kutuzov S.V., Vasil'chenko G.N., Chirka T.V., Panov E.N. Heat conductivity of carbon materials. *New Refractories*. 2013. N1. 43-48 (In Russian). DOI: 10.36107/spfp.2018.68.
 15. Paziuk V. Study of the properties of rapeseed as a drying object. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 2023. 86-93 (In English). DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-10.
 16. Drannikov A.V., Tertychnaya T.N., Shevtsov A.A. et al. Investigation of the thermophysical characteristics of the Gorka variety triticale grain by the non-stationary thermal regime method. *Proceedings of VSUET*. 2021. Vol. 83. N2. 17-22 (In Russian). DOI: 10.20914/2310-1202-2021-2-17-22.
 17. Ropelewska E., Jankowski K.J., Zapotoczny P., Bogucka B. Thermophysical and chemical properties of seeds of traditional and double low cultivars of white mustard. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2018. N105 (3). 257-264 (In English). DOI: 10.13080/z-a.2018.105.033.
 18. Khodunkov V.P., Zarichnyak Yu.P. Promising methods for measuring the thermal conductivity of solids. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65. N9. 668-676 (In Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-668-676.
 19. Kazakov A.L., Lempert A.A., Ta T.T. An algorithm for packing balls of two types in a three-dimensional set with a non-euclidean metric. *Numerical Methods and Programming*. 2020. 21. N2. 152-163 (In Russian). DOI: 10.26089/NumMet.v21r213.
 20. Ponomarev S.V., Bulanov E.V., Bulanova V.O., Divin A.G. Minimizing the errors of heat-insulating materials heat conductivity and thermal diffusivity measuring by the method of plane pulse source of heat. *Measurement Techniques*. 2018. N12. 43-45 (In Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-45.
 21. Tymchik G. Improving the way of determination substances thermal physical characteristics by direct heating thermistor method. *Przegląd elektrotechniczny*. 2019. N1. 123-128 (In English). DOI: 10.15199/48.2019.04.21.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Евдокимов А.П. – научное руководство, участие в разработке плана исследования, анализе полученных экспериментальных данных, обсуждении материалов статьи, разработка рекомендаций, критический анализ и доработка текста;

Лещенко А.А. – поиск литературы в отечественных и зарубежных источниках, получение экспериментальных данных и их первичный анализ, подготовка текста статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Evdokimov A.P. – scientific guidance, participation in the development of the research plan, analysis of the experimental data, discussion of the article materials, development of recommendations, critical analysis and revision of the manuscript;

Leshchenko A.A. – literature search in domestic and foreign sources, obtaining experimental data and their primary analysis, preparation of the manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

28.08.2024
30.10.2024



Взаимосвязь парка сельскохозяйственной техники и площади пашни

Юлия Сергеевна Ценч,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Анастасия Владимировна Миронова,
научный сотрудник,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Объемы производства зерна и другой продукции растениеводства зависят от наличия земельных ресурсов и степени их сельскохозяйственного использования. (*Цель исследования*) Провести ретроспективный анализ общих тенденций изменения и взаимосвязи площади сельскохозяйственных угодий и парка тракторов. (*Материалы и методы*) Проанализировали этапы становления и развития системы землепользования и вовлечения в оборот сельскохозяйственных угодий в России в трех исторических периодах: 1920-1940, 1945-1990, 1991-2022 годы. Выявили эволюционные факторы и закономерности развития взаимосвязи площади сельскохозяйственных угодий и парка тракторов. (*Результаты и обсуждение*) Отметили, что в результате внедрения программ индустриализации и коллективизации с 1928 по 1940 год прослеживается тенденция увеличения площади сельскохозяйственных угодий с 113 миллионов до 150 миллионов гектаров и парка тракторов с 27 тысяч до 531 тысячи единиц. В 1945 году посевная площадь сократилась до минимального значения 113,8 миллиона гектаров, тракторов – до 397 тысяч единиц. В 1960 году в результате освоения целинных и залежных земель увеличилась посевная площадь до 203 миллиона гектаров, количество тракторов достигло 1122 тысячи. Выявили, что вследствие повышения уровня механизации наибольшее увеличение площади посевных угодий было зафиксировано в 1985 году – 210,3 миллиона гектаров и количество тракторов достигло 2830 тысяч. Установили, что в период 1991-2022 годов происходило системное сокращение парка тракторов, которое привело к выбытию сельскохозяйственных угодий. В 1991 году количество тракторов составляло 1344,2 тысячи, в 2022 году снизилось на 1147,4 тысячи и составило 196,8 тысячи единиц. Распад Советского Союза в 1991 году и переход от государственно-командной экономики к рыночной оказали серьезное влияние на развитие российского сельского хозяйства. (*Выводы*) Динамика использования почвенных угодий в разные периоды отражала как экстенсивный метод ведения хозяйства, так и интенсивный. Экстенсивный путь заключался в увеличении площади сельскохозяйственных угодий за счет освоения целинных, залежных и неиспользуемых земель. В настоящее время развитие идет по интенсивному пути за счет повышения уровня механизации, автоматизации, химизации и увеличения урожайности сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: землепользование, эволюционные факторы, посевная площадь, механизация, этапы развития, почвенные угодья, тракторы.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Миронова А.В. Взаимосвязь парка сельскохозяйственной техники и площади пашни // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 94-99. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-94-99. EDN: WIDOER.

Scientific article

Correlation Between Agricultural Machinery Fleet and Arable Land Area

Yulia S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Anastasia V. Mironova,
researcher,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper examines the dependence of grain and crop production volumes on the availability and utilization of land resources in agriculture. (*Research purpose*) The study carries out a retrospective analysis of overarching trends and correlation between agricultural land area and the size of the tractor fleet. (*Materials and methods*) The analysis focuses on the evolution of land use systems and the integration of agricultural lands into economic turnover over three distinct historical periods in Russia: 1920-1940, 1945-1990, and 1991-2022. The study identifies key evolutionary factors and development patterns in the correlation

between agricultural land area and tractor fleet capacity. (*Results and discussion*) The analysis reveals that the industrialization and collectivization programs implemented between 1928 and 1940 led to a significant expansion in agricultural land area, increasing from 113 million to 150 million hectares, and in the tractor fleet, which grew from 27,000 to 531,000 units. In 1945, the sown area reached a low of 113.8 million hectares, with the tractor fleet reduced to 397,000 units. By 1960, the development of virgin and fallow lands had expanded the sown area to 203 million hectares, and the tractor fleet had grown to 1,122,000 units. The study further identified that the highest recorded expansion in sown land area, reaching 210.3 million hectares, occurred in 1985 due to an increase in mechanization, with the tractor fleet peaking at 2,830,000 units. From 1991 to 2022, however, a steady decline in the tractor fleet led to the gradual withdrawal of agricultural land from use. In 1991, the tractor fleet stood at 1,344,200 units, but by 2022, it had decreased by 1,147,400 units, leaving only 196,800 units. The dissolution of the Soviet Union in 1991 and the shift from a state-command to a market economy had a profound impact on the trajectory of Russian agricultural development. (*Conclusions*) The dynamics of soil use over different periods have reflected both extensive and intensive farming methods. The extensive approach involved expanding agricultural land by developing virgin, fallow, and unused lands. Currently, development follows the intensive path, marked by increased mechanization, automation, chemical use, and higher crop yields.

Keywords: land use, evolutionary factors, sown area, mechanization, stages of development, soil lands, tractors.

■ **For citation:** Tsench Yu.S., Mironova A.V. Correlation between agricultural machinery fleet and arable land area. *Agricultural Machinery and Technology*. 2024. Vol. 18. N4. 94-99 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-94-99. EDN: WIDOER.

Россия издавна является одним из крупнейших производителей зерна в мире. Объемы производства зерна и другой продукции растениеводства в значительной степени зависят от наличия земельных ресурсов и уровня их сельскохозяйственного использования. На вовлечение земель в сельскохозяйственный оборот оказывали влияние различные факторы: процесс хозяйственного освоения и заселения территории в разные периоды истории, особенности природных и климатических условий, плодородие почв, рельеф, характер растительного покрова и др. [1].

Основные успехи в создании и развитии российской сельскохозяйственной науки и практики – почвоведении, агрономии, почвозащитном земледелии, восстановлении сельскохозяйственных угодий, механизации сельского хозяйства связаны с именами выдающихся ученых В.В. Докучаева, П.А. Костычева, К.А. Тимирязева, В.П. Горячкина, В.Р. Вильямса, Д.Н. Прянишникова, Н.М. Сибирицева, К.Д. Глинки, Г.В. Добровольского, Е.Д. Никитина.

