

ISSN 2073-7599 (print)
ISSN 2618-6748 (online)

Сельскохозяйственные МАШИНЫ и ТЕХНОЛОГИИ

AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Том 14 N 4 2020

Vol. 14 N 4 2020

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА И СЕМЯН**
POST-HARVEST GRAIN AND SEED PROCESSING
INNOVATIVE TECHNOLOGIES

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ
CROP CONDITION MONITORING



МОБИЛЬНЫЕ ЭНЕРГОСРЕДСТВА С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
MOBILE POWER UNITS WITH ELECTRIC DRIVE



Сельскохозяйственные МАШИНЫ и ТЕХНОЛОГИИ

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

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

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

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

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:
В.В. Бижаев,
Л.А. Горелова,
С.В. Гришуткина,
Р.М. Нурбагандова

Перевод – Александра Чепелева

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

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

© ФГБУ ФНАЦ ВИМ, 2020

Отпечатано в ФГБУ ФНАЦ
ВИМ
Формат 205 x 290 мм
Подписано в печать 10.12.2020
Тираж 500 экз.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайлов

доктор технических наук, академик Российской академии наук, член Президиума Российской академии наук, директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Яков Петрович Лобачевский (ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА)

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, первый заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

Виктор Валентинович Альт

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик НАН Монголии, руководитель научного направления Сибирского физи-ко-технического института аграрных проблем, г. Новосибирск, Российская Федерация

Христо Иванов Белоев

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Болгарской академии наук, Русенский универси-тет, г. Русе, Республика Болгария

Михаил Никитиевич Ерохин

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Рос-сийская Федерация

Юрий Анатольевич Иванов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Всероссий-ского научно-исследовательского института механизации животноводства, г. Подольск, Российская Феде-рация

Йошисуке Кишида

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

Юрий Федорович Лачуга

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Антонин Махалек

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

Тадеуш Павловски

доктор технических наук, профессор, директор Промышленного института сельскохозяйственной техники, г. Познань, Республика Польша

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

Жарылкасын Сарсембекович Садыков

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

Дмитрий Семенович Стребков

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Юлия Сергеевна Ценц

кандидат педагогических наук, доцент, заместитель директора по образовательной и редакционно-издательской деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

Вячеслав Иванович Черноиванов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация



SCIENTIFIC-TEORETICAL
JOURNAL

The journal is registered by
Federal Agency for Supervision of
Legislation Observance of Mass
Communications Sphere and
Cultural Heritage Protection
Certificate ПИ No. ФС77-68608
from February, 3, 2017

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

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

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

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

EXECUTIVE EDITORS:

Bizhaev V.V.,
Gorelova L.A.,
Grishutkina S.V.,
Nurbagandova R.M.
Translation into English –
Aleksandra Chepeleva

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

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

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

Printed by FSAC VIM

Russian Academy of Science

The format is 205 × 290 mm

The issue was submitted 10.12.2020

The circulation is 500 copies

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNologii]

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

EDITOR-IN-CHIEF

Andrey Yu. Izmaylov

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

EDITORIAL BOARD

Yakov P. Lobachevskiy (SCIENTIFIC EDITOR)

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

Viktor V. Al't

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Honoured Scientist of Russian Federation, Academician of NAS of Mongolia, Head of Scientific Division of Siberian Physical and Technical Institute of Agrarian Problems, Novosibirsk, Russian Federation

Khristo I. Beloev

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, University of Ruse, Republic of Bulgaria

Mikhail N. Erokhin

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

Yuriy A. Ivanov

Dr.Sc.(Agr.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences; Director of the All-Russian Scientific and Research Institute of Livestock Mechanization, Podolsk, Russian Federation

Yoshisuke Kishida

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

Yuriy F. Lachuga

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

Antonin Makhalek

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

Tadeush Pavlovsky

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Director of the Industrial Institute of Agricultural Machines, Poznan, Poland

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

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

Dmitriy S. Strebkov

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

Yulia S. Tsench

Ph.D.(Ed.), 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

**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

- Курбанов Р.К., Захарова Н.И.**
Применение вегетационных индексов
для оценки состояния сельскохозяйственных
культур 4

ТЕХНИКА ДЛЯ ОВОЩЕВОДСТВА

- Ибрагимов А.А., Караханов А.К.,
Абдурахманов А.А., Эшдавлатов А.Э.,
Утениязов П.А., Хаджиев А.А.**
Результаты исследований новой сеялки
для высева семян лука 12

ПРЕДПОСЕВНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН

- Дринча В.М., Ценч Ю.С.**
Основы и перспективы развития технологий
послеуборочной обработки зерна и
подготовки семян 17

- Хамуев В.Г.**
Обоснование параметров гравитационной
очистительной колонки 26

МОБИЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

- Бижаев А.В.**
Исследование параметров трактора
с электроприводным силовым агрегатом 33

- Панасюк А.Н., Липкань А.В.**
Расчет экологических порогов нормального
давления колесных движителей машин
на полевых работах на глинистых почвах ... 43

ТЕХНИКА ДЛЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА

- Иовлев Г.А., Несговоров А.Г., Голдина И.И.**
Исследование работы и формирование
состава уборочно-транспортного комплекса
из зерноуборочных комбайнов зарубежного
производства 49

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАТИКА

- Мяленко В.И.**
Разработка цифровой модели рабочего
органа земледельческого орудия 57

- Тетерев А.В.**
Обоснование выбора системы позициониро-
вания для управления движением мобильного
сельскохозяйственного робота 63

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Загоруйко М.Г., Васильчиков В.В.,
Мамахай А.К.**
Имитационное моделирование параметров
шнека экструдера 71

ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Костомахин М.Н.**
Оценка режимов работы
сельскохозяйственной техники 78

DIGITAL TECHNOLOGIES

- Kurbanov R.K., Zakharova N.I.**
Application of vegetation indexes
to assess the condition of crops 4

MACHINERY FOR VEGETABLE GROWING

- Ibragimov A.A., Karakhanov A.K.,
Abdurakhmanov A.A., Eshdavlatov A.E.,
Uteniyazov P.A., Khadzhiev A.A.**
Research results for a new onion seed drill. 12

SEED PRESOWING TREATMENT

- Drincha V.M., Tsench Yu.S.**
Fundamentals and prospects for the technologies
development for post-harvest grain processing
and seed preparation 17

- Khamuev V.G.**
Justification of the gravitational seed cleaning
system parameters 26

MOBILE ENERGY UNITS

- Bizhaev A.V.**
Research of tractor power unit with electric
drive parameters 33

- Panasyuk A.N., Lipkan' A.V.**
Calculation of the ecological thresholds of
normal pressure of machine propulsion drive
in working on clay soils. 43

MACHINERY FOR PLANT GROWING

- Iovlev G.A., Nesgovorov A.G., Goldina I.I.**
Operation research and formation of
the harvesting transport complex of the grain
harvesters of foreign production 49

AUTOMATION AND INFORMATICS

- Myalenko V.I.**
Development of a digital model
of the agricultural tool working element 57

- Teterev A.V.**
Rationale for the choice of a positioning
system for mobile agricultural robot
movement controlling 63

NEW MACHINERY AND TECHNOLOGIES

- Zagoruyko M.G., Vasil'chikov V.V.,
Mamakhay A.K.**
Simulation of the extruder screw parameters ... 71

INSTRUMENTS AND EQUIPMENT

- Kostomakhin M.N.**
Evaluation of agricultural machinery operation
modes 78

Application of Vegetation Indexes to Assess the Condition of Crops

Rashid K. Kurbanov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: smedia@vim.ru;

Natalya I. Zakharova,
graduate student

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Monitoring of the state of agricultural crops and forecasting the crops development begin with aerial photography using an unmanned aerial vehicles and a multispectral camera. Vegetation indexes are selected empirically and calculated as a result of operations with values of different spectral wavelengths. When assessing the state of crops, especially in breeding, it is necessary to determine the limiting factors for the use of vegetation indexes. (*Research purpose*) To analyze, evaluate and select vegetation indexes for conducting operational, high-quality and comprehensive monitoring of the state of crops and the formation of optimal management decisions. (*Materials and Methods*) The authors studied the results of scientific research in the field of remote sensing technology using unmanned aerial vehicles and multispectral cameras, as well as the experience of using vegetation indexes to assess the condition of crops in the precision farming system. The limiting factors for the vegetation indexes research were determined: a limited number of monochrome cameras in popular multispectral cameras; key indicators for monitoring crops required by agronomists. After processing aerial photographs from an unmanned aerial vehicle, a high-precision orthophotomap, a digital field model, and maps of vegetation indexes were created. (*Results and discussion*) More than 150 vegetation indexes were found. Not all of them were created through observation and experimentation. The authors considered broadband vegetation indexes to assess the status of crops in the fields. They analyzed the vegetation indexes of soybean and winter wheat crops in the main phases of vegetation. (*Conclusions*) The authors found that each vegetative index had its own specific scope, limiting factors and was used both separately and in combination with other indexes. When calculating the vegetation indexes for practical use, it was recommended to be guided by the technical characteristics of multispectral cameras and took into account the index use effectiveness at various vegetation stages.

Keywords: digital farming, remote sensing, crop monitoring, unmanned aerial vehicle, vegetation indexes, multispectral cameras, aerial photography, vegetation map of crops.

For citation: Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Primenenie vegetatsionnykh indeksov dlya otsenki sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Application of vegetation indexes to assess the condition of crops]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 4-11 (In English). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.

Применение вегетационных индексов для оценки состояния сельскохозяйственных культур

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

Наталья Ивановна Захарова,
аспирант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Аэрофотосъемку с помощью беспилотных летательных аппаратов и мультиспектральной камеры применяют для мониторинга состояния посевов и прогноза развития сельскохозяйственных культур. В результате операций со значениями различных спектральных длин волн эмпирически подбирают и рассчитывают вегетационные индексы, составляя карты. При оценке состояния посевов необходимо определять лимитирующие факторы применения вегетационных индексов. (*Цель исследования*) Проанализировать, оценить и выбрать вегетационные индексы для проведения оперативного, качественного и комплексного мониторинга состояния сельскохозяйственных культур и формирования оптимальных управленческих решений. (*Материалы и методы*) Изучили результаты научных исследований в области технологий дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов и мультиспектральных камер, а также опыт применения вегетационных индексов для оценки состояния сельскохозяйственных культур в системе точного земледелия. Определили лимитирующие факторы для исследования вегетационных индексов: ограниченное количество

монохромных камер в популярных мультиспектральных камерах; основные показатели для мониторинга сельскохозяйственных культур, необходимые агрономам. После обработки аэрофотоснимков с беспилотного летательного аппарата создали высокоточный ортофотоплан, цифровую модель поля и карты вегетационных индексов. (*Результаты и обсуждение*) Обнаружили более 150 вегетационных индексов. Не все их них создавались путем наблюдений и экспериментов. Рассмотрели широкополосные вегетационные индексы для оценки состояния посевов на полях. Проанализировали вегетационные индексы посевов сои и озимой пшеницы в основных фазах вегетации. (*Выводы*) Выявили, что каждый вегетационный индекс имеет свою специфическую сферу применения, ограничивающие факторы и используется как отдельно, так и в комплексе с другими индексами. Рекомендовали при расчете вегетационных индексов для практического применения руководствоваться техническими характеристиками мультиспектральных камер и учитывать эффективность применения индекса на различных стадиях вегетации.

Ключевые слова: цифровое земледелие, дистанционное зондирование, мониторинг посевов, беспилотный летательный аппарат, вегетационные индексы, мультиспектральные камеры, аэрофотосъемка, вегетационная карта посевов.

Remote probing is one of the rapidly developing areas of monitoring the state of the field and plants in order to obtain information necessary for further analysis and the formation of effective management decisions. This technology allows you to measure soil characteristics, crops and water resources using unmanned aerial vehicles (UAVs), airplanes and satellites in precision agriculture [1]. It is based on the interaction of electromagnetic radiation with soil, vegetation or other biological object (Fig. 1). The use of remote probing tools is mainly used to assess the plants state: growth, dynamics of green phytomass development (normalized difference vegetation index NDVI, leaf area index LAI), vegetation density, yield potential, as well as to detect and map biotic (insects, weeds, etc. disease) and abiotic (lack of water, lack of mineral and organic substances) stress [2].

High-resolution imaging by remote probing from satellites and aerial platforms can be limited by the cloud layer. Land cover makes it difficult to collect soil data. The spatial resolution also plays a significant role [3]. As this indicator improves, the area of the smallest pixel decreases, and the uniformity of soil or crop characteristics in this pixel increases. A lower spatial resolution means larger pixel sizes and increased heterogeneity in soil and plant characteristics.

The UAV, complete with suspended equipment such as the MicaSense Altum or Parrot Sequoia, allows highly accurate crops monitoring. It becomes possible, on the basis of aerial surveys, to assess the density of seedlings, foci of plant damage and observe the development of processes in dynamics. After processing the aerial survey data, vegetation indexes are calculated and maps of these indexes are generated. The vegetation index is a relative indicator that determines the presence or absence of vegetation cover and evaluates its viability. Vegetation indexes are used not only for monitoring agricultural crops, but also for studying arid regions, forests, environmental changes, the impact of biotic and abiotic stresses on agricultural biological objects [4-10].

RESEARCH PURPOSE is to analyze, evaluate and select vegetation indexes for conducting operational, high-quality and comprehensive monitoring of the state of crops



Fig. 1. Monitoring of soybean crops from UAVs

and the formation of optimal management decisions.

MATERIALS AND METHODS. Using the method of comparative analysis, the authors studied the results of scientific research and reviews on the use of vegetation indexes to obtain information on the agricultural crops state in the precision farming system. They considered modern achievements and developments in the field of remote sensing technologies using UAVs for assessing the agricultural biological objects state using vegetation indexes. They identified limiting factors for the study of vegetation indexes:

- a limited number of monochrome cameras of popular multispectral cameras: red (Red), extreme red (Red-Edge), infrared (NIR), blue (Blue), green (Green) channels;
- the main indicators for monitoring agricultural crops required by agronomists (biomass volume, nitrogen concentration, chlorophyll content in plant leaves, leaf area, etc.).

Aerial photography was carried out in the Ryazan Region in the breeding fields of soybeans and winter wheat using a DJI Phantom 4 pro quadcopter and a Parrot Sequoia multispectral camera in April-August 2019. Weather data were recorded daily by the local weather station. Multispectral data were processed using Pix4DMapper software.

After processing aerial photographs from the UAV, a high-precision orthophotomap, a field digital model and maps of vegetation indexes for selection soybeans and

winter wheat crops were created.

Results and discussion. Remote probing of agricultural biological objects is based on spectral channels available for shooting (Fig. 2):

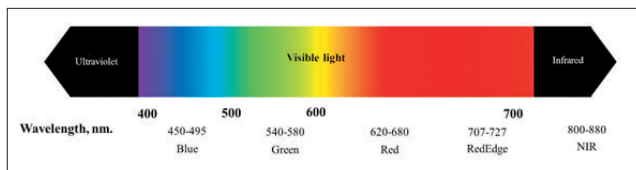


Fig. 2. Spectral channels

- blue (Blue) – 450-495 nm;
- green (Green) – 540-580 nm;
- red (Red) – 620-680 nm;
- extreme red (RedEdge) – 707-727 nm;
- near infrared (NIR) – 800-880 nm.

Radiation, reflection or scattering of electromagnetic waves depends on the chemical and morphological properties of biological objects. Near and middle infrared channels are used to assess characteristics that go beyond quantifying plant growth and biomass, namely, those related to the content of water, pigments, sugar and aromatic substances [11]. Therefore, the indexes developed in the last decade are applicable for monitoring the water potential of plants and the levels of abiotic and biotic stresses [9, 10]. The vegetation index is a metric calculated by transforming data from multiple spectral channels in each pixel of the resulting images. When using high-resolution spectral devices, the number of channels received by remote sensing increases, and the transmission channel becomes narrower. The most popular multispectral cameras for monitoring agricultural crops using UAVs include Parrot Sequoia, RedEdge-MX, MicaSense Altum, Sentera Quad Sensor, Sentera Double 4K, Sentera 6X Multispectral Sensor (Fig. 3).

The combination of serial commercial drones, multispectral cameras and modern software for processing received aerial photographs allows the development of powerful platforms for solving many important problems in agriculture, such as monitoring agricultural biological objects and the environment [12-14].

More than 150 vegetation indexes are mentioned in the scientific literature, calculated from data in wide and narrow spectral channels. The broadband spectral index equations use the Red or NIR channels. Multispectral cameras consist of monochrome cameras with different centers of spectral channels and their width, therefore, when calculating vegetation indexes, it is necessary to be guided by the documentation about the camera used. For example, Parrot Sequoia shoots in NIR in the 750-830 nm range with a channel center at 790 nm, while the MicaSense Altum has a 800-880 nm range for this channel with a center at 840 nm. Only a small part of the vegetation indexes is verified experimentally or has a significant biophysical basis.

Most vegetation indexes are calculated based on the

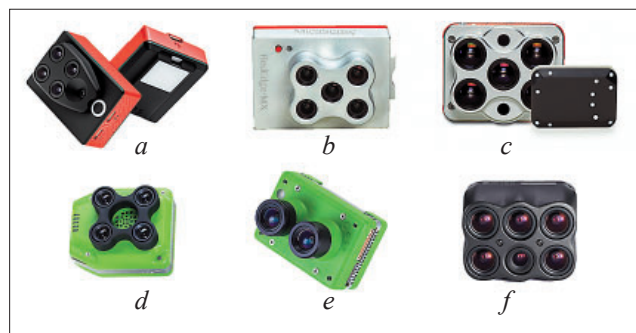


Fig. 3. Popular models of multispectral cameras:

a – Parrot Sequoia; b – RedEdge-MX; c – MicaSense Altum; d – Sentera Quad Sensor; e – Sentera Double 4K; f – Sentera 6X Multispectral Sensor

two most stable (independent of other factors) spectral ranges – Red and NIR. The first is the maximum absorption of solar radiation by chlorophyll, and the second is the maximum reflection of plant energy. High photosynthetic activity, usually associated with a large phytomass of vegetation, leads to reduced reflectivity in the red channel and high values in the near infrared channel.

According to the spectral signature, green vegetation has very low reflectivity in the Red and Blue channels and high reflections in the Green, so the vegetation appears green. However, the reflectance is relatively higher in NIR. At the same time, the Blue channel is more sensitive to the presence of suspended microparticles in the air, due to its shorter wavelength compared to Red. The ratio of these indicators makes it possible to classify vegetation and other objects [15].

One of the first vegetation indexes published in the scientific literature was the Ratio Vegetation Index (RVI) proposed by K.F. Jordan in 1969 [16]. It is also called Simple Ratio Index - SR and is used for quick assessment of biological objects. The RVI Index (SR) has become one of the most readily available vegetation indexes. It represents the ratio between the reflectivity of vegetation in the NIR and Red channels:

$$RVI(SR) = \frac{NIR}{Red}, \quad (1)$$

where NIR – near infrared reflection;

Red – red reflection.

As a result of simulations carried out by Japanese scientists, it is revealed that RVI (SR) is sensitive to solar radiation [17]. Its value is close to 1 if the object under study has the same reflection in both the Red and NIR channels, for example, soil. At the same time, the index value for green vegetation will be above 1.

This index is useful when you need to estimate quickly the relative vegetation biomass, distinguish green vegetation from other features on the map, or identify areas of low/high density of vegetation cover.

When monitoring agricultural biological objects, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is often used [18]. It is calculated from multispectral survey

data as the normalized ratio between Red and NIR channels:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

This index is suitable for monitoring the yield throughout the growing season. The direct use of the index is to detect and assess the intensity of the plants vegetation. NDVI takes values from -1 to 1. Green vegetation has positive NDVI values: the more green phytomass, the higher the index.

Using the NDVI vegetation maps, in the selection fields at the first stages of the soybean vegetation, areas with uneven seedlings, vegetation with a small amount of phytomass, areas with a large number of weeds (problem areas) are identified (Fig. 4).

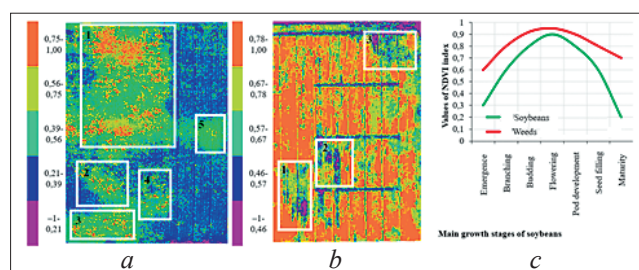


Fig. 4. NDVI vegetation map of soybean, aerial photography from the DJI Phantom 4 pro and multispectral camera Parrot Sequoia: a – aerial photography at emergence phase from May 29, 2019; b – aerial photography at budding and flowering phases of July 2, 2019; c – chart of average NDVI values for the main growth stages of soybeans

Aerial photography is made using a DJI Phantom 4 pro and a Parrot Sequoia multispectral camera. On sites 1-5, weeds are visible, the NDVI of which is 0.39-1. In the germination phase, the soybean crop index does not exceed 0.4, and during the budding and flowering period – more than 0.8. At these growing season stages, according to NDVI maps, problem areas 1-3 with a small amount of phytomass in the range of 0.57 and below are found (Fig. 4b). At the growing season final stages, the maps analysis makes it possible to determine the readiness of the crop for harvesting, as well as the presence of weeds. The curves of average NDVI values for the main phases of the growing season of soybeans in comparison with weeds differ (Fig. 4c). The graph shows that the NDVI index allows you to separate weeds from soybeans in the initial and final phases of the growing season. The authors do not recommend using the NDVI index when examining sparse and dense vegetation. The NDVI is sensitive to soil and aerosol atmospheric pollution, so additional indexes will be required for more accurate vegetation analysis.

NDVI vegetation maps, based on aerial photographs from UAVs, were used in a study by scientists from China to estimate biomass, predict yields and select breeding wheat varieties. The authors studied 32 wheat varieties grown under conditions of limited and complete irriga-

tion [19]. Scientists also used the index to assess crops under the influence of abiotic stresses, for example, for phenotyping corn crops with a lack of nitrogen [10].

The level of air pollution, evaporation from the vegetation and soil cover surface changes during the day, especially in areas with sharp elevation changes, for example, in vineyards. Microparticles in the air, just like agricultural biological objects, are capable of emitting, reflecting or scattering electromagnetic waves. They cause errors in the calculation of vegetation indexes, including the NDVI index. To reduce such errors, it is advisable to use indexes that are resistant to aerosol pollution of the atmosphere and reflections of the soil cover, calculated mainly when using the blue channel. For example, the MicaSense Altum multispectral camera has the Blue channel in the range of 455-495 nm. Fog, dust, smog, air pollution distort aerial photography data. The main reason the Blue channel is more susceptible to sources of aerosol pollution than Red, is because of its short wavelength. Generally, the shorter the wavelength, the stronger the scattering. The indexes resistant to aerosol pollution of the atmosphere include:

- Atmospherically Resistant Vegetation Index – ARVI, used to estimate phytomass at average values of vegetation cover density, calculation by RGB data is possible;
- Enhanced Vegetation Index – EVI, used to assess phytomass at high density of vegetation cover, has a high correlation with Leaf Area Index – LAI;
- Structure Insensitive Pigment Index – SIPI, suitable for identifying plant diseases at early stages, as well as for detecting hydrocarbon deposits [11, 20].

In the germination phase, the vegetation cover is sparse, there are open soil areas. In the final stages of the growing season, when assessing crops before harvesting, the vegetation also becomes thinner. In such a situation, due to the high degree of crops sparseness and the strong influence of the soil, NDVI is ineffective in the analysis of plant phytomass. To eliminate some of the limitations of the NDVI, the Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) and its later version, MSAVI2, are used.