Цель исследования – провести ретроспективный анализ общих тенденций изменения и взаимосвязи площади сельскохозяйственных угодий и парка тракторов.

Материалы и методы. Становление и развитие сельского хозяйства России связано с различными эволюционными факторами. Выявление закономерностей развития позволяет проследить взаимосвязь площади сельскохозяйственных угодий и парка тракторов во временные периоды 1920-1940, 1945-1990, 1991-2022 годов.

С 1920 по 1940 г. происходило восстановление разрушенной хозяйственной деятельности и экономики страны после Гражданской войны, переход к

новой экономической политике, был разработан план Государственной электрификации России (ГОЭЛРО). Формировались программы коллективизации и индустриализации сельского хозяйства, устанавливалась система командно-административной экономики, осуществлялась централизация, создавались крупные социалистические производства. Наряду с гражданскими отраслями экономики развивалась оборонная промышленность и укреплялась армия [2].

Великая Отечественная война стала наиболее тяжелым испытанием для сельского хозяйства. Большая часть материально-технической базы колхозов, совхозов и машинно-тракторных станций была мобилизована для нужд армии. На фронт отправлены 9300 тракторов (более 40%), 147 тысяч лошадей (20%). Резкое сокращение поставок новой техники, запасных частей, ГСМ, минеральных удобрений привело к снижению уровня механизации и возвращению к ручному труду в сельском хозяйстве. Значительная часть трудоспособного населения из сельской местности была призвана на фронт: в 1941 г. – 3 млн человек, в 1942 г. – 2,3 млн, в 1943 г. – 1,3 млн человек.

С 1945 по 1990 г. началось послевоенное восстановление народного хозяйства, экономического потенциала страны и социальных условий жизни. Колхозы укрупняются и постепенно переходят в государственные сельскохозяйственные предприятия. Укрепляется система машинно-тракторных станций путем подготовки новых кадров. Нарастает материально-техническая база по производству сельскохозяйственных продуктов, техники и оборудования для обеспечения продовольственной безопасности страны. В агропроизводстве развиваются комплексная механизация, электрификация

и автоматизация, проводятся налоговые и земельные реформы [2].

С 1991 по 2000 г. в России происходит переход от плановой экономики к рыночной. Экономические реформы были направлены на либерализацию цен, приватизацию государственных сельскохозяйственных предприятий и развитие частного предпринимательства. К сожалению, это привело к резкому росту инфляции и сокращению покупательной способности. Наблюдается спад производства во всех отраслях сельского хозяйства. Начали развиваться крестьянско-фермерские хозяйства. Привлечены инвестиции для модернизации отрасли. Введена система государственной поддержки развития сельского хозяйства, в основном путем предоставления субсидий и кредитов для производителей [3].

В последующие годы активно внедряются различные инновационные технологии, направленные на повышение эффективности сельскохозяйственного производства, улучшение качества продукции и снижение негативного воздействия на окружающую среду [4, 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В результате принятого в декабре 1927 г. решения о реализации в стране коллективизации и индустриализации прослеживается тенденция увеличения площади посевных угодий в период с 1928 по 1940 г. со 113,0 млн до 150 млн га, на 41 млн га. Большая часть посевных площадей в 1940 г. была занята под зерновыми культурами – 111 млн га, технические культуры занимали 12 млн га, кормовые – 18 млн га, картофель и овощи – 10 млн га (рис. 1).

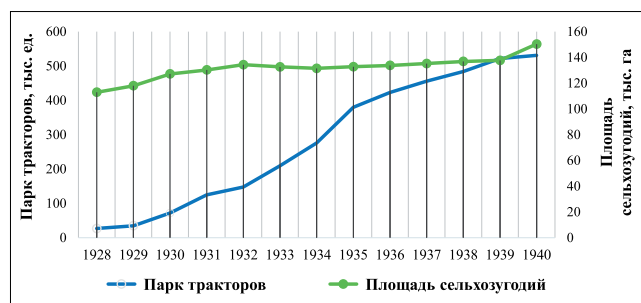


Рис. 1. Анализ взаимосвязи площади сельскохозяйственных угодий и парка тракторов в период с 1928 по 1940 г.
Fig. 1. Analysis of the correlation between agricultural land area and tractor fleet size from 1928 to 1940

Одновременно с увеличением площади сельскохозяйственных угодий возрастает численность тракторов. В результате массовой механизации сельского хозяйства парк тракторов с 27 тыс. ед. в 1928 г. расширился на 121 тыс. ед. до 148 тыс. ед., к 1935 г. достиг 380 тыс. ед., в 1940 г. – 531 тыс. ед. [6].

В послевоенные годы положение сельского хозяйства оставалось особенно тяжелым. В 1945 г. объем производства сельскохозяйственной продук-

ции составлял 60% от довоенного уровня. Посевная площадь агрокультур достигла минимального значения для этого периода 113,8 млн га. Неурожай и засуха в 1946 г. катастрофически снизили урожайность зерновых. Восстановление шло очень медленными темпами из-за перераспределения большей части денежных средств из аграрной сферы в индустриальную. В результате укрупнения совхозов лишь к 1950 г. площадь посевных угодий начинает увеличиваться и составляет 146,3 млн га. Вследствие освоения целинных и залежных земель данный показатель в 1960 г. повысился относительно 1950 г. на 56,7 млн га и составил 203,0 млн га [7].

Вместе с увеличением посевной площади происходит интенсивный рост количества тракторов. В 1945 г. их насчитывалось 397 тыс. тракторов, в 1950 г. – 595 тыс. ед., 1960 г. – 1122 тыс., 1970 г. – 1977 тыс., 1980 г. – 2646 тыс., в 1985 г. – 2830 тыс. тракторов. Значительный прирост основной продукции сельского хозяйства был получен за счет внедрения механизированной сельскохозяйственной техники, притока в отрасль квалифицированных кадров. Также повысились урожайность агрокультур и продуктивность сельскохозяйственных животных. Максимальное увеличение посевных площадей отмечено в 1975 г. – 217,7 млн га, а затем этот показатель начал снижаться. В 1985 г. площадь посевных земель составила 210,3 млн га (рис. 2) [8].



Рис. 2. Анализ взаимосвязи площади сельскохозяйственных угодий и парка тракторов в период с 1945 по 1990 г.
Fig. 2. Analysis of the correlation between agricultural land area and tractor fleet size from 1945 to 1990

В 1991–2022 гг. наблюдается системное сокращение парка тракторной техники, что привело к выбытию посевных угодий из сельскохозяйственного обращения. Так, в 1991 г. насчитывалось 1344,2 тыс. тракторов, в 2022 г. – 196,8 тыс. тракторов (рис. 3) [9].

В результате распада Советского Союза и изменения экономической системы возникли серьезные проблемы, которые повлияли на развитие сельского хозяйства в России. Одна из причин заключалась в отсутствии гарантированного сбыта произведенной сельхозпредприятиями продукции. Ранее стабильные заказы поступали от государства, но с переходом к свободному рынку создалась ситуация

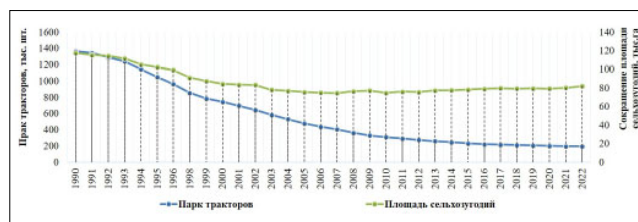


Рис. 3. Анализ взаимосвязи площади сельскохозяйственных угодий и парка тракторов в период с 1990 по 2022 г.
Fig. 3. Analysis of the correlation between agricultural land area and tractor fleet size from 1990 to 2022

неопределенности при реализации товарной продукции. Резко сократилась доля сельскохозяйственных земель и началась их деградация [10].

Другой проблемой была незавершенность аграрных реформ. Сельское хозяйство оказалось в переходном состоянии, когда не были приняты эффективные механизмы управления и регулирования деятельности. Это существенно затруднило развитие отрасли [11].

Сокращение субсидий на производство и резкое снижение поголовья в животноводстве сыграли свою негативную роль. Многие сельскохозяйственные предприятия оказались не готовы к конкуренции и были вынуждены закрываться.

Важно отметить, что возникшие проблемы были вызваны как внешними, так и внутренними факторами, и требовался комплексный подход к их решению. Необходимым шагом стало проведение аграрных реформ, направленных на повышение эффективности производства, обеспечение устойчивого развития, конкурентоспособности сельхозпредприятий. Также остро стоял вопрос о необходимости государственной поддержки для обеспечения продовольственной безопасности страны.