The problem with the original Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) is that it requires trial and error to determine the soil brightness correction factor (L) based on the amount of vegetation in the study area. When calculating SAVI, the default value $L = 0.5$ was usually used, which distorted the obtained data. In 1994, scientists developed a modified index to facilitate a simple and reliable calculation [21]:

$$MSAVI2 = \frac{2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{(2 \cdot NIR + 1)^2 - 8 \cdot (NIR - Red)}}{2} \quad (3)$$

The MSAVI2 index takes into account the reflections of open soil areas and is used to study biological objects with a sparse vegetation cover, for example, in the early or final stages of crop vegetation.

In the middle of the growing season, healthy plants de-

velop and gain biomass, the density of the vegetation cover often exceeds 80%. With such a density, the most popular NDVI index turns out to be uninformative. The indexes assessing the plant cover photosynthetic activity are more sensitive to changes in the plant chlorophyll and give a detailed picture of the crops state. Chlorophyll content reflects the physiological state of vegetation. It decreases in stressful situations. Therefore, the estimate of the chlorophyll amount can be used as a plant health indicator.

In the scientific literature, there are many vegetation indexes for assessing the photosynthetic activity of vegetation. In remote sensing, the following broadband vegetation indexes are used to assess the chlorophyll content in the leaves of different plant species [22-25]:

- Normalized Difference Red Edge Index – NDRE;
- Green chlorophyll index – ClGreen (GCI);
- Green leaf index – GLI;
- Canopy Chlorophyll Content Index – CCCI;
- Green Normalized Difference Vegetation Index – GNDVI;
- Chlorophyll vegetation index – CVI;
- Leaf Area Index – LAI.

The narrow-band Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index – MCARI [11] is referred to adapted for broadband indexes. In the adapted formula, the narrow-spectrum p670 channel is replaced with a broadband RedEdge. The index reacts to minimal changes in chlorophyll and is used to estimate leaf area, as it has a high correlation with LAI.

The Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) is suitable for assessing the photosynthetic activity of the vegetation cover and the leaves saturation with nitrogen. It can be calculated only if there is a RedEdge channel [22]:

$$NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge}, \quad (4)$$

where RedEdge – extreme red reflection.

Compared to the red channel, it penetrates the leaf better and is less absorbed by chlorophyll in the first layers of the leaf. The RedEdge canal is very sensitive to medium and high chlorophyll levels and is considered a good indicator of the selection crop health during the growing season when there is a relatively high concentration of chlorophyll in the leaves. In addition, the NDRE evaluates the nitrogen concentration in plant leaves, which contributes to the recommendations for nitrogen fertilization. The index varies from –1 to 1. Green vegetation corresponds to NDRE values above zero: the higher the nitrogen concentration in plant leaves, the higher the index.

When assessing the soybean crops state at the main stages of the growing season, NDRE made it possible to identify areas with depressed vegetation, with a minimum nitrogen content in the leaves (Fig. 5). An analysis of the NDRE vegetation map dated June 20, 2019 in the budding phase and at the beginning of the flowering phase revealed abnormally low, close to zero indicators of nitrogen con-

tent in soybean leaves: variants 1b, 2b, and 3b. Normally, crops take such values a few days before harvesting. When analyzing the NDRE vegetation map, orthophotomap sites 1a, 2a and 3a, the results of soil samples and data from weather conditions, it was noted that the crops were in a depressed state. They could not consume macro- and micronutrients due to high temperatures and lack of rain for more than 30 days. The falling precipitation improved the physiological characteristics of soybean crops (Fig. 5, NDRE map from 02.07.2019). The NDRE index values (1c, 2c, 3c) approached the norm – 0.3-0.4 for the considered phases of the soybean growing season.

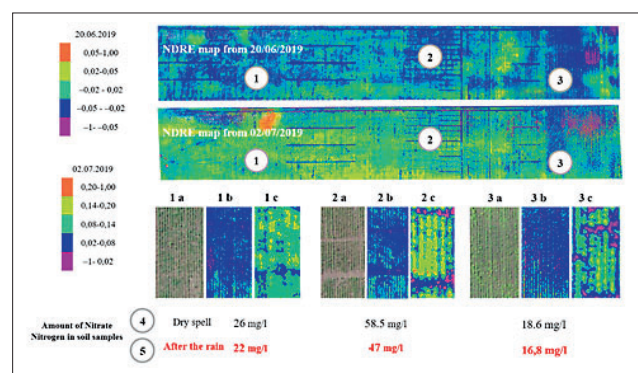


Fig. 5. NDRE vegetation maps of soybean, aerial photography from the DJI Phantom 4 pro and multispectral camera Parrot Sequoia

1a, 2a, 3a – areas of ortophotoplan from June 20, 2019 at the places where soil samples were taken

1b, 2b, 3b – areas of NDRE vegetation map from June 20, 2019 at the places where soil samples were taken

1c, 2c, 3c – areas of NDRE vegetation map from July 2, 2019 at the places where soil samples were taken

4 – concentration of Nitrogen in soil samples from June 20, 2019

5 – concentration of Nitrogen in soil samples from July 2, 2019

There was practically no precipitation from 01.06 to 23.06 in 2019 (Fig. 6). Ground observations of breeders showed the absence of a depressed or stressful state of soybean crops in the phases of branching, budding, and the beginning of flowering. However, according to aerial photography, the average NDRE values for the field during this period decreased from 0.18 to 0. The precipitation – 46.7 mm in the period from 24.06 to 15.07 – contributed to an increase in the average NDRE value over the field to 0.28. During a drought, nitrogen in the soil was in an inactive form and was not assimilated by plants. Its nitrogen lack disrupted plant growth and also causes yellowing due to insufficient chlorophyll formation. The visual assessment of the plants state did not accurately reflect the current situation. Analysis of the NDRE vegetation map promptly revealed the stress state of soybean crops before the appearance of visual deviations.

The authors recommend using the index on both sparse and dense crops, where the density of the vegetation cover is more than 80%.

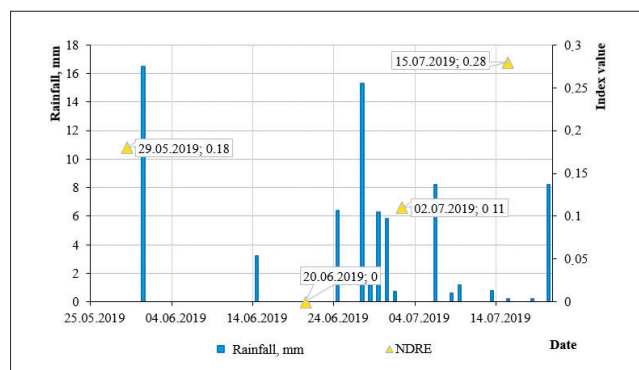


Fig. 6. Dependences of average NDRE data on amount of precipitation

Scientists at an experimental farm at Niigata University in Japan compared the NDRE and NDVI vegetation indexes. As a result, it was found that NDVI was more effective for analyzing large crops areas, determining the density of vegetation cover, assessing the health of crops and seeding rates. While NDRE allowed visualizing the chlorophyll content in leaves, identifying problem areas where additional nitrogen fertilization was required, or areas oversaturated with nitrogen [26].

Revealing seasonal changes in the photosynthetic potential of agricultural crops is assessed using the relative chlorophyll index (Green chlorophyll index – ClGreen, or GCI) [23]. The total chlorophyll content is linearly correlated with the difference between the mutual reflections of the green and near infrared channels:

$$ClGreen (GCI) = \frac{NIR}{Green} - 1, \quad (5)$$

where Green – green reflection.

The ClGreen Index (GCI) is used to assess the chlorophyll content a and b in leaves, the state of plant nutrients, aging processes and the presence of biotic stresses. ClGreen (GCI) ranges from – 1 and up. If green vegetation with a high content of chlorophyll is in the leaves, then the index value is greater than 4. For example, in soybean crops, such indicators are achieved at the phases of flowering and fruit formation [27].

Using the maps of vegetation indexes NDVI and ClGreen (GCI), the authors estimated the overwintering of winter wheat crops (Table). Photogrammetric processing of spectral data was carried out in the Pix4dMapper soft-

ware. The ranges of values for the NDVI and ClGreen (GCI) were given based on the classification of their vegetation maps. Analysis of the NDVI map showed that areas with healthy seedlings made up 0.18 ha of the total field area. Analysis of the ClGreen (GCI) map revealed areas with healthy seedlings over a larger area – 0.31 ha. Ground verification of breeders confirmed the ClGreen (GCI) values. For a reliable assessment of winter wheat overwintering, it was not enough to rely only on the NDVI, since it was not informative on sparse seedlings. ClGreen (GCI) was more sensitive than NDVI to changes in vegetation status, especially at low phytomass values. It evaluates the chlorophyll content in plants more differentially.

The soybean crops analysis in the main phases of the growing season was carried out using a number of indexes. ClGreen (GCI) was informative throughout the growing season and contributed to the assessment of the crops photosynthetic potential, the identification of early maturing varieties and the creation of recommendations for harvesting (Fig. 7). The graph shows how sensitive the ClGreen (GCI) curve is to the slightest changes in plant health, unlike other indexes.

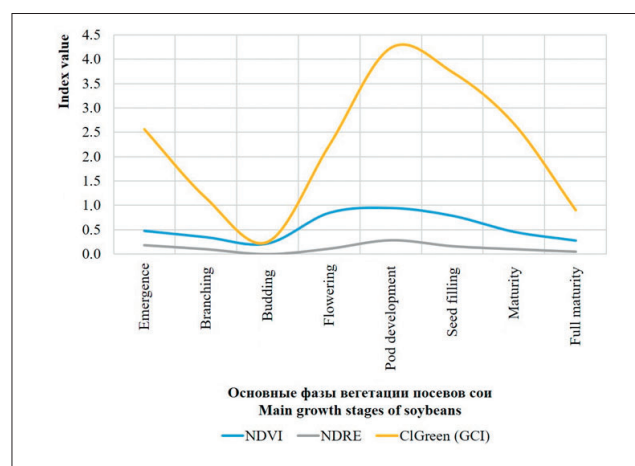


Fig. 7. Average value of NDVI, NDRE and ClGreen (GCI) on the field

The index helps to identify seasonal changes, environmental stresses, the impact of pesticides used on plant health. It is recommended for the analysis of crops during the entire growing season both with sparse vegetation and vegetation with a large amount of phytomass.

VALUES OF THE VEGETATION INDICES ClGreen (GCI) AND NDVI FOR WINTER WHEAT CROPS*						Table
ClGreen (GCI)			NDVI			
value	square, ha	description	value	square, ha	description	
1.61...2.03	0.04	healthy seedlings	0.55...1.0	0.05	healthy seedlings	
1.20...1.61	0.09	healthy seedlings	0.41...0.55	0.13	healthy seedlings	
0.78...1.20	0.18	healthy seedlings	0.27...0.41	0.19	inhibited seedlings	
0.36...0.78	0.44	inhibited seedlings	0.13...0.27	0.46	inhibited seedlings	
-1.00...0.36	0.08	soil	-1.00...0.13	0.00	soil	

* Aerial photography using DJI Phantom 4 pro and the Parrot Sequoia multispectral camera on April 4, 2019

During the photosynthetic plants activity studies, the following indexes will also be informative:

- GLI helps to assess the plants condition when examining crops using RGB data;
- CCCI is effective for the chlorophyll study and the assessment of nitrogen saturation, at different crop densities;
- CVI – to assess the level of chlorophyll at the initial stages of plant vegetation;
- GNDVI – for assessing aging and withering vegetation, in the absence of RedEdge channel data;
- LAI – for a relative assessment of the crops leaf area.

With a comprehensive crops assessment during the growing season, it is most effective to use several vegetation indexes, depending on the growing season, research goals and camera capabilities. So, when examining crops using RGB data, the GLI index is informative for an overall assessment of the crops state. In the variant with a multispectral camera, monochrome images are examined, and the number of indexes available for calculation increases. If a quick assessment of the vegetation cover density is required, the RVI (SR) should be used. During the entire growing season, it is more rational to use indexes that are resistant to aerosol atmospheric pollution and the effects of the soil cover: EVI, NDRE, ClGreen (GCI), MCARI and LAI. At the initial stages of the growing season, with sparse vegetation and a large influence of soil reflections –

MSAVI, CVI. With a vegetation density of 20-80%, NDVI and ARVI are optimal. In the middle of the development cycle, with a high level of photosynthetic activity and the need for early diseases diagnosis, the CCCI and SIPI indexes are the most differentiated and sensitive to crops changes. When plants are ripe, ready for harvesting and wilting, it is advisable to use the MSAVI and GNDVI indexes.

CONCLUSIONS. The vegetation indexes specifics indicate that the need to use one or more of them depends on the tasks of studying agricultural crops and the multispectral cameras capabilities.

On the basis of multispectral data obtained as a result of aerial photography, various vegetation indexes are calculated, which help to assess agricultural crops state, to identify the presence of biotic and abiotic stresses. Depending on the used vegetation index, broadband and narrowband spectral channels are used.

It was found that each vegetation index had its own specific scope, limiting factors and was used both separately and in combination with other vegetation indexes. When calculating vegetation indexes for practical use, one should be guided by the technical characteristics of multispectral cameras and took into account the effectiveness of using the index at different stages of the growing season.

REFERENCES

1. Adao T, Hruska J., Padua L., Bessa J., Peres E., Morais R., Sousa J.J. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote Sensing*. 2017. Vol.9(11). N1110. DOI:10.3390/rs9111110 (In English).
2. Tsouros D.C., Bibi S., Sarigiannidis P.G. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*. 2019. Vol.10(11). N349. DOI:10.3390/info10110349 (In English).
3. Mulla D.J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering, Special Issue: Sensing Technologies for Sustainable Agriculture*. 2014. Vol. 114. N4. 358-371. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009 (In English).
4. Poblete-Echeverría C., Fuentes S., Ortega-Farías S., Gonzalez-Tallice J., Yuri J. A. Digital cover photography for estimating Leaf area index (LAI) in apple trees using a variable light extinction coefficient. *Sensors* (Switzerland). 2015. Vol.15. N.2. 2860–2872. DOI:10.3390/s150202860 (In English).
5. Kurbanov R.K., Zakharova N.I., Zakharova O.M., Gorshkov D.M. Otsenka sostoyaniya posevov ozimoy pshenitsy posle perezimovki s pomoshch'yu BPLA [Assessment of Winter Wheat after Wintering with the Use of UAVs]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N3(32). 133-139 (In Russian).
6. Xu J., Gu H.B., Meng Q.M., Cheng J.H., Liu Y.H., Jiang P.A., Sheng J.D., Deng J., Bai X. Spatial pattern analysis of *Haloxylon ammodendron* using UAV imagery - A case study in the Gurbantunggut Desert. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 83. UNSP101891. DOI:10.1016/j.jag.2019.06.001 (In English).
7. Dash J.P., Pearce G.D., Watt M.S. UAV Multispectral Imagery Can Complement Satellite Data for Monitoring Forest Health. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10(8). N1216. DOI:10.3390/rs10081216 (In English).
8. Luo W., Xu X.L., Liu W., Liu M.X., Li Z.W., Peng T., Xu C.H., Zhang Y.H., Zhang R.F. UAV based soil moisture remote sensing in a karst mountainous catchment. *Catena*. 2019. Vol.174. 478-489. DOI:10.1016/j.catena.2018.11.017 (In English).
9. Iost F.H., Heldens W.B., Kong Z.D., de Lange E.S. Drones: Innovative Technology for Use in Precision Pest Management. *Journal of Economic Entomology*. 2020. Vol.113(1). 1-25. DOI:10.1093/jee/toz268 (In English).
10. Zaman-Allah M., Vergara O., Araus J.L., Tarekegne A., Magorokosho C., Zarco-Tejada P.J., Hornero A., Alba A.H., Das B., Craufurd P., Olsen M., Prasanna B.M., Cairns J. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize. *Plant Methods*. 2015. Vol. 11. N35. DOI:10.1186/s13007-015-0078-2 (In English).
11. Xue J.R., Su B.F. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*. 2017. N1353691. DOI:10.1155/2017/1353691 (In English).
12. Artyushin A.A., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Zakharov



va O.M. Vybory tiporazmernogo ryada bespilotnykh letatel'nykh apparatov i poleznoy nagruzki dlya monitoringa sel'skokhozyaystvennykh poley [The Choice of a Standard Series of Unmanned Aerial Vehicles and Payload for Monitoring Agricultural Fields]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N4(37). 36-43 (In Russian).

13. Kurbanov R.K., Zakharova O.M., Zakharova N.I., Gorshkov D.M. Programmnoe obespechenie dlya monitoringa i kontrolya pokazateley selektsionnykh protsessov posevov [Software for Monitoring and Control of Indicators of Selection Processes of Crops]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N3(32). 122-132 (In Russian).

14. Guan S.L., Fukami K., Matsunaka H., Okami M., Tanaka R., Nakano H., Sakai T., Nakano K., Ohdan H., Takahashi K. Assessing Correlation of High-Resolution NDVI with Fertilizer Application Level and Yield of Rice and Wheat Crops using Small UAVs. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 2. N112. DOI:10.3390/rs11020112 (In English).

15. Sidel'nik N.Ya., Pushkin A.A., Kovalevskiy S.V. Kartirovanie povrezhdennykh lesnykh nasazhdeniy i ob'ektov lesokhozyajstvennykh meropriyatij s ispol'zovaniem materialov kosmicheskoy s'emki i GIS-tekhnologii [Mapping of Damaged Forest Stands and Objects of Forestry Measures Using Satellite Imagery and GIS-Technologies]. *Trudy BGTU*. 2018. Vol.1. N1. 5-12 (In Russian).

16. Jordan C.F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*. 1969. Vol.50. N4. 663-666. DOI:10.2307/1936256 (In English).

17. Hashimoto N., Saito Y., Maki M., Homma K. Simulation of Reflectance and Vegetation Indices for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Monitoring of Paddy Fields. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(18). N2119. DOI:10.3390/rs11182119 (In English).

18. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA. 1973. SP-351(I). 309-317 (In English).

19. Hassan M.A., Yang M.J., Rasheed A., Yang G.J., Reynolds M., Xia X.C., Xiao Y.G., He Z.H. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform. *Plant Science*. 2019. Vol. 282(SI). 95-103. DOI:10.1016/j.plantsci.2018.10.022 (In English).

20. Fiodortsev R.V., Silie Cuenca A.R., Kozhevnikov D.A., Medina V.M., Delgado R. Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon Field Search. *Devices and Methods of Measurements*. 2019. Vol. 10(4). 373-381. DOI:10.21122/2220-9506-2019-10-4-373-381 (In English).

21. Qi, J., Chehbouni A., Huete A., Kerr Y., Sorooshian S. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol.48. 119-126 (In English).

22. Cammarano D., Fitzgerald G., Basso B., O'Leary G., Chen D., Grace P., Costanza F. Use of the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) for Remote Estimation of Wheat Nitrogen Content in Rainfed Environments. *Agronomy Journal*. 2011. N103. 1597-1603. DOI:10.2134/agronj2011.0124 (In English).

23. Lu N., Wang W.H., Zhang Q.F., Li D., Yao X., Tian Y.C., Zhu Y., Cao W.X., Baret R., Liu S.Y., Cheng T. Estimation of Nitrogen Nutrition Status in Winter Wheat from Unmanned Aerial Vehicle Based Multi-Angular Multispectral Imagery. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. N1601. DOI:10.3389/fpls.2019.01601 (In English).

24. Vincini M., Frazzi E., D'Alessio P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*. 2008. Vol. 9. 303-319. DOI:10.1007/s11119-008-9075-z (In English).

25. Boegh E., Soegaard H., Broge N., Hasager C., Jensen N., Schelde K., Thomsen A. Airborne Multi-spectral Data for Quantifying Leaf Area Index, Nitrogen Concentration and Photosynthetic Efficiency in Agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 2002. N81(2-3). 179-193 (In English).

26. Boiarskii B., Hasegawa H. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*. 2019. SI(4). 20-29. DOI:10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003 (In English).

27. Lu N., Wang W.H., Zhang Q.F., Li D., Yao X., Tian Y.C., Zhu Y., Cao W.X., Baret R., Liu S.Y., Cheng T. Estimation of Nitrogen Nutrition Status in Winter Wheat from Unmanned Aerial Vehicle Based Multi-Angular Multispectral Imagery. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol.10. N1601. DOI:10.3389/fpls.2019.01601 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 29.10.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 29.10.2020

Статья принята к публикации 19.11.2020
The paper was accepted
for publication on 19.11.2020

Research Results for a New Onion Seed Drill

Abdirasuli A. Ibragimov,
Dr.Sc.(Eng.), senior researcher,
e-mail: abirasul_82@mail.ru;
Asamidin K. Karakhanov,
Ph.D.(Eng.), head of the laboratory;
Abdukarim A. Abdurakhmanov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: 3abdukarim@mail.ru;

Akmal E. Eshdavlatov,
doctoral student,
e-mail: aeshdavlatov91@mail.uz;
Pulat A. Uteniyazov,
junior researcher,
e-mail: paytbaev@list.ru;
Adham A. Khadzhiev,
junior researcher,
e-mail: adham.hadjiev@bk.ru

Research Institute of Agricultural Mechanization, Yangiyul, Republic of Uzbekistan

Abstract. For sowing small seeds of vegetables, in particular onions, special seeders are used. They are not produced in the Republic of Uzbekistan, while many different pneumatic seeders are produced abroad. The authors note that foreign samples are complex in design, not adapted to local soil and climatic conditions, cannot provide even seed placement on ridges, and the cost of the seeders themselves and service are very high. (*Research purpose*) To develop a vegetable seeder in relation to the soil and climatic conditions of Uzbekistan, to determine the seeding rate of onion seeds depending on the length of the active part of the seed reel, to evaluate the formation quality of sowing ridges and irrigation furrows. (*Materials and methods*) The authors determined the sowing rate by turning the seeder drive wheel at a given length of the active part of the sowing reel and collecting the sown seeds in cups with further weighing. The quality of sowing ridges and irrigation furrows formation was evaluated by the method of profiling the field before and after the seeder's pass. (*Results and discussion*) The authors developed a vegetable seeder that performed three operations in one pass: cutting irrigation furrows, forming sowing ridges of a trapezoidal shape and sowing onion seeds and other small-seeded vegetable crops in a three-row tape method in each tape. They found that the dependence of the seeding rate on the length of the active part of the reel had a slightly fragile parabolic shape, and the required seeding rates – 24-48 pieces per linear meter (3.9-7.8 kilograms per hectare) – were provided with the length of the sowing reel 3.3- 6.2 millimeters. It was proved that the seeder provided a high-quality formation of sowing ridges and irrigation furrows: the row spacing was 68.8 centimeters (installation spacing – 70 centimeters), the top ridge width was 42.5 centimeters (the predetermined one was 40 centimeters), the depth of irrigation furrows was on average 9.6 centimeters. (*Conclusions*) A vegetable seeder was developed for sowing small-seeded vegetable crops with the simultaneous formation of sowing ridges and cutting irrigation furrows, which ensured high-quality performance of all operations and observance of onion seeds.

Keywords: vegetable seeder, sowing machine, onion seeds, sowing ridges formation, irrigation furrows, tape method of sowing, sowing rate, active part of the sowing reel.

■For citation: Ibragimov A.A., Karakhanov A.K., Abdurakhmanov A.A., Eshdavlatov A.E., Uteniyazov P.A., Khadzhiev A.A. Rezul'taty issledovaniy novoy seyalki dlya vyseva semyan luka [Research results for a new onion seed drill]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 12-16 (In English). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-12-16.