Надо отметить и объективную причину снижения посевных угодий и площади пашни, связанная с существенным увеличением урожайности агрокультур.

В период с 1991 по 2022 г. площади пашни сократились с 132 млн до 116 млн га, на 16 млн га. Также с 1991 г. снижалась урожайность всех видов сельскохозяйственных культур. Только с 2000-х годов началось постепенное восстановление российской экономики и рост инвестиций в сельское хозяйство. В настоящее время в результате повышения автоматизации и роботизации производства урожайность пшеницы, кукурузы, картофеля, овощей открытого грунта, сахарной свеклы повышается (рис. 4, таблица).

Урожайность культур зависит от различных системных факторов. Среди них можно выделить качество семян, применяемые агротехнологии, технические средства, удобрения, средства защиты растений.

Из утраченных 33 млн га (рис. 5) восстановить и вернуть в активное пользование возможно около

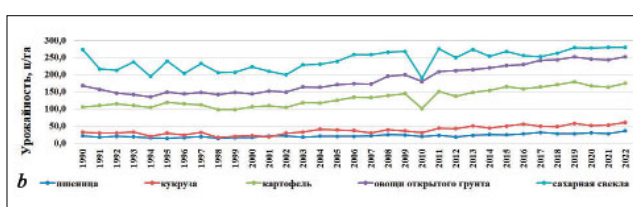
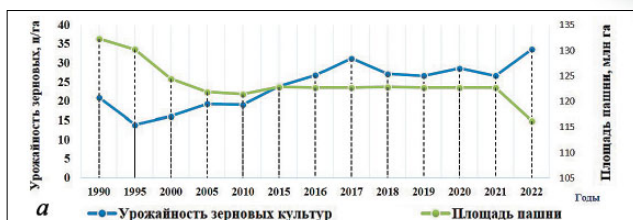


Рис. 4. Динамика площади пашни и урожайности зерновых (а) и отдельных видов сельскохозяйственных культур (б) в период 1990-2022 гг.

Fig. 4. Dynamics of arable land area and grain yield (a) and specific crop yields (b) from 1990 to 2022

Таблица		Table	
УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР AGRICULTURAL CROP YIELDS			
Культура	Урожайность, ц/га		
	1990 г.	2022 г.	прирост
Пшеница	17,3	35,5	↑18,2
Кукуруза	29,1	59,9	↑30,8
Картофель	109,0	174,0	↑65,0
Овощи открытого грунта	156,0	252,0	↑96,0
Сахарная свекла	216,0	279,0	↑63,0

10-12 млн га, в отношении 9-11 млн га это сделать проблематично, а 13-15 млн га утрачены для сельскохозяйственного производства и их восстановление экономически нецелесообразно [11].

Среди основных причин сокращения посевных площадей в России можно выделить: недостаточное количество, физический износ и моральное старение сельскохозяйственной техники по технико-экономическим характеристикам; недостаток средств для внесения удобрений; диспаритет цен на топливо и сельскохозяйственную продукцию; отток трудоспособного населения из сельской местности и концентрация в более крупных сельских поселениях; процесс урбанизации. Из-за удаленности сельхозугодий от мест проживания увеличиваются затраты на транспортировку людей, техники и готовой продукции. Низкая заработная плата в сельском хозяйстве, составляющая не более 35% от средней по стране, также способствует закрытию сельскохозяйственных предприятий [13].

Согласно Постановлению Правительства РФ № 731 от 14 мая 2021 г. с 2022 г. начата реализация госпрограммы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и разви-

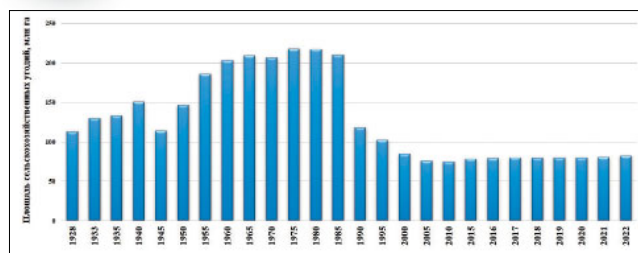


Рис. 5. Динамика посевных площадей в период с 1928 по 2022 г.

Fig. 5. Dynamics of sown area from 1928 to 2022

тия мелиоративного комплекса. Необходимость такой программы обусловлена тем, что из 120 млн га потенциальных посевных площадей около 33 млн га выведены из землепользования и частично деградированы. Программа направлена на введение в оборот более 13 млн га земель в течение 10 лет, на ее реализацию потребуется более 530 млрд руб. бюджетных средств. Основная задача программы – возврат в систему землепользования наиболее ценных для сельского хозяйства пашни, пастбищных угодий и сенокосных лугов. Для исполнения Постановления Правительства РФ № 731 от 14 мая 2021 г. и возврата в систему землепользования неиспользуемых посевных площадей потребуется около 100 тыс. единиц тракторов.

Выводы. На тенденцию формирования взаимосвязи площади сельскохозяйственных угодий и парка тракторов оказали влияние различные факторы становления и развития сельского хозяйства страны. Эволюция в отношении использования земельных угодий прошла путь от экстенсивной системы ведения хозяйства до интенсивной. Экстенсивная система подразумевала увеличение площади сельскохозяйственных угодий путем освоения целинных и залежных земель.

В настоящее время сельское хозяйство развивается в рамках интенсивной системы землепользования на основе повышении уровня механизации, автоматизации и урожайности сельскохозяйственных культур. На урожайность сельскохозяйственных культур значительное влияние оказывают различные системные факторы, такие как качество семян, используемые агротехнологии, технические средства, удобрения и химикаты для защиты растений.

Выбытие 33 млн га сельскохозяйственных угодий из активного землепользования послужило причиной принятия реализации государственной программы по эффективному вовлечению в оборот утраченных угодий. Основные цели программы – восстановить и вернуть в сельскохозяйственный оборот наиболее ценные земли, прежде всего пашни, пастбища и сенокосы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А., Волобуев В.А. Технологии и технические средства для восстановления неиспользуемых и деградированных сельхозугодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. N4. С. 17-21. EDN: KUWBXN.
- Ценч Ю.С., Миронова А.В. Эволюция развития землепользования почвенными угодьями (отечественный и зарубежный опыт) // *Технический сервис машин*. 2023. N1 (150). С. 176-186. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-176-186.
- Ценч Ю.С. Научнотехнический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. N2 (16). С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
- Миронова А.В., Лискин И.В., Панов А.И. Технология восстановления целинных и залежных земель // *Технический сервис машин*. 2020. N2 (139). С. 111-121. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-111-121.
- Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Технология и агрегат для восстановления экологического состояния горных лугов и пастбищ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. N2 (17). С. 20-27. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27.
- Ценч Ю.С., Косенко В.В., Шаров В.В. Эволюция конструкций гусеничных тракторов общего назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. Т. 89. N3. С. 155-166. DOI: 10.17816/0321-4443-109676.
- Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин Агромаш для обработки залежных земель // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N2 (31). С. 40-47. EDN: RXFMCP.
- Косенко В.В., Шаров В.В., Ценч Ю.С. Трактор ДТ-75. Знаменитый долгожитель // *Технический сервис машин*. 2019. N1 (134). С. 216-226. EDN: DTBKWM.
- Кряжков В.М., Шевцов В.Г., Гурылев Г.С., Лавров А.В. Анализ рынка сельскохозяйственных тракторов России в 2008-2013 гг. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N5. С. 12-16. EDN: TCGGMT.
- Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связанных задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N3. С. 18-20. EDN: NVAWBR.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // *Техника и оборудование для села*. 2021. N2 (284). С. 2-7. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.
- Миронова А.В., Лискин И.В., Афонина И.И. Обоснование экономической целесообразности восстановления деградированных и запущенных земель // *Технический сервис машин*. 2020. N3 (140). С. 79-90. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-79-90.

13. Кряжков В.М., Годжаев З.А., Шевцов В.Г. и др. Проблемы формирования инновационного парка сельскохозяй-

ственных тракторов России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N4. С. 5-11. EDN: TZJBWD.

REFERENCES

1. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Sizov O.A., Volobuev V.A. Technologies and technical means for the restoration of unused and degraded farmland. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2009. N4. 17-21 (In Russian). EDN: KUWBXN.
2. Tsench Yu.S., Mironova A.V. Evolution of the soil land use (domestic and foreign experience) (domestic and foreign experience). *Machinery Technical Service*. 2023. N1 (150). 176-186 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-1-176-186.
3. Tsench Yu.S. Scientific and technological potential as the main factor for agricultural mechanization development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. N2 (16). 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
4. Mironova A.V., Liskin I.V., Panov A.I. Technology for restoring virgin and fallow lands. *Machinery Technical Service*. 2020. N2(139). 111-121 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-111-121.
5. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Restoring technology and a seeding unit for recovering mountain meadow. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. N2 (17). 20-27 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27.
6. Tsench Yu.S., Kosenko V.V., Sharov V.V. The evolution of design of general purpose tracked tractors. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022. Vol. 89. N3. 155-166 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-109676.
7. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S. Complex of Agromash machines for processing fallow lands. *Bulletin of VIESKH*. 2018. N2 (31). 40-47 (In Russian). EDN: RXFMCP.
8. Kosenko V.V., Sharov V.V., Tsench Yu.S. Tractor DT-75. Famous pendant. *Machinery Technical Service*. 2019. N1 (134). 216-226 (In Russian). EDN: DTBKWM.
9. Kryazhkov V.M., Shevtsov V.G., Gurylev G.S., Lavrov A.V. Agricultural tractors market analysis from 2008 till 2013. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N5. 12-16 (In Russian). EDN: TCGGMT.
10. Lobachevsky Ya.P. Strength and deformation properties of bonded blackened soils. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2011. N3. 18-20 (In Russian). EDN: NVAWBR.
11. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P. et al. Priority areas of scientific and technical development of the domestic tractor industry. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021. N2 (284). 2-7 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.
12. Mironova A.V., Liskin I.V., Afonina I.I. Economic feasibility of restoration of degraded and neglected lands. *Technical Service of Machines*. 2020. N3 (140). 79-90 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-79-90.
13. Kryazhkov V.M., Godzhaev Z.A., Shevtsov V.G. et al. Problems of formation of Russian innovative agricultural tractors fleet. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N4. 5-11 (In Russian). EDN: TZJBWD.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – постановка проблемы, научное руководство, разработка теоретических предпосылок эволюции развития землепользования почвенными угодьями, формирование общих выводов;

Миронова А.В. – анализ взаимосвязи динамики посевных площадей и парка тракторов, визуализация, подбор и анализ литературных источников, работа с текстом статьи, формирование выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – problem statement, scientific supervision, development of theoretical premises for the evolution of soil land use, formulation of overall conclusions;

Mironova A.V. – analysis of the correlation between the dynamics of sown areas and tractor fleet size, visualization, literature review, manuscript preparation, and conclusion formulation.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

01.10.2024

11.11.2024



Развитие технологий и средств механизации для защиты растений в Российской Федерации

Анатолий Константинович Лысов,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники, e-mail: lysov4949@yandex.ru;

Тимур Викторович Корнилов,
ведущий специалист,
e-mail: tvkornilov@mail.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург-Пушкин, Российская Федерация

Реферат. Отметим достижения отечественных ученых, инженеров и конструкторов по применению пестицидов в сельском хозяйстве. (*Цель исследования*) Провести ретроспективный анализ развития технологий защиты растений и средств механизации в Российской Федерации. (*Материалы и методы*) Использовали публикации в научных журналах, монографии, материалы конференций, экспозицию научно-методического кабинета (музея) Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений, архивные фотоматериалы. (*Результаты и обсуждение*) Представлены сведения о создании в 1931-1941 годах отечественных конных, навесных тракторных, автомобильного полевого и портального садового опрыскивателей. В 1960-е годы усилия были направлены на определение оптимальных размеров и радиуса фитоцидного действия капель распыленной жидкости для внесения средств защиты растений, прежде всего при малообъемном опрыскивании. Развивались аэрозольные технологии. Отметим вклад доктора технических наук В.Ф. Дунского в разработку теоретических основ физики и техники мелкокапельного и малообъемного опрыскивания. Важное значение для развития и совершенствования технических средств защиты растений имела разработка системы машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства при научно-методическом руководстве ученых Всероссийского института механизации сельского хозяйства. С уменьшением норм расхода рабочей жидкости потребовались ротационные (дисковые) распылители для наземной и авиационной опрыскивающей аппаратуры. Были созданы более экологически безопасные распылители с сепарацией или принудительным осаждением мелких капель, предложен способ электрозарядки капель. Современные подходы в разработке новых технологий защиты растений базируются на концепции точного земледелия. К ним относится дифференцированная обработка культур с учетом пространственной неоднородности распределения вредных объектов на участках поля. (*Выводы*) Технологии защиты растений и средства механизации развивались и совершенствовались с появлением новых химических средств. Следует отметить использование спектрометрии для формирования библиотек спектральных образов культурных и сорных, здоровых и больных растений для автоматической дешифрации снимаемой информации с участков поля с помощью нейронных сетей (искусственный интеллект), применение беспилотных летательных аппаратов для внесения средств защиты растений.

Ключевые слова: опрыскиватель, опыливатель, аэрозольная обработка, протравливание семян, малообъемное опрыскивание, ультрамалообъемное опрыскивание, электрозарядка капель, биологическая эффективность, нейронные сети, система машин, система государственных испытаний..

■ **Для цитирования:** Лысов А.К., Корнилов Т.В. Развитие технологий и средств механизации для защиты растений в Российской Федерации // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N4. С. 100-108. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-100-108. EDN: WSAUFG.

Scientific article

Advancements in Plant Protection Technologies and Mechanization in the Russian Federation

Anatoly K. Lysov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher, laureate of the Russian
Government Prize in the field of science
and technology, e-mail: lysov4949@yandex.ru;

Timur V. Kornilov,
leading specialist,
e-mail: tvkornilov@mail.ru

All-Russian Institute of Plant Protection, St.Petersburg–Pushkin, Russian Federation

Abstract. The paper highlights the achievements of domestic scientists, engineers and designers in pesticide application in agriculture. (*Research purpose*) The study provides a retrospective analysis of the evolution of plant protection technologies and mechanization tools in the Russian Federation. (*Materials and methods*) The research draws on a variety of sources, including publications in scientific journals, monographs, conference proceedings, archival photographs, and exhibits from the scientific and methodological office (museum) of the All-Russian Research Institute for Plant Protection. (*Results and discussion*) The paper details the development of domestic horse-drawn, mounted tractor, automobile field and portal garden sprayers in 1931-1941. In the 1960s, research focused on determining the optimal droplet size and phytocidal action radius for low-volume spraying of plant protection products. Aerosol technologies were developed. The paper highlights the contribution of Dr.Sc. V.F. Dunskey in establishing the theoretical foundations of fine-droplet and low-volume spraying physics and technology. It also emphasizes the development and enhancement of plant protection technologies by creating a comprehensive system of machines for agricultural mechanization. This progress was achieved under the scientific and methodological guidance of experts from the All-Russian Institute of Agricultural Mechanization. As the consumption rates of the working fluid decreased, rotary (disk) sprayers became essential for both ground and aerial spraying equipment. To enhance environmental safety, more eco-friendly sprayers were developed with systems for small droplet separation or forced sedimentation, and a method for electrically charging droplets was introduced. Modern approaches to the development of new plant protection technologies are based on the principles of precision farming. These approaches include differentiated crop treatment that considers the spatial heterogeneity in the distribution of harmful organisms within field areas. (*Conclusions*) Plant protection technologies and mechanization tools evolved and improved with the introduction of new chemical agents. Notably, spectrometry is used to create spectral image libraries of cultivated and weedy, healthy and diseased plants, facilitating the automatic decoding of data collected from field through neural networks (artificial intelligence). Additionally, unmanned aerial vehicles are utilized for the application of plant protection products.

Keywords: sprayer, pollinator, aerosol treatment, seed treatment, low-volume spraying, ultra-low-volume spraying, droplet electric charging, biological efficiency, neural networks, system of machines, state testing.

■ **For citation:** Lysov A.K., Kornilov T.V. Advancements in plant protection technologies and mechanization in the Russian Federation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 100-108 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-100-108. EDN: WSAUFG.

Защита сельскохозяйственных культур от вредителей, болезней и сорной растительности относится к ведущим мероприятиям сохранения урожая. Масштабы обработки посевов средствами защиты, необходимость охраны окружающей среды и соблюдения санитарно-гигиенических условий требуют высокого уровня механизации технологических процессов применения пестицидов.

Цель исследования. Ретроспективный анализ развития технологий и средств механизации по защите растений в Российской Федерации.

Материалы и методы. Для сбора и анализа информации использовали историко-аналитический метод. Рассмотрены и проанализированы литературные источники, статьи в научных журналах, монографии, материалы конференций, экспозиции научно-методического кабинета (музея) ВНИИ защиты растений, архивные фотоматериалы.