Результаты исследований новой сеялки для посева семян лука

Абдирасули Абдикаримович Ибрагимов,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, e-mail: abirasul_82@mail.ru;
Асамидин Караханович Караханов,
кандидат технических наук,
руководитель лаборатории;
Абдукарим Атхамович Абдурахманов,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, e-mail: 3abdukarim@mail.ru;

Акмал Эшпулатович Эшдавлатов,
базовый докторант,
e-mail: aeshdavlatov91@mail.uz;
Пуллат Айтбаевич Утениязов,
младший научный сотрудник,
e-mail: paytbaev@list.ru;
Адхам Абдумуталибович Хаджиев,
младший научный сотрудник,
e-mail: adham.hadjiev@bk.ru

Научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, г. Янгиюль, Республика Узбекистан

Реферат. Для высева мелких семян овощей, в частности лука, используют специальные сеялки. В Республике Узбекистан их не производят, в то время как за рубежом выпускают множество различных пневматических сеялок. Отметим, что зарубежные образцы сложны по конструкции, не приспособлены к местным почвенно-климатическим условиям, не могут обеспечить равномерную заделку семян на гребнях, а стоимость самих сеялок и сервисного обслуживания очень высока. (*Цель исследований*) Разработать овощную сеялку применительно к почвенно-климатическим условиям Узбекистана, определить нормы высева семян лука в зависимости от длины активной части высевающей катушки, оценить качество формирования посевных гребней и поливных борозд. (*Материалы и методы*) Норму высева определяли путем прокручивания опорно-приводного колеса сеялки при заданной длине активной части высевающей катушки и сбора высеваемых семян в стаканчики с дальнейшим взвешиванием. Качество формирования посевных гребней и поливных борозд оценивали методом профилирования поля до и после прохода сеялки. (*Результаты и обсуждение*) Разработали овощную сеялку, выполняющую за один проход три операции: нарезку поливных борозд, формирование посевных гребней трапециевидальной формы и сев семян лука и других мелкосеменных овощных культур ленточным способом тремя рядами в каждой ленте. Выявили, что зависимость нормы высева от длины активной части катушки имеет слабовыраженную параболическую форму, а требуемые нормы высева – 24-48 штук на погонный метр (3,9-7,8 килограмма на гектар) – гарантированы при длине высевающей катушки 3,3-6,2 миллиметра. Доказали, что сеялка обеспечивает качественное образование посевных гребней и поливных борозд: ширина междурядий составила 68,8 сантиметра (установочная – 70 сантиметров), ширина гребней по верху равна 42,5 сантиметра (заданная – 40 сантиметров), глубина поливных борозд составила в среднем 9,6 сантиметра. (*Выводы*) Разработали овощную сеялку для сева мелкосеменных овощных культур с одновременным формированием посевных гребней и нарезкой поливных борозд, обеспечивающую качественное выполнение всех операций и соблюдение норм высева семян лука.

Ключевые слова: овощная сеялка, высевающий аппарат, семена лука, формирование посевных гребней, поливные борозды, ленточный способ сева, норма высева, активная часть высевающей катушки.

Increasing the level of vegetable crops cultivation is one of the important tasks facing the agrarians of the Republic of Uzbekistan. Onions play a significant role in the vegetables production [1-4]. For sowing its small seeds, special seeders are used. However, there is no local production of such machines, while many different pneumatic seeders are produced abroad. They provide accurate seeds sowing at a given depth in a row method [5-12]. But foreign samples are complex in design, and are not adapted to Uzbekistan soil and climatic conditions, and cannot provide even seed placement on the ridges. The cost of the seeders themselves and their service are very high. Therefore, farms and peasant households are forced to adapt other available technical means. In addition, the operations for preparing the soil and sowing seeds are carried out separately, which each time is accompanied by the units arrival on the field, unnecessary fuel and lubricants consumption, time and labor costs. All these increase the production cost [6, 13].

RESEARCH PURPOSE is to develop a vegetable seeder in relation to the soil and climatic conditions of Uzbekistan, to determine the seeding rate of onion seeds depending on the length of the active part of the seed reel, to evaluate the formation quality of sowing ridges and irrigation furrows.

MATERIALS AND METHODS. Research Institute of Agricultural Mechanization developed a new seeder for sowing onions seeds and other small-seeded vegetable crops (Fig. 1). It performs a cutting irrigation furrows with the formation of trapezoidal sowing ridges and sowing seeds of onions or other small-seeded crops in a belt manner in three rows in each belt in one pass [14].

As the drill moves across the field, furrow cutters cut irrigation furrows and form ridges. The levelers cut the

ridges top into a trapezoidal shape. The coulter runner seals the ridge top with a parallelogram spring. The plowshare opens the seed furrows to the required depth. The onion seeds are dosed by grooved seeding wheels and enter the seed tubes, and then move into the seed furrows. The closing working body in the form of a chain train covers the seeds with a thin soil layer. The markers are used to mark subsequent runs of the seed drill.

In two stages – in laboratory and in the field – a sowing unit, consisting of a T-25A tractor and a developed seeder, was tested (Fig. 2).

The authors studied the dependence of the onion seeds seeding rate on the length of the seeding wheel active part, which is changed by the movement of the latter relative to the apparatus body in laboratory conditions. The seeder was placed on stands so that the support-drive wheels rotated freely to simulate movement in the field. The sowing machines seed tubes were removed, and numbered cups were placed under the receiving funnels to collect the sown seeds. The seed drill was loaded with onion seeds. Then, setting a certain position of the seeding wheel along the length, sowing was carried out for 10 revolutions of the support-drive wheel, which was equivalent to the traveled distance of 12.56 m (wheel diameter 0.4 m). The sown amount of seeds was weighed with an accuracy of 0.01 gram. Seeding was repeated 10 times for each position of the coil along the length. The length of the seeding wheel active part was 0; 5; 10; 15 and 20 mm.

The data were processed using the mathematical statistics methods [15, 16].

The seeding rate is determined by the formula:

$$Q = \frac{10qn}{BC}, \quad (1)$$

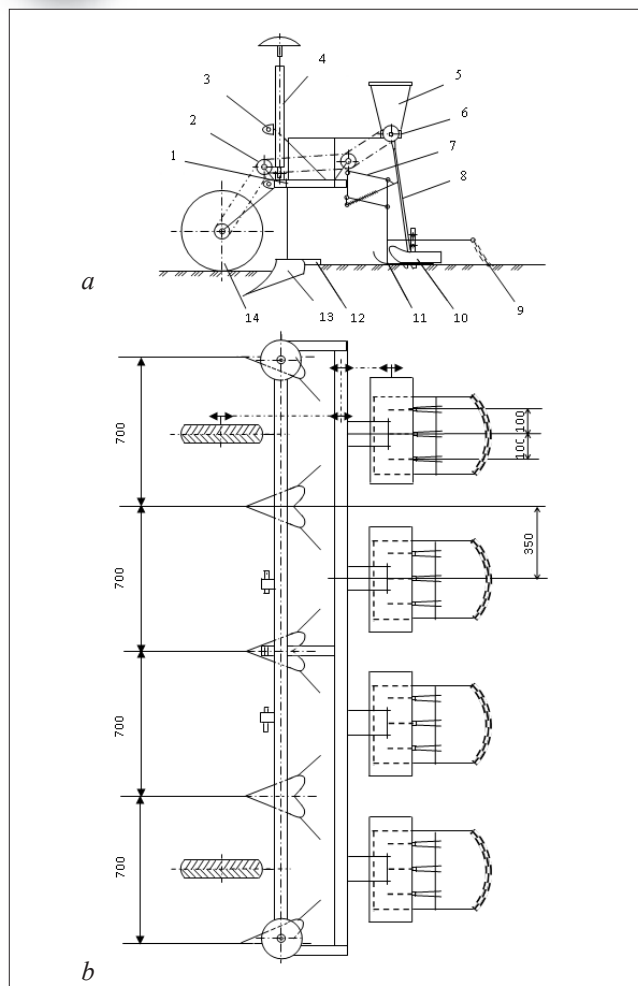


Fig. 1. Design of the vegetable seeder: a – side view; b – top view 1 – frame; 2 – drive; 3 – three-point hitch; 4 – marker; 5 – hopper; 6 – sowing machine; 7 – parallelogram mechanism; 8 – seed holder; 9 – coverer; 10 – ploughshare; 11 – ploughshare runner; 12 – equalizer; 13 – furrow cutter ridge-divider; 14 – supporting drive wheel

where Q is the seeder seeding rate, kilogram/ hectare;

10 – conversion factor;

q – sowing seeds from 1 device for 1 revolution of the support-drive wheel, g;

n – the number of seeding devices on the seeder, units;

B – seeder seeding width, m;

C – the path length traversed in 1 revolution of the seeder support-drive wheel, m.

Field trials were conducted to assess the quality of the formation of the seedbed and irrigation furrows. The field

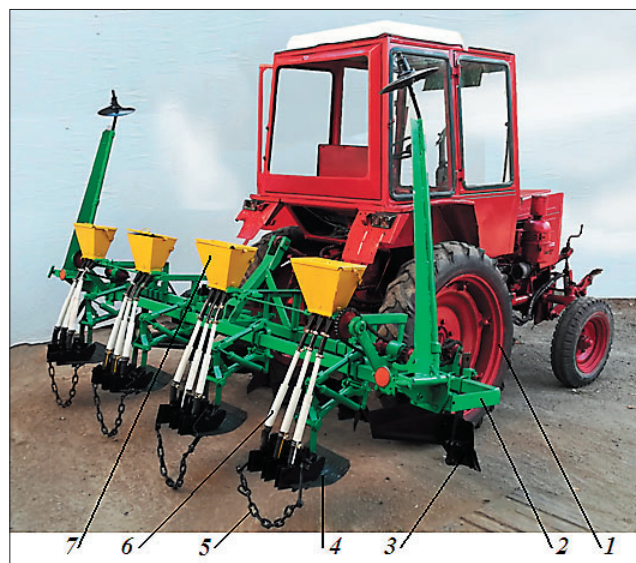


Fig. 2. Sowing unit for sowing small-seeded vegetable crops: 1 – tractor; 2 – seeder frame; 3 – furrow cutter-bed maker with leveler; 4 – runner with coulter; 5 – closing working body; 6 – seed line; 7 – hopper

was prepared for sowing vegetable crops by harrowing with a heavy disc harrow BDT-3.0 to a depth of 18 centimeters. Then the surface soil layer was leveled and compacted using a small-leveler MV-6.5. The planter's furrow cutters were set at a row spacing of 70 cm with a depth of irrigation furrows of 10 cm, the calculated ridges width at the top was 40 cm.

After carrying out all the regulating work of the sowing unit and test drives, on the field section allocated for the registration drive, the transverse profile was examined using a special rod and ruler. Repetition of profile removal was 5 times. Then, the sowing unit made a registry drive over this area with the simultaneous formation of sowing ridges and irrigation furrows when sowing onion seeds using a belt method in three rows in each belt. After the unit pass, at the same places where the transverse profile of the field was determined before the unit pass, the transverse profiles of the obtained seed ridges and irrigation furrows were studied (Fig. 3).

RESULTS AND DISCUSSION. At the first testing stage it was found that the seeding rate was directly proportional to the length of the seeding wheel active part: the longer the length of the wheel, the higher the seeding rate (table). So, the average seeding rate for three seeding devices of one row (ridge) with an active part length of 5 mm

DEPENDENCE OF THE SEEDING ONION SEEDS RATE ON THE LENGTH OF THE REEL ACTIVE PART			
Length of the reel active part, mm	Average seeding rate for three machines, g	Variation coefficient of the seeding rate between machines, %	Seeder seeding rate, kg/ha
5	1.89	4.0	6.45
10	3.91	2.8	13.34
15	8.27	3.7	28.22
20	11.63	2.7	39.68



Fig. 3. Removing the profile after forming the ridges

for 10 revolutions of the support-drive wheel was 1.89 grams of seeds with a variation coefficient of 4%.