Исследовали этапы создания и совершенствования технологий и средств механизации для опрыскивания посевов (полнообъемное, малообъемное и ультрамалообъемное), протравливания посевного и посадочного материала, использования аэрозольных методов. Рассмотрены аспекты применения цифровых технологий в системах управления мероприятиями по защите растений. Уделено внимание современным методам оценки качества внесения препаратов химической защиты агрокультур,

дистанционного фитосанитарного мониторинга на основе оригинальных работ отечественных и зарубежных авторов.

Результаты и обсуждение. Становление отечественной науки в области механизации защиты растений относится к началу 1930-х годов. В феврале 1931 г. во Всесоюзном институте защиты растений (ВИЗР) в Киеве был организован отдел механизации как головное научно-конструкторское подразделение по механизации защиты растений на базе Политехнического института. Основу коллектива составили аспиранты ВИЗР И.Г. Чайко, А.В. Абрамсон, В.Г. Красько, Я.А. Мейсахович, П.Г. Давыдов, Ф.Е. Пушин под научным руководством профессора И.П. Яценко.

В создании лаборатории механизации непосредственно в Ленинграде большую роль сыграл И.Г. Чайко, возглавивший в ноябре 1932 г. опорный пункт отдела механизации ВИЗР. Опорный пункт занимался испытаниями отечественной и закупаемой из-за рубежа техники для защиты растений, а также разработкой методик испытаний. Вскоре сам отдел из Киева был переведен в Ленинград. Заведующим лабораторией механизации стал И.Г. Чайко, его заместителем Я.А. Мейсахович, научным руководителем профессор И.П. Яценко.

В довоенные годы основными технологиями защиты растений от вредителей и сорняков были

опрыскивание и опыливание. В связи с этим научные исследования в лаборатории механизации были направлены на создание рабочих органов к опрыскивающей технике и опыливателям. Из-за отсутствия специализированного конструкторского бюро здесь же проводились опытно-конструкторские работы. На базе мастерской ВИЗР изготавливали экспериментальные образцы, а изготовление опытных и промышленных образцов заказывали на заводе «Вулкан».

Лаборатория заняла в стране ведущие позиции по разработке новой техники для защиты растений. В 1931-1941 гг. появились первые конные, а затем навесные тракторные опрыскиватели, автомобильный полевой и садовый опрыскиватели (рисунки 1 и 2). Исследования по созданию комбинированного опрыскивателя-опыливателя проводил Ф.Е. Пушкин. Эта разработка была удостоена Сталинской премии.



Рис. 1. Конный опрыскиватель «ЗАРА»
Fig. 1. ZARA horse sprayer

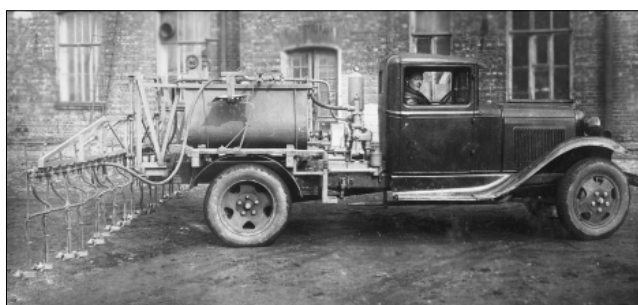


Рис. 2. Автомобильный опрыскиватель на базе «Газ АА»
Fig. 2. Car sprayer based on «Gas AA»

В начале Великой Отечественной войны ведущие специалисты лаборатории И.Г. Чайко, Н.К. Тарнович, Я.А. Мейсахович были призваны в армию, А.В. Абрамсон ушел в народное ополчение.

После войны начался новый этап развития техники для защиты растений. Во Львове были организованы ГСКТБ по машхимзащите и завод по выпуску опрыскивающей техники «Львовхиммаш». Усилились акценты на агротехнические требования к новым машинам, рабочим органам, технологиям применения пестицидов.

Большое внимание уделялось защитной обработке от головневых заболеваний перед посадкой семян, прежде всего зерновых культур. Совместно с ГСКТБ по машхимзащите был создан агрегат ПЗ-10 «Колос» для полусухого протравливания аэрозолями с размером капель до 150 мкм. Аэрозоли получали с помощью дискового распылителя.

Взамен конно-моторных опрыскивателей предлагались новые прицепные и навесные опрыскиватели, опыливатели для полевых культур и многолетних насаждений. По разработанным лабораторией механизации ВИЗР агротехническим требованиям в ГСКТБ по машхимзащите созданы первый отечественный прицепной тракторный опрыскиватель ОПВ с объемом бака 1200 л, опрыскиватель на самоходном шасси ОСШ-15, опрыскиватель-опыливатель навесной комбинированный ОНК-Б с рабочим давлением 10-25 атм и нормой расхода рабочей жидкости 750-1200 л/га.

В начале 1960-х годов появились препараты для химической обработки растений на основе хлор- и фосфорорганических соединений. Для их внедрения требовалось изменить подходы к оценке равномерности распределения рабочей жидкости на поверхности и густоты покрытия. Ставилась задача снизить нормы расхода жидкости на основе ленточного, малообъемного и ультрамалообъемного опрыскивания.

Токсикологические исследования показали, что эффективность новых технологий опрыскивания определяется не количеством израсходованного раствора на единицу площади, а дисперсностью распыла и густотой покрытия поверхности (Тарнович Н.К. Основы МО опрыскивания сельскохозяйственных культур. М.: Сельхозгиз. 1968. С. 23). Начались активные изыскания с целью определения оптимальных размеров капель распыленной жидкости и радиуса фитоцидного действия при различных технологиях внесения химических средств, прежде всего малообъемного опрыскивания.

С помощью штанговых опрыскивателей ОНК-Б, ОПШ-15, гербицидно-аммиачной машины ГАН-8 Я.А. Мейсаховичем были разработаны экономичные наконечники (распылители), позволявшие сократить расход жидкости приблизительно в 3 раза (Дунский В.Ф. Физика и техника мелкокапельного и МО опрыскивания. М.: Сельхозгиз. 1968. С. 7-13).

Внедрение новых распылителей позволило применять малообъемное опрыскивание посевов сахарной свеклы против свекловичного долгоносика и посадок картофеля против колорадского жука с нормой расхода рабочей жидкости 135 вместо 400 л/га. Увеличилась производительность машин и снизилась стоимость обработки посевов.

Большую роль в планировании научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ игра-

ла разработанная при научно-методическом руководстве специалистов ВИМ «Система машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства». На основе этого документа планировалась деятельность сельхозмашиностроения, решались задачи по комплексному обеспечению техникой сельского хозяйства в зональном его развитии [1, 2].

Следует отметить значительный вклад руководителей лаборатории системы машин ВИМ Л.М. Пилюгина и В.М. Бейлиса по научно-методической помощи и координации при формировании раздела «Системы машин в области механизации технологических процессов защиты растений».

Для повышения эффективности и биологической безопасности пестицидов в 1960-х годах разработана новая концепция создания машин с учетом биологических особенностей вредителей сельскохозяйственных культур и патогенных микроорганизмов, понимания физических основ процесса внесения агрохимикатов и его управления [3].

Резко возросшие объемы применения средств защиты растений определили приоритетные направления высокопроизводительных машин (аэрозольные генераторы, вентиляторные опрыскиватели и опыливатели) взамен. Требовалось обеспечить большую ширину захвата за счет транспортировки капель жидкости на поверхность воздушным потоком. Принцип действия заключался в свободном выпадении капель из воздушно-жидкостного потока [4].

Весомый вклад в разработку теоретических основ физики и техники мелкокапельного и малообъемного опрыскивания принадлежит доктору технических наук В.Ф. Дунскому, который в свое время учился в аспирантуре ВИЗР. Он обосновал и реализовал метод обработки растений аэрозолями с использованием ветра, что позволило резко увеличить ширину захвата аэрозольных генераторов и вентиляторных опрыскивателей. На этом принципе были созданы опрыскиватели с шириной захвата до 200 м.

Для защиты многолетних насаждений (садов, виноградников, хмельников) в лаборатории механизации ВИЗР проводились исследования по разработке технологии и исполнительных органов к вентиляторным опрыскивателям. Изучался характер истечения воздушного потока из сопла, распределение в его сечении распыляемого раствора, дальность и способность воздушного потока транспортировать капли диспергируемой жидкости к цели. Была определена величина сопротивления кроны деревьев воздушному потоку (Лепехин Н.С. Исследования воздушно-жидкостного потока вентиляторных опрыскивателей. М.: Сельхозмашиздат. 1968. С. 24-42).

Изучались вопросы аэрозольной обработки агрокультур с применением механического, термического и термомеханического способов образования аэрозолей. Исследовалось влияние метеорологических факторов на движение и оседание аэрозолей, в частности над посевами риса. Этим направлением занимался старший научный сотрудник лаборатории Э.И. Бонч. Было установлено, что эффективность осаждения высокодисперсного аэрозоля в значительной степени определяется состоянием приземного слоя воздуха: разностью температуры на различных горизонтах слоя, величиной турбулентности и восходящих конвективных токов (Бонч Э.И. Исследования технологии аэрозольной обработки сельскохозяйственных культур. М.: Сельхозмашиздат. 1968. С. 46-57).

В середине 1980-х годов при совместном участии Института химической кинетики и горения СО АН СССР, СибНИИ земледелия и химизации СО ВАСХНИЛ, других научных организаций была предложена принципиально новая технология аэрозольной обработки сельскохозяйственных культур против вредителей с применением генератора регулируемой дисперсности (Аэрозольные обработки сельскохозяйственных культур против вредителей с применением генератора регулируемой дисперсностью. Рекомендации. Госагропром РСФСР. СО ВАСХНИЛ. Новосибирск. 1987. С. 44). Прогрессивность технологии заключалась в том, что, зная вид насекомого, против которого проводится обработка, выбиралась необходимая дисперсность распыла для максимального отложения препарата на обрабатываемом объекте [5, 6].

Для совершенствования технологии применения гербицидов под руководством И.Н. Велецкого при участии Н.С. Лепехина и аспиранта ВИЗР И.Р. Бетенева исследовался ленточный способ внесения защитного препарата (Велецкий И.Н., Лысов А.К., Лепехин Н.С. и др. Механизация защиты растений. М.: Агропромиздат. 1992. 223 с). Установили, что ленточное внесение на пропашных культурах нельзя проводить существующими штанговыми опрыскивателями из-за невозможности стыковки междурядий. Однако такой способ подходил при одновременном выполнении с операциями высева семян или культивации (Методические указания по применению гербицидов ленточным способом. М.: Колос. 1970. 56 с.).

Для распыления ленточным способом предлагались приспособления к культиваторам и сеялкам, новый тип рециркуляционных устройств, обеспечивающих возврат излишка рабочей жидкости в бак опрыскивателя. При ширине ленты опрыскивания 25 см расход препарата и воды в сравнении со сплошным внесением сокращался в 2,8 раза при междурядьях 70 см и в 3,6 раза при междурядьях 90 см.

В этот же период в лаборатории механизации ВИЗР проводились работы по организации и научно-методическому руководству государственных испытаний технологий и способов применения средств защиты растений от вредителей, болезней и сорной растительности. При комплексной оценке учитывались используемые препараты, технология внесения и технические средства. Научно-методическое руководство и испытания осуществляли сотрудники лаборатории Я.А. Мейсакевич, Н.К. Тарнович, И.Н. Велецкий, Э.И. Бонч, Н.С. Лепехин, инженеры и агрономы Г.Г. Созин, В.Н. Гаврилова, Н.Я. Кочнева.

По результатам государственных испытаний в 1968-1971 гг. Объединенный научно-технический совет рекомендовал внедрить новые прогрессивные технологии защиты от вредителей, болезней и сорняков. В их числе:

- малообъемное опрыскивание садовых насаждений (расход рабочей жидкости 350-500 л/га при повышении концентрации пестицидов в 3-4 раза, опрыскиватели ОВС-А и ОВТ-1);
- малообъемное опрыскивание виноградников (расход рабочей жидкости 100-500 л/га при повышении концентрации пестицидов в 2-3 раза, опрыскиватели ОВ-4, ОМБ-500, ОУМ-4);
- ленточное внесение жидкого гербицида эпта-на с немедленной заделкой в верхний слой почвы для защиты посевов сахарной свеклы (расход гербицида 2,8 кг/га, жидкости 200 л/га, подкормщик-опрыскиватель ПОУ) и др.

В 1975-1986 гг. в лаборатории механизации под руководством И.Н. Велецкого занимались совершенствованием технологий ленточного внесения гербицидов, малообъемного (МО) и ультрамалообъемного (УМО) опрыскивания, применения гранулированных и микрогранулированных препаратов, пены для защиты растений, созданием опрыскивающей аппаратуры на воздушной подушке. И.Н. Велецким была заложена основа комплексной механизации процессов защиты растений путем создания машин для применения химических и биологических средств защиты растений.

Первым реальным шагом в комплексной механизации защиты растений стало создание семейства опрыскивателей на базе ОН-400. Одновременно менялась концепция развития техники для защиты растений. На первый план выдвигаются задачи экологической безопасности для растений: уменьшение сноса, снижение норм расхода рабочей жидкости и препарата, разработка прогрессивных технологий протравливания посевного материала и опрыскивания. Из-за опасности загрязнения окружающей среды значительно уменьшилось, а затем полностью прекратилось использование технологии опыливания, обработки полевых культур

вентиляторными и аэрозольными генераторами методом бокового дутья по ветру.

Совершенствование штанговых опрыскивателей шло по пути повышения производительности за счет ширины захвата, перехода на новый тип низконапорных распылителей, обеспечивающих качественный распыл при давлении от 1 до 4 атм, уменьшения сноса мелких капель из зоны обработки.

Увеличить ширину захвата опрыскивающей техники невозможно было без эффективной стабилизации штанги и дистанционного управления складывания и раскладывания ее секций. Решение этих задач позволило создать новую опрыскивающую аппаратуру для полевых культур (ОПШ-15-01, ОП-2000-2-01, ОМ-620-2, ОП-3200) с нормой внесения рабочей жидкости 75-300 л/га.

Переход на технологии с уменьшенными нормами расхода рабочей жидкости потребовал реализации нового направления в технике — ротационных (дисковых) распылителей для наземной и авиационной опрыскивающей аппаратуры. В развитие этого направления значительный вклад внесли аспиранты лаборатории механизации ВИЗР В.Ф. Дунский и Г.Е. Церуашвили. По результатам изучения качественных показателей распыла вращающихся дисковых распылителей были разработаны агротехнические требования на семейство ультрамалообъемных монтируемых опрыскивателей многолетних насаждений и полевых культур от вредителей, болезней и сорняков с нормой расхода рабочей жидкости 1-5 л/га на полевых культурах и 25-40 л/га для садов и виноградников.

Также были разработаны агротехнические требования на семейство малообъемных монтируемых и прицепных опрыскивателей.

Параллельно с созданием новой техники отрабатывались технологии мало- и ультрамалообъемного опрыскивания, в них снижение норм расхода препарата достигалось за счет качества распыла и снижения потерь пестицида. Так, проведены производственные испытания обработки опрыскивателем ОМ-630 посадок картофеля против фитофтороза и колорадского жука: нормы расхода рабочей жидкости составила 10 л/га, препарата снизилась на 25 и 50% при ширине захвата 40 м. Для предотвращения испарения капель диспергируемой жидкости в раствор препарата вносили 30%-й водный раствор мочевины (Применение ультрамалообъемного опрыскивания растений картофеля для защиты от фитофтороза и колорадского жука. Рекомендации. М.: Агропромиздат. 1989. С. 15).

Совместно со специалистами лаборатории инсектоакарицидов В.В. Курдюковым и А.А. Смирновой испытывались технологии ультрамалообъемного опрыскивания в борьбе с саранчовыми при

норме расхода рабочей жидкости 1-5 л/га и сниженной на 50% нормой расхода инсектицида в Якутии и Павлодарской области. Была достигнута 100%-ная биологическая эффективность защитных мероприятий.

Таким образом, практически было доказано, что новые технологии малообъемного и ультрамалообъемного опрыскивания позволяют уменьшить нормы расхода препаратов без снижения биологической эффективности при значительном экономическом эффекте и улучшении экологической безопасности для окружающей среды.

В этот же период в лаборатории механизации создавались новые технологии и средства с целью исключить основной недостаток опрыскивающей техники – снос препарата за пределы обрабатываемой зоны. Для снижения негативных последствий сноса при внесении гербицидов предназначался принципиально новый рабочий орган для контактного смачивания сорной растительности. Он состоял из специального сетчатого барабана с размером ячеек, исключающим фильтрацию рабочего раствора. Данная технология рекомендовалась только для использования на очагах сорной растительности пастбищ и в коммунальном хозяйстве для обработки газонов и неудобий [7].

Под руководством А.А. Цырина разрабатывалась технология внесения гранул для защиты от нематод сахарной свеклы, зерновых культур от вредителей и болезней, картофеля одновременно с высевом семян. Были определены основные параметры технологии, созданы аппликаторы для внесения гранул, разработан электронный стенд для исследований различных систем дозирования гранул. Многолетние испытания показали, что в условиях недостаточной влажности почвы эффективность данного метода резко снижается и становится экономически неоправданной. Поэтому такая технология была рекомендована в зонах с достаточным содержанием влаги в почве.