The working width is $B = 2.8$ m, the number of seeding devices on the seeder $n = 12$ units, the length of the path covered in 1 revolution of the support-drive wheel, $C = 1.256$ m. Consequently, the onion seeds seeding rate per hectare by a seeding device with parts of 5 mm will be 6.45 kg/ha. With the length of the seeding wheel active part of 20 millimeters, the onion seeds sowing was 11.63 g per running meter, or 39.68 kg/ha, and the coefficient of variation was 2.7%.

The dependence of the seed drill reel device seeding rate on the length of the seeding wheel active part had a weakly expressed parabolic shape (Fig. 4). An empirical formula describing the above dependence was obtained by the least squares method [15, 16]:

$$Q = 0.0515 l^2 + 0.9935 l - 0.1151, \quad (2)$$

where l – the length of the active part of the reel, mm. According to the initial requirements, the seeding rate of small vegetable seeds with one device should be in the range of 24-48 pieces/running meter. In our case, when the seeder had a working width of 2.8 m and sowed 12 rows in 1 pass, this corresponded to the rate of 3.9-7.8 kg/ha (the mass of 1000 pieces of onion seeds was on average 3.8 g). For sowing onion seeds at the specified rates, the

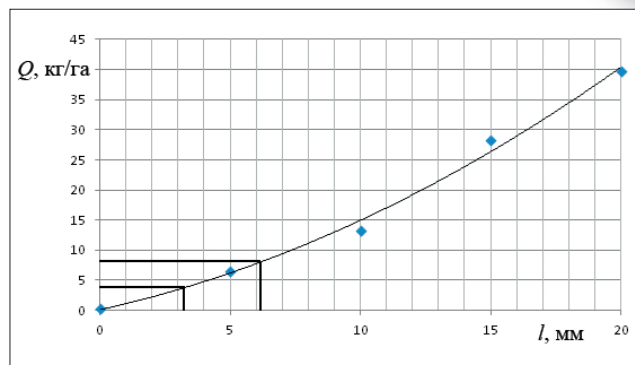


Fig. 4. Change in the seeding rate of onion seeds depending on the length of the active part of the seed reel

seeding wheel must have an active length within the range of 3.3-6.2 mm (Fig. 4).

According to the second stage of testing results, the formation quality of sowing ridges and irrigation furrows was assessed. In field experiments, the actual row spacing was 68.8 ± 4.8 cm instead of the specified 70 cm (coefficient of variation $V = 7.0\%$). The ridges width at the top was on average 42.5 ± 2.9 cm ($V = 6.8\%$). The irrigation furrows depth was on average 9.6 ± 0.4 cm ($V = 4.3\%$). Observation of the seeder working process in the field showed that the furrow cutters with the leveler ensured the formation of trapezoidal seeding ridges and the cutting of irrigation furrows of the required quality.

The coulter runners additionally compacted the soil and flattened the ridges top by sowing onion seeds in three rows.

CONCLUSIONS. The developed vegetable seeder for sowing small-seeded vegetable crops with simultaneous formation of sowing ridges and irrigation furrows cutting is efficient, provides the specified seeding rates for onion seeds, high-quality cutting of seed ridges and irrigation furrows. Further research should be carried out in the direction of studying the seeder agrotechnical parameters with determining the sowing depth, its uniformity, as well as the distribution of seeds along the rows length.

REFERENCES

1. Toshboltaev M.T., Norchaev Zh.R. Obosnovanie parametrov sektionnykh lemkhov lukokopatlya [Justification of the parameters of sectional shares of the onion digger]. *Nauchno-tehnicheskii zhurnal FerPI*. 2019. N1. 131-134 (In Russian).
2. Toshboltaev M.T., Norchaev Zh.R. Mashina dlya uborki luka-sevka [Machine for harvesting onion sets]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2016. N3. 100-102 (In Russian).
3. Toshboltaev M., Norchaev Zh. Obosnovanie parametrov bokovogo diska lukokopatlya [Justification of the parameters of the lateral disk of the onion digger]. *Agro ilm*. 2018. N2(52). 100-102 (In Russian).
4. Voss R.E., Murray M., Bradford K. et al. Onion seed production in California. University of California. *Agriculture and Natural Resources*. 2013. Vol. 4. Publication 8008 (In English).
5. Hoque M.A., Wohab M.A. Development and evaluation of a drum seeder for onion. *Int. J. Agril. Res. Innov. & Tech*. 2013. N3(1). 23-28 (In English).
6. Abdurakhmanov A.A., Ibragimov A.A. State and problems of sowing onion seeds in Uzbekistan // *Agro ilm*. Tashkent: 2018. N2(58). 37-38 (In Russian).
7. Ignaciuk S., Zarajczyk J. Assessment of selected parameters of sowing quality of vistula parsley seeds with a precision seed drill with a pneumatic seeding system. *Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 24. N2. 77-88 (In English).
8. Bozdogan A.M. Uniformity of within-row distance in pre-

cision seeders: laboratory experiment. *Journal of Applied Sciences*. 2006. N6(10). 2281-2286 (In English).

9. Jadhav N.N., Aher H.R., Ghode A.P. Design and fabrication of onion seed sowing machine. *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Automobile Engineering*. 2015. Vol. 2. 1-10 (In English).

10. Rohokale A.B., Shewale P.D., Pokharkar S.B., et al. A review on multi-seed sowing machine. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2014. Vol. 5. 180-186 (In English).

11. Swapnil T., Kasturi M.L., Girish P., Rajkumar P. Development and test of an electricprecision seeder for small-size vegetable seeds. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Iss. 9. 704-707 (In English).

12. Martin V., Madesh A., Karthick S., Kannan A. Design and fabrication of multipurpose sowing machine. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*. 2015.

Vol. 1. Iss. 5. 27-34 (In English).

13. Dzhuraev A., Tukhtakuziev A., Mukhamedov Zh., Turdaliev V. Kombinirovannyi agregat dlya predposevnoy obrabotki pochvy i seva melkosemyannykh ovoshchnykh kul'tur. [Combined aggregate for pre-sowing tillage and sowing of small-seeded vegetables]. Tashkent: Fan va texnologiyalar. 2016. 180 (In Russian).

14. Ibragimov A., Abdurakhmanov A., Eshdavlatov A., Khadzhiyev A. Seyalka dlya seva semyan luka [Seeder for sowing onion seeds]. *Agro ilm*. 2019. Spets. nomer (61). 78-79 (In Russian).

15. Kobzar A.I. Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists. Moscow: Fizmatlit. 2006. 816 (In Russian).

16. Johnson N., Lyon F. Statistics and Experiment Planning in Engineering and Science. Data processing methods. Moscow: Mir. 1990. 610 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 20.08.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 20.08.2020

Статья принята к публикации 03.11.2020
The paper was accepted
for publication on 03.11.2020

Fundamentals and Prospects for the Technologies Development for Post-Harvest Grain Processing and Seed Preparation

Vasily M. Drincha¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: vdrincha@list.ru;

Yulia S. Tsench²,
Ph.D.(Ed.)

¹Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors identified the main factors that influenced significantly the technological support of post-harvest processing processes over the past decades. They showed that in recent years, many farms faced the necessity to solve the problem of improving the seeds quality and reducing their losses in the process of post-harvest processing of grain in the shortest possible time. (*Research purpose*) To conduct a historical analysis of machine technologies for post-harvest grain processing and seed preparation and determine promising directions for their development. (*Materials and methods*) The authors used the historical-analytical method applied to technical systems, in particular, to technologies of post-harvest grain processing and seed preparation. The research objects were the original works of domestic and foreign authors for more than a 100-year period and other regulatory and technical documentation. (*Results and discussion*) The authors presented the results of the machine technologies for post-harvest grain processing and seed preparation evolution in the Russian Federation over the past 100 years. They considered the scientific, technological, technical and organizational issues of the machine technologies for grain processing and seed preparation development. It was determined that the scientific foundations for creating domestic separating machines were developed in the 30s of the last century. They noted that in 1934 the first domestic mobile grain cleaning machine with a capacity of 10 tons per hour for cleaning grain and 6-8 tons per hour for cleaning seeds was created and put into production. The following key stages were identified: in the 60s, an in-line technology of post-harvest grain processing was developed; by the end of the 70s, with the completion of work on the creation of units and complexes, all processes of post-harvest grain processing for the first time in the country were fully mechanized. (*Conclusions*) The authors proved that labor productivity in the industry increased 7-10 times, the cost of grain processing decreased 2-3 times, its losses decreased, manual, unskilled labor was excluded. They identified promising directions for the development of grain processing and seed preparation technologies.

Keywords: seeds, grain, post-harvest grain processing, grain cleaning machines, seed cleaning machines, grain dryers, technologies of in-line seed preparation.

For citation: Drincha V.M., Tsench Yu.S. Osnovy i perspektivy razvitiya tekhnologii posleuborochnoy obrabotki zerna i podgotovki semyan [Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation]. *Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25 (In English). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.

Основы и перспективы развития технологий послеуборочной обработки зерна и подготовки семян

Василий Михайлович Дринча¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: vdrincha@list.ru;

Юлия Сергеевна Ценч²,
кандидат педагогических наук

¹Арктический государственный агротехнологический университет, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Определили основные факторы, существенно повлиявшие на технологическое обеспечение процессов послеуборочной обработки в течение нескольких десятилетий. Показали, что в последние годы перед многими хозяйствами встала необходимость решения проблемы повышения качества семян и уменьшения их потерь в процессе послеуборочной обработки зерна в кратчайшие сроки. (*Цель исследований*) Провести исторический анализ машинных технологий послеуборочной обработки зерна и подготовки семян и определить перспективные направления их развития. (*Материалы и методы*) Использовали историко-аналитический метод в приложении к техническим системам, в частности к технологи-

ям послеуборочной обработки зерна и подготовки семян. Объекты исследований – оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов за более чем 100-летний период и другая нормативно-техническая документация. (*Результаты и обсуждение*) Представили результаты эволюции машинных технологий послеуборочной обработки зерна и подготовки семян в РФ в течение последних 100 лет. Рассмотрели научные, технологические, технические и организационные вопросы развития машинных технологий обработки зерна и подготовки семян. Определили, что научные основы создания отечественных сепарирующих машин были разработаны в 30-е годы прошлого века. Отметим, что в 1934 году создана и поставлена на производство первая отечественная передвижная зерноочистительная машина производительностью 10 тонн в час на очистке зерна и 6-8 тонн в час – на очистке семян. Выявили последующие ключевые этапы: в 60-х годах разработана поточная технология послеуборочной обработки зерна; к концу 70-х годов с завершением работ по созданию агрегатов и комплексов все процессы послеуборочной обработки зерна впервые в стране были полностью механизированы. (*Выводы*) Доказали, что производительность труда в отрасли повысилась в 7-10 раз, в 2-3 раза снизилась стоимость обработки зерна, сократились его потери, ручной, неквалифицированный труд был исключен. Определили перспективные направления развития технологий обработки зерна и подготовки семян.

Ключевые слова: семена, зерно, послеуборочная обработка зерна, зерноочистительные машины, семяочистительные машины, зерносушильные машины, технологии поточной подготовки семян.

To ensure competitiveness and obtain high-quality products, modern agricultural farms must use healthy seeds, free from impurities, including seeds of other crops and weeds. For precision agriculture, as well as for use in precision seeding systems, seeds must be sized, free from mechanical damage, and also have high germination.

The seed industry, and with it the processes of post-harvest seed treatment, emerged at the beginning of the 19th century in European countries [1]. Its sustainable development over two centuries made it possible to reduce significantly the gap between the breeder and the industrial grower in order to bring the selection achievements to the farm without reducing the seeds quality. The seed industry includes technological and economic applications of many aspects of science, technology and business. It becomes a highly specialized industry, an important and integral part of efficient and highly productive farms.

In recent decades, domestic and foreign scientists' and specialists' researches were aimed at improving the seeds and grain quality in the process of post-harvest processing [2, 3]. However, despite the accumulated knowledge in the field of post-harvest grain processing, the seeds preparing technology for sowing is still somewhat of an art.