Поиск способов уменьшения сноса рабочей жидкости проводился по направлению создания рабочих органов с принудительным осаждением капель воздушным потоком или сепарацией мелких капель-спутников, подверженных сносу из зоны обработки, а также электростатической.

Совместно с Украинским институтом механизации и электрификации изучались возможности создания для штанговых опрыскивателей вращающихся дисковых распылителей с принудительным осаждением капель. В результате был предложен пневмостантовый опрыскиватель с принудительным осаждением капель (Патент RU2050133, 1995). Испытания опытного образца подтвердили высокую эффективность устройства с нормой расхода рабочей жидкости 10-40 л/га.

Совместно с НИИ экспериментальной физики разрабатывался опрыскиватель с сепарацией мелких капель [8]. Наличие в спектре распыла большого количества наиболее подверженных сносу капель размером до 60 мкм во всем мире сдерживало широко-масштабное использование вращающихся дисковых распылителей для технологий МО и УМО опрыскивания. В связи с этим была предложена конструкция вращающегося дискового распылителя, обеспечивающего сепарацию капель до 50-60 мкм [9].

С 1994 по 1998 г. технологии опрыскивания с сепарацией мелких капель испытывались на зерновых, картофеле и овощных культурах с нормами расхода рабочей жидкости 1-20 л/га и сниженной на 50% нормой расхода препарата. Испытание опрыскивателя с применением инсектицида «Децис» против пиявицы при норме расхода рабочей жидкости 10 и 20 л/га в Ростовской области на зерновых культурах показало высокую биологическую эффективность защитных мероприятий: 84-93% при снижении в два раза нормы расхода препарата. Агротехнологическая оценка качества опрыскивания подтвердила, что полное отсутствие подверженных сносу мелких капель позволяет экономить 3-10% пестицида.

По техническому заданию ВИЗР на ОАО «Подольский электромеханический завод» был разработан опрыскиватель с сепарацией мелких капель ОСК-200 (Лысов А.К. Современные технологии и средства механизации для систем интегрированной защиты растений. Санкт-Петербург-Пушкин: ООО «АльфаМиг», 2019. 164 с.).

Принципиально новым направлением повышения эффективности использования СЗР путем сокращения потерь препаратов, снижения норм расхода рабочей жидкости и более точного нанесения стал переход на технологию опрыскивания с электростатической зарядкой капель. Лаборатория ВИЗР проводила эти работы совместно с Московским энергетическим институтом, Днепропетровским химико-технологическим институтом, ГСКБ по машхимзащите. Был предложен пневмостантовый опрыскиватель с электростатической зарядкой капель, на котором отрабатывались регламенты применения технологии опрыскивания с электростатической зарядкой капель на картофеле и овощных культурах.

Согласно исследованиям технологии опрыскивания с электростатической зарядкой капель, густота капель на верхней поверхности листа увеличивается в десятки раз и в 2-3 раза на его нижней стороне (Цырин А.А., Лысов А.К., Корнилов Т.В. и др. Снижение экологической опасности применения пестицидов при пневматическом и электростатическом способах опрыскивания сельскохозяйственных культур. СПб: ВИЗР. 1995. С. 533-534). Это дает возможность при норме рабочей жидкости 20 л/га

снизить в 2-4 раза норму расхода препарата. Впервые была теоретически обоснована и разработана конструкция дискового распылителя с электрозарядкой капель, что позволило снизить энергоёмкость опрыскивателей, отказавшись от пневматического распыла для зарядки капель (Патент RU2089299, 1997). Также был разработан новый инжекторный центробежный распылитель с открытой камерой (Патент RU1787409, 1993).

В начале XXI века в целях уменьшения риска окружающей среде из-за сноса мелких капель полевые штанговые опрыскиватели стали оснащаться новым поколением инжекторных щелевых плоскофакельных распылителей различных типоразмеров для гербицидов, инсектицидов, фунгицидов и микробиологических препаратов.

Для снижения энергетических затрат, удельного давления на почву и упрощения гидравлической схемы подачи рабочей жидкости на распылители разработана конструкция вращающегося дискового перфорированного барабана с принудительным осаждением мелких капель (рис. 3).

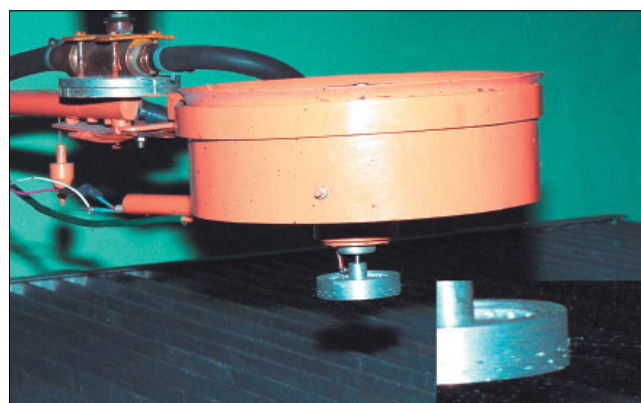


Рис. 3. Ультрамалообъемный распылитель с принудительным осаждением капель

Fig. 3. Ultra-low-volume forced droplet atomizer

Образующиеся капли в спектре распыла перфорированного барабана за счет направленного воздушного потока, создаваемого крыльчаткой вентилятора, принудительно осаждаются на обрабатываемую поверхность (Патент RU2574678, 2016). Направленный воздушный поток, выходящий из цилиндрического кожуха корпуса распылителя, имея однородную скорость по сечению, воздействует на спектр капель распыленной жидкости, создаваемым перфорированным барабаном. Такой опрыскиватель может работать целую смену при одной заправке [10].

Важнейшим направлением снижения пестицидной нагрузки на агроценозы и обеспечения экологической безопасности для окружающей среды являются агротехнологии, базирующиеся на концепции *Precision Farming* (точное земледелие –

Precision Agricultural). Прогресс в развитии цифровых технологий на основе высокопроизводительных персональных компьютеров с большим объемом памяти, широкое распространение Интернета позволяют использовать качественно новые подходы. Такие технологии создают реальные возможности снизить пестицидную нагрузку на агроценозы, повысить качество растениеводческой продукции, сократить затраты на мероприятия по защите растений [11].

Разрабатываются дистанционные методы геокодированного съема информации о неоднородности распределения сорной растительности на участках поля. Предложен новый метод обработки снимаемой информации (рис. 4). Для преобразования исходного изображения распределения сорной растительности на поле в частотную область совместно с Университетом аэрокосмического приборостроения (Лысов А.К., Корнилов Т.В., Федченко В.Г., Хабаров М.П. Новые методы дистанционного мониторинга с использованием сверхлегких летательных аппаратов; в сб.: Высокопроизводительные и высокоточные технологии и методы диагностики и фитосанитарного мониторинга. М.: РАСХН. 2007. С. 26-38) предложено использовать прямое дискретное преобразование Фурье [12].

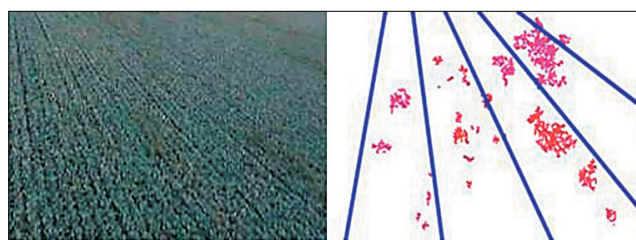


Рис. 4. Фотография капустного поля до и после обработки с помощью фильтров

Fig. 4. Photo of a cabbage field before and after processing using filters

Проводятся работы по использованию метода спектрометрии для формирования библиотек спектральных образов культурных и сорных, здоровых и больных растений для технологий дискретного внесения средств защиты растений [13, 14]. Для анализа светотражательных характеристик здоровых и больных растений картофеля и автоматизации процесса дешифрации дистанционно снимаемой информации разработана специальная нейросетевая программа *WaveLetNN* анализа спектрально-отражательных характеристик растений (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669473, 2023).

В настоящее время продолжают исследования по использованию беспилотных воздушных судов (БВС) для дистанционного мониторинга и внесения средств защиты растений.

Выводы. Исторический анализ развития технологий и средств механизации для защиты растений охватывает период почти 100 лет и деятельность нескольких поколений ученых, инженеров и конструкторов по применению пестицидов в сельском хозяйстве. Технологии и средства механизации внесения пестицидов начали разрабатываться в 1930 г. в лаборатории механизации, организованной на базе Всесоюзного института защиты растений. С учетом имеющегося на тот момент ассортимента агрохимических средств создавались первые отечественные опрыскиватели. По своим параметрам средства не отвечали требованиям экологической безопасности, прежде всего из-за применения препаративных форм пестицидов в виде дустов и смачивающихся порошков.

С появлением более эффективных средств защиты растений развивались новые направления внесения пестицидов в виде аэрозолей и широкозахватных вентиляторных опрыскивателей, обработки аэрозолями с использованием ветра, что позволило резко увеличить ширину захвата аэрозольных генераторов и вентиляторных опрыскивателей.

Для протравливания семенного материала был создан протравливатель зерна ПЗ-10 «Колос» механическим аэрозолем с размером капель до 150 мкм, получаемым с помощью дискового распылителя.

Предложены технологии и средства механизации для малообъемного и ультрамалообъемного опрыскивания со сниженным расходом рабочей жидкости и препаратов. Апробирована технология электрозарядки капель не более 50 мкм, в несколько раз повышающая густоту покрытия поверхности.

Для ультрамалообъемного опрыскивания созданы рабочие органы с вращающимися дисковыми распылителями и сепарацией мелких капель, перфорированные или сетчатые барабаны с принудительным осаждением мелких капель. Их применение позволяет значительно уменьшить снос препаратов в окружающую среду и нормы расхода агрохимикатов до 50%.

В рамках реализации концепции «Умное сельское хозяйство» появились новые разработки на основе геоинформационных технологий для дифференцированного внесения химикатов с учетом пространственной неоднородности распределения вредных объектов на участках поля.

Для использования нейронных сетей по автоматической дешифрации снимаемой информации о фитосанитарном состоянии посевов на основе спектрометрии формируется библиотека спектральных образов культурных, сорных, здоровых и больных растений, что позволит оперативно управлять средствами механизации внесения пестицидов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бейлис В.М., Московский М.Н., Лавров А.В. Система технологий и машин в современных условиях // *Аграрный научный журнал*. 2022. N12. С. 70-72. DOI: 10.28983/asj.y2022i12pp70-72.
2. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
3. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Система машин как фактор научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. N4. С.67-72. DOI: 10.31857/S2500262724040123.
4. Ценч Ю.С., Сидоров И.В. Этапы развития технологий и технических средств для внесения удобрений и защиты растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N3. С. 14-22. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22.
5. Куценогий К.П. Теоретические основы оптимизации технологии применения инсектицидных аэрозолей // *Химия в сельском хозяйстве*. 1981. Т. XIX. N10. С. 12-18.
6. Киров Е.И., Горбунов Н.Н., Поскольный Н.Н. и др. Эффективность применения инсектицидных аэрозолей для защиты сельскохозяйственных культур от вредителей; в сб.: Оптимизация технологии применения инсектицидных аэрозолей. Новосибирск: СО ВАСХНИЛ. 1983. С. 26-32.
7. Ценч Ю.С. Становление и развитие системы испытаний сельскохозяйственных машин и орудий в России. В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова. Годичная научная конференция. М.: ИИЕТ РАН, 2020. С. 154-158. EDN: PRZZHC.
8. Никитин Н.В., Спиридонов Ю.Я., Шестаков В.Г. Научно-практические аспекты технологии применения гербицидов в растениеводстве. М.: Печатный город. 2010. 187 с.
9. Баркалов А.Г., Боровко Ю.И., Веретенников Ю.М. и др. Фитосанитарный щит для продовольствия России; под ред. акад. В.А. Захаренко и К.В. Новожилова; Рос. акад. с.-х. наук. ВНИИ защиты растений. М.; СПб.: Интрейд корпорейшн. 1998. 140 с.
10. Гончаров Н.Р., Лысов А.К., Наумова Н.И., Корнилов Т.В. Экономическая эффективность УМО с принудительным осаждением капель при защите посадок картофеля от сорняков // *Экономика сельского хозяйства и перерабатывающих предприятий*. 2019. N3. С. 54-57. EDN: UCYLCB.
11. Лысов А.К. Методологические подходы для решения задач по дискретному внесению пестицидов // *Вестник защиты растений*. 2018. N3(97). С. 5-9. DOI: 10.31993/2308-6459-2018-3(97)-5-9.
12. Lysov A.K., Fedchenko V.G. New approaches for remote

reading the information on the heterogeneity of the distribution of weeds in the areas of the field for a application of plant protection products. XVIII Int. Plant Protection Congress. Berlin. 2015. 141.

13. Лысов А.К., Павлюшин В.А. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем и дистанционное зондирование // *Современные проблемы дистанционного зон-*

дирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. N5. С. 101-109. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-101-109.

14. Lysov A.K., Kornilov T.V., Khiutti A.V. Spectral characteristics of reflection of waves in the optical range of healthy and diseased potato plants by Y-virus and late blight. *Research on Crops*. 2021. Vol. 22. Special iss. 38-41. DOI: 10.31830/2348-7542.2021.010.

REFERENCES

1. Beilis V.M., Moskovsky M.N., Lavrov A.V. The system of technologies and machines in modern conditions. *Agrarian Scientific Journal*. 2022. N12. 70-72 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2022i12pp70-72.
2. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
3. Korotchenya V.M., Tsench Y.S., Lobachevsky Y.P. The machine system as a factor of scientific and technological progress in agro-industrial complex. *Russian Agricultural Sciences*. 2024. N4. 67-72 (In Russian). DOI: 10.31857/S2500262724040123.
4. Tsench Yu.S., Sidorov I.V. Stages of technologies and technical means development for fertilization and plant protection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 14-22 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22.
5. Kutsenogiy K.P. Theoretical foundations for optimizing insecticidal aerosol application technology. *Chemistry in Agriculture*. 1981. Vol. XIX. N10. 12-18 (In Russian).
6. Kirov E.I., Gorbunov N.N., Poskolny N.N. et al. Efficiency of insecticidal aerosol application for protecting agricultural crops from pests. In the collection: Optimization of insecticidal aerosol application technology. Novosibirsk: SO VASKhNIL. 1983. 26-32 (In Russian).
7. Tsench Yu.S. Formation and development of the testing system for agricultural machinery and implements in Russia. In: S. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, RAS. Annual scientific conference. Moscow. 2020. 154-158. EDN: PRZZHC.
8. Nikitin N.V., Spiridonov Yu.Ya., Shestakov V.G. Scientific and practical aspects of herbicide application technology in crop production. Moscow. Pechatny Gorod. 2010. 187 (In Russian).
9. Lysov A.K., Novozhilov K.V., Veretennikov Yu.M. et al. Phytosanitary shield for Russia's food security. Moscow. IntradeCorporation, 1998. 140 (In Russian).
10. Goncharov N.R., Lysov A.K., Naumova N.I., Kornilov T.V. Economic efficiency of fine droplet spraying systems with forced deposition for weed control in potato crops. *Economics of Agriculture and Processing Enterprises*. 2019. N3. 54-57 (In Russian). EDN: UCYLCB.
11. Lysov A.K. Methodological approaches for solving problems of discrete introduction of pesticides. *Plant Protection News*. 2018. N3(97). 5-9 (In Russian). DOI: 10.31993/2308-6459-2018-3(97)-5-9.
12. Lysov A.K., Fedchenko V.G. New approaches for remote reading the information on the heterogeneity of the distribution of weeds in the areas of the field for an application of plant protection products. XVIII Int. Plant Protection Congress. Berlin. 2015. 141 (In English).
13. Lysov A.K., Pavlyushin V.A. Phytosanitary design of agroecosystems and remote sensing. *Current problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2022. Vol. 19. N5. 101-109 (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-101-109.
14. Lysov A.K., Kornilov T.V., Khiutti A.V. Spectral characteristics of reflection of waves in the optical range of healthy and diseased potato plants by Y-virus and late blight. *Research on Crops*. 2021. Vol. 22. Special iss. 38-41 (In English). DOI: 10.31830/2348-7542.2021.010.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Лысов А.К. – научное руководство;

Корнилов Т.В. – обработка данных.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Lysov A.K. – scientific guidance;

Kornilov T.V. – data processing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

02.07.2024

30.09.2024

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 по специальностям: 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству *AGRIS, RSCI*. Электронные версии журнала размещаются на сайтах Российской универсальной научной электронной библиотеки, Российской государственной библиотеки и Российской книжной палаты.

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 на русском и английском языках 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,
а также в редакции журнала.

Индекс издания **66060**

КОНТАКТЫ:

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01
www.vimsmit.com e-mail: smit@vim.ru