The transition to a market economy in the early 90s had a significant impact on the seed industry in the Russian Federation. The structure of grain-producing farms changed radically, in most of them the grain production volume decreased significantly. The form of grain producers ownership changed. Many people needed modern grain and seed cleaning equipment, and had extremely limited financial capabilities due to low profitability. The task of improving the seeds quality and reducing their losses in the process of post-harvest processing of grain and seeds preparation in the shortest possible time became extremely urgent.

An important aspect of crop production technological support in recent decades was the construction of expensive seed plants by transnational companies. For example, in the Pavlovsky district of the Voronezh region in

September 2020, construction began on the Tanais seed plant of the French company Lidea. The volume of investments in the project was estimated at 2.6 billion rubles [4].

In this situation, questions about the potential of the domestic scientific and technical support of post-harvest processing of grain and seeds preparation technologies arise. The necessity for their further development and adaptation to market conditions posed new challenges for science and industry.

THE RESEARCH PURPOSE is to carry out a historical analysis of the machine technologies of post-harvest processing of grain and seeds preparation and to determine the promising directions of their development.

MATERIALS AND METHODS. The authors used the historical-analytical method as applied to technical systems, in particular, to the technologies of post-harvest processing of grain and seeds preparation. The research objects are original works of domestic and foreign authors for more than a century: monographs, dissertations, research institutions reports, machine testing stations protocols, scientific journals, materials of numerous conferences, as well as descriptions for domestic and foreign patent documentation. Information and analytical materials of foreign and domestic agricultural exhibitions held in recent decades were also used.

RESULTS AND DISCUSSION. In pre-revolutionary Russia, in poor peasant farms, the grain harvest was processed mainly by hand, and in strong and landowners, they used hand-operated machines: winders, graders and trirames [5, 6].

For a long time, cleaning grain and seeds was based on manual labor. Especially a lot of it was required in the 30s on the leaks created in the country of collective farms, where large masses of grain were accumulated. People "swarmed" in hundreds, worked with shovels, baskets, buckets, sacks. Later they began to use primitive winders for two people. But there were still not enough workers. Life required other, more productive means of cleaning.

After 1917, the first scientific institutions for the agriculture mechanization were created in our country. One of the most important tasks that they solved was post-har-

vest processing of grain and seeds.

In 1934, under the leadership of the head of VIM mechanization laboratory of seed business Ulrich N.N. the first domestic mobile grain cleaning machine with a capacity of 10 tons per hour for grain cleaning and 6-8 tons per hour for seed cleaning and a VIM-2 machine with a capacity of 2-3 tons per hour were created and put into production. The latter served as a prototype for a whole family of machines built on its basis: VIM-SM-1, OS-3.0, OSM-3U, OS-4.5, etc. (Fig. 1). The laboratory specialists Z.L. Titz, G.T. Pavlovsky, I.E. Kozhukhovskiy, P.P. Kolyshev, I.G. Voronov took an active part in the development and improvement of machines working bodies and technological schemes [7, 8].

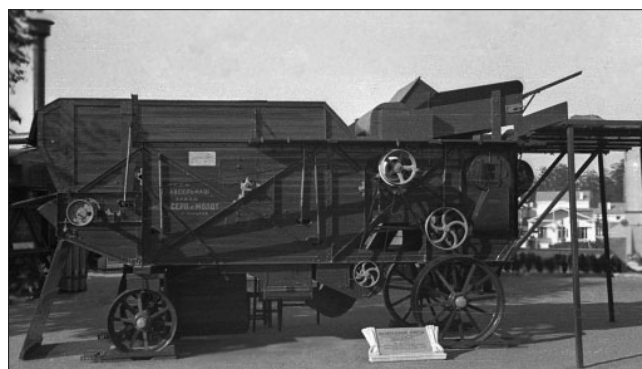


Fig. 1. Mobile air-sieve machine VIM-SM-1 with manual loading, produced at "Hammer and Sickle" plant (Kharkov)

Until the end of the 40s – the beginning of the 50s of the last century, most of the grain, leguminous and cereal crops harvest was processed on field and stationary grain complexes of collective and state farms with scattered grain cleaning and grain drying machines. A significant amount of grain was delivered to grain receiving points and elevators without processing. Such an organization of post-harvest grain processing required the involvement of many hundreds of thousands of workers and collective farmers for its implementation, led to commodity losses and a decrease in the quality of a large volume of grain. The labor costs and funds for post-harvest processing of grain and seeds preparation were particularly high. Heavy physical labor in unsanitary conditions, premature failure of equipment that worked in open areas were typical when processing grain and seeds with scattered machines on grain complexes.

The research carried out during this period made it possible to develop the initial provisions of the organization and technology of in-line post-harvest grain processing, characterized by the continuity of all processing stages in accordance with the technological process and a short production cycle. The basis of in-line processing was made up of complexes of machines and equipment at field grain complexes, grain-cleaning and grain-cleaning-drying points of collective and state farms.

The accelerated rise in grain production in the 50s became a systemic factor in the agriculture development. A successful solution to the grain problem was real only if

the harvest was processed in a timely manner. The preservation and preparation of a huge amount of grain in a short agrotechnical period was possible only with the use of industrial processing methods.

The recommendations developed in the Agroengineering Center VIM on equipping the field grain complexes, the technological process of processing grain at its site, in the grain-cleaning and grain-cleaning-drying station of the collective farm and state farm, as well as on the correct choice of a set of machines, became widespread in the country's farms. Grain-receiving enterprises also widely used recommendations for seed treatment. In accordance with these recommendations, the country's farms were equipped with tens of thousands of field grain complexes, one- and two-line grain cleaning and grain cleaning and drying stations, where mobile machines were combined into lines [9].

Particular attention was paid to taking into account the peculiarities of cleaning and drying grain in farms of various zones. In the 1950s, there was an extremely limited selection of industrially supplied machinery and equipment for post-harvest grain processing and seed preparation. Grain and seed cleaning machines of that time were only stationary, with manual loading, cumbersome, and inefficient. Up to 4-5 people were required to service each vehicle. The problem of mechanizing grain processing was very acute. It was necessary to develop recommendations for the optimal combination of machines into production lines. During this period, the development of Machine Systems, agrotechnical (initial) requirements and technological parameters of stationary machines and equipment became relevant, which could form the basis of stationary industrial-type enterprises for post-harvest grain processing and seed preparation.

At the end of the 50s, post-harvest processing of grain and seeds was carried out mainly on open profiled grain complexes, and as soon as possible in order to neutralize the influence of weather. That was why grain cleaning machines and loaders were required with a higher capacity than were available. In addition, the existing grain cleaning equipment was stationary. To move it, a lot of people or equipment was required, distracted from other work. One of the main tasks assigned to design organizations, science and industry was the creation of self-propelled machines of high performance. In 1961, such a machine – ORP-20, a heap cleaner with a mobile capacity of 20 tons per hour – was developed at the State Design Bureau for grain cleaning machines and grain loaders at the Voronezhselmash plant [10]. The cleaner was in great demand and was produced in tens of thousands of units per year. Instead of the OVP-20A, the OVS-25 machine was put into production at the Voronezhselmash plant in 1983 (Fig. 2). Stationary machines OS-4.5 and self-propelled machines SM-4.5 made it possible to obtain seeds of the required quality.

At the beginning of the 60s of the XX century, the technological foundations of in-line machine processing of grain and seeds were scientifically substantiated and



Fig. 2. Self-propelled heap cleaner OVS-25

developed, which made it possible to fundamentally change the technical and social nature of production [7, 11].

The scientific basis for the transition to flow technology was made up of research in the following areas:

- technological properties of grain and seeds as an object of machine processing;
- modes of cleaning, separation, artificial drying of seeds, food and feed grains;
- justification of the required number of technological operations and the sequence of their implementation;
- scientific foundations for the construction and implementation of flow technology for processing grain and seeds;
- a system of machines and equipment sets, taking into account the variety of natural and climatic conditions, purpose, farms specialization, grain production volumes, as well as agrotechnical requirements;
- methodological and organizational principles of testing machines for post-harvest processing of grain and seeds.

When developing and implementing flow technology, the following features and requirements were taken into account:

- a significant difference between farms in terms of grain production requiring processing;
- significant differences in the physical, mechanical and technological properties of the processed material (culture, purpose, growing area);

- high contamination and moisture content of the grain heap arriving for post-harvest processing;
- a variety of climatic conditions (dry zones, zones of excessive and normal moisture);
- the maximum possible protection of service personnel and technical equipment from the negative effects of the external environment.

The solution to the problem was achieved as a result of the implementation of the following basic principles:

- combination of working bodies (machines) for performing technological operations in the form of a single unit (complex) of maximum technical readiness;
- creation of a family of unified units (complexes) of various capacities based on a basic multi-purpose model;
- using the block principle of constructing production lines for various purposes (seeds, feed grain, food grain, using specialized units – blocks);
- ensuring the versatility of working bodies and equipment, widespread use of interchangeable tools and simple devices.

Work on the creation of production lines began in 1962. A system of unified production lines in the form of grain cleaning units and grain cleaning and drying complexes with maximum factory readiness with a capacity of 5; 10; 20 tons per hour, seed-cleaning attachments for them with a capacity of 5 tons per hour and grain-rice cleaning units with a capacity of 5 tons per hour. In the 60s and 70s of the XX century, grain cleaning units with a capacity of 40, 50 and 100 tons per hour were added, seed-cleaning attachments with a productivity of 10 tons per hour and grain-rice-cleaning-drying complexes with a productivity of 5 tons per hour (Table 1, Fig. 3) [10, 12, 13].

When creating production lines, it was envisaged that all units and complexes equipment should be designed for industry supply, and their construction was reduced mainly to installation.

By 1990, the domestic industry supplied agriculture with about 100 thousand complete production lines, which, according to the Central Statistical Administration of the USSR, provided processing using the most advanced technology up to 85-88% of the gross grain harvest, about 80-85 million tons.

TECHNICAL CHARACTERISTICS OF GRAIN CLEANING UNITS AND COMPLEXES						
Indicators	ZAV-25	ZAV-40	ZAV -50	KZS-20SH	KZS-25	KZS-40SH
Productivity, t/h	25	40	50	16	20	16
Installed power, kW	81	45.4	148	131.5	221	160.1
Overall dimensions of the main structure, m:						
length	19.6	13.6	36.0	25.7	26.3	25.7
width	8.4	8.4	8.5	11.3	18.5	8.4
height	13.7	10.4	13.7	16.0	17.0	16.0
Mass of machinery and equipment, t	41.0	22.3	74.5	38.9	69.0	51.5
Specific metal consumption, t/h/t	1.64	0.56	1.49	2.43	3.45	3.22
Specific energy consumption, kW·h/t	3.24	1.14	2.96	8.3	11.05	10.01

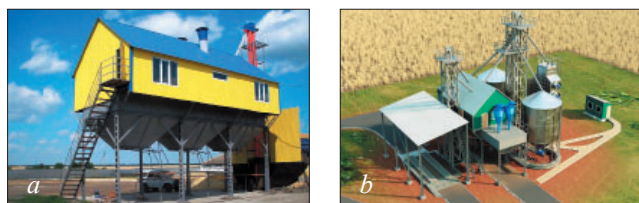


Fig. 3. Grain cleaning unit ZAV-40 (a) and grain cleaning and drying complex KZS with bunkers for temporary storage (b) in a modern design

Together with the technological task, a major social problem was solved: hard manual labor was replaced by the operator work at the control panel. Labor productivity increased 7-10 times compared to the system of mobile machines operating on grain complexes. During the harvesting period and during the preparation of seeds for work on grain complexes, it took 600 thousand less people. The processing cost was reduced by 2-3 times. In the 1980s, the annual economic effect obtained in agriculture as a result of the complete mechanization of post-harvest grain processing and seed preparation amounted to 1.2-1.6 billion rubles. [10].

Units and complexes are used as universal in many farms, they processed grain for both food and seed purposes. In this case, they were used in conjunction with standard seed-cleaning attachments built according to individual projects [14]. The use of aggregates and complexes for the preparation of seeds could not be considered an optimal solution, since in this case the seeds were subject to increased injury, there were relatively large losses in fodder waste or food grain. In addition, the problem of cleaning equipment from grain residues from the previous processed culture remained fundamentally important and unsolved.

Regardless of the new units and complexes introduction start for many years the bulk of the harvested grain would be processed on them. In this regard, additional measures were needed to reconstruct these units and complexes in order to improve their technical level and adapt to the tasks of specific farms. It was also necessary to make significant changes in the design of the modernized units and complexes.

According to the technologies and initial requirements developed at Agroengineering Center VIM in collaboration with Head Specialized Design Office on machines for cleaning grain of the Voronezhselemash plant, the Petkus enterprise (GDR) serially produced and supplied to the USSR sets of machines and equipment for seed cleaning and drying enterprises with a capacity of 1.25 tons per hour and lines for processing grass seeds with a capacity of 0.5 tons per hour. A series of standard projects was created, according to which the construction of seed processing plants was carried out [10].

In the 80s of the XX century, various options for post-harvest treatment and preparation of corn seeds were investigated. It was established that the technology of post-harvest treatment and seed preparation that developed more than 30 years ago and was used all the years did not cor-

respond to the technologies and technical means of sowing corn, caring for it and harvesting that changed during this time, and increased requirements for post-harvest treatment of seeds, especially parent forms and hybrids.

The developed seed preparation technology provided:

- guaranteed receipt of first class seeds with minimal injury and maximum yield;
- the necessary flexibility when adjusting for the processing of different quality small and large batches;
- reducing the cost and labor intensity of seed processing and storage.

The scientifically grounded scheme for calibrating seeds into 4 fractions based on the shape and size of seeds became widespread not only in our country but also abroad.

The developed technology of post-harvest processing of seeds of parental forms and maize hybrids was used in the reconstruction of more than 70 plants and points for seed processing with a capacity of 250 and 500 tons per season, built according to standard designs. This made it possible to almost completely satisfy the needs of farms for high-quality seed. According to the Institute of Maize, the widespread use of hybrid seeds increased the crop yield by 20-30%.

In 1986-1989 the technology of in-line machine preparation of high-quality sunflower seeds was developed [15]. On farms, it was carried out with grain cleaning units of the ZAV type and complexes of the KZS type according to the same scheme as the treatment of grain crops seeds. Studies showed that the essential features of sunflower seeds did not allow them to be processed according to the "grain scheme". When using aggregates and complexes, a high degree of injury to seeds by transporting devices was noted, seeds cleaning from difficult-to-separate impurities were not ensured, and seed material calibration was impossible [16].

The technology included processing sunflower seeds in two stages:

- the first – reception, preliminary cleaning, drying, cleaning and temporary storage for the purpose of post-harvest ripening;
- the second – final cleaning, seeds calibration, dressing and inlay.

In accordance with this technology, the point for preparation and storage of sunflower seeds with a capacity of 400 tons per season was designed, built in the experimental farm of the V.S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil crops (VNIIMK) "Berezanskoe" of the Krasnodar Territory and tested. The new technology provided an increase in the yield of 1st class seeds from the material coming from the field from 50 to 90%. The use of intermediate storage for post-harvest ripening with subsequent secondary and final cleaning made it possible to remove non-germinating, damaged and weak seeds from the seed material. According to VNIIMK, the yield of oil-seeds with such preparation of the seed increased by 0.1 tons per hectare and more [7].

Research of the specific conditions and requirements for enterprises for post-harvest processing, storage and

preparation of seeds in elite seed farms in the early 90s showed that the narrowest place for the seeds production of high reproduction remained their post-harvest processing and preparation.

In order to solve a problem of national importance, Agroengineering Center VIM developed a technology and structure for an enterprise for post-harvest processing, preparation and storage of seeds in elite seed farms. The implementation of the development made it possible to accelerate the rate of new varieties seeds reproduction, regularly carry out variety change and variety renewal, maintain the sowing qualities of seeds during post-harvest processing, and provided an increase in yield by 0.2-0.4 tons per hectare [17].

Traditionally used post-harvest processing of grain and seeds preparation technologies included air sieve machines, triers, and final cleaning machines (Table 2).

The principles of seed cleaning in domestic and foreign machines in the post-harvest processing of grain and seeds preparation were similar. The main foreign technologies advantage was high reliability, the use of robotic process control systems. However, the increase in the reliability of foreign machines was often accompanied by a significant increase in the machines mass, as well as the volumes occupied by them. For example, the analysis of machines for preliminary and primary cleaning of the company Cimbria (Denmark) showed that with an increase in productivity on wheat grain from 5 to 20 tons per hectare, the volume of the machine and its base area increased in a straight line (Fig. 4). In this case, the mass did not change significantly. However, with a productivity increase of more than 20 tons per hectare, the machines mass, as well as their dimensional characteristics, increased intensively, which in turn increased the equipment cost.

The outstripping prices growth for machinery and equipment in comparison with the agricultural products cost led to the fact that the agricultural producer could not purchase expensive machinery. Grain cleaning equipment was physically worn out by 70-80%. The provision of large and medium-sized farms did not exceed 35% of the required number of machines, and small and private farms had practically no required equipment. At the same time, the existing equipment for the separation of grain and seeds in terms of its operational indicators – specific productivity, efficiency, reliability and energy intensity – did

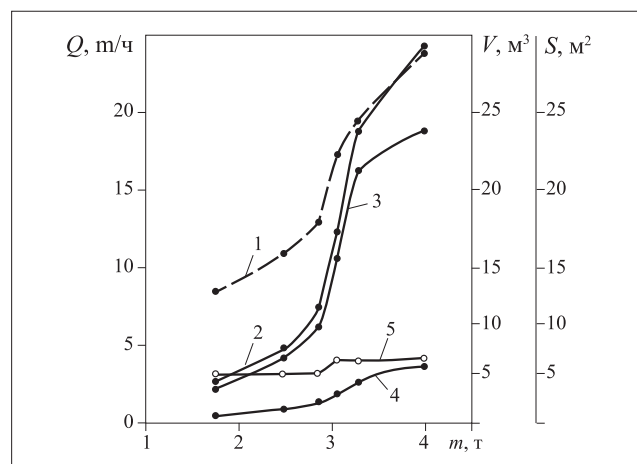


Fig. 4. Dependencies of productivity (Q), volume (V), base area (S) and mass (m) of air-sieve machines of DELTA SUPER family of Cimbria company (Denmark): 1 – volume; 2 – productivity on the seeds of the main grain crops; 3 – productivity on corn seeds; 4 – productivity on grass seeds; 5 – base area

not meet the increasing requirements for the seed and commercial material quality.

In this regard, the task of a scientific search for the development reserves of air-screen separators according to the criteria of the work quality, reducing the machines cost, increasing their versatility is especially urgent.

On the territory of the Russian Federation, there are more than 1000 species of weed seeds, some of them are easily isolated from the seeds of cultivated plants on modern grain-cleaning machines, and to isolate others, special machines and complex processing technologies are required [11, 18, 19]. It is generally recognized, for example, that it is difficult to isolate wild oat and barley seeds from oats, rye and wheat from rye, barley from wheat, wild radish and wheat from buckwheat, mustard and dodder from alfalfa, etc. The seeds of cultivated and weed plants that are difficult to separate are those in which the sizes and speed of soaring coincide with the indicators of the main crop or differ insignificantly from them [20].

For all grain crops seeds, the main disadvantage that reduced their quality was the content of hard-to-separate seeds of other cultivated plants in them. For this reason, about 40% of the sowing material of wheat, 46% of barley, 63% of rye, cultivated on the farms' grain complexes, did not meet the requirements for conditional seeds. This

MAIN CHARACTERISTICS OF GRAIN AND SEED CLEANING MACHINES					
Cleaning operations	Productivity, t/h	Power, kWt	Weight, kg	Specific energy consumption, kW·h/t	Specific metal consumption, t·h/t
Preliminary	5-50	5.4	1045	0.26	52
Primary	10-50	8.6	2170	0.28	91
Secondary	4-10	10.8	1773	1.32	286
Trier	7.5-10	3.3	1520	0.26	128,3
Final	2.5-9	10.6	1120	2.19	207



situation was the result of improper agricultural technology of growing crops for seeds, violation of the technical conditions for the operation of seed cleaning equipment and its imperfections [20].

The contamination of the seed material of a particular variety with seeds of other varieties or cultivated plants was a great danger. Biologically better adapted to local conditions and having a higher reproduction rate, these weeds could multiply rapidly and displace crops of the main variety. In production conditions, a species admixture was especially dangerous in seed crops: contamination of winter wheat with rye, soft wheat – durum, barley – oats and wheat, rice – red-grain weed forms, etc.

Due to the high multiplication factor of weeds, their number in the crop became hundreds of times higher than the content in the original seed, therefore, there were cyclical and progressively increasing difficulties with clearing the seed or killing weeds in the field. Due to the low efficiency of the measures applied in all directions, the costly problem of combating weed fields became an inevitable, habitual and planned measure, implemented mainly by the large-scale use of chemicals.

In order to achieve the fields cleanliness as in the leading grain-producing countries, it was necessary to simultaneously and effectively combat weeds when cleaning seeds from them, disinfecting manure and destroying weed plants in the fields.

The most important indicator that determined the seeds quality, and hence the yield, was their germination capacity. Its norms, specified in the standards, were established by laboratory values. Field germination of seeds was almost everywhere less than laboratory germination, it depended both on it and on meteorological and agrotechnical conditions. According to a number of sources, the field germination of seeds of major grain crops could be reduced by 10-40%. It turned out that on average 10-40% of seeds that normally germinate under laboratory conditions did not germinate in the field [21, 22]. In many soil and climatic zones, a decrease in field germination reduced yield. With a decrease in field germination by 1%, the yield of spring grain crops decreased by 1.5-3.0%, winter crops – by 1.0-1.5% [11].

One of the key reasons for the decrease in field germination of seeds was their injury. The problem of preventing injury to seeds by machines at all stages of their production, including post-harvest processing of grain and seeds preparation, became extremely important [23, 24]. To solve it, it was necessary to conduct comprehensive research with the participation of biologists, engineers and breeders.

Seeds sorting in our country and abroad is still the least developed part of the technology for preparing seeds for sowing [25, 26]. The problem is that the yielding and associated sowing qualities are assessed according to agronomic indicators: viability, germination, germination energy and growth strength, and sorting machines can separate seeds only by physical properties: size, individual weight, density. It has not yet been possible to find a

direct or indirect relationship between the agronomic and the indicated physical properties of seeds.

It is assumed that one of the underutilized resources to improve the efficiency of seed sorting is the use of fractional technologies. They are promising for sorting due to the fact that seed machines separate the source material according to a complex criterion, which depends on the totality of physical and mechanical grain properties. Controlling the seeds physical properties during fractionation increases the cleaning efficiency on downstream machines.

In post-harvest processing of grain and seeds preparation technologies, before the material receipt for processing, as well as during processing, it is necessary to analyze the material for the content of impurities in it, that is, analysis of purity. In domestic technologies, this work is performed mainly by hand, which requires a large amount of laboratory technicians labor. In addition, manual analysis does not allow seed cleaning lines optimal control, which significantly hinders the effective control of the process and leads to the seeds loss and a decrease in their quality [27]. In foreign practice, technical means of technological lines control, including automatic sampling of material entering for processing and during its processing, have become an integral part of technologies [28, 29]. In this aspect, the development of systems for automatic sampling and laboratory machines for monitoring the purity of the processed material and analysis of impurities is a particularly urgent scientific and design problem.

Justification of machine technologies system, the nomenclature of technical means that ensure the minimum costs in most various grain-producing farms is a purely scientific task, and without its solution there is only the path of the spontaneous formation of the post-harvest processing industry, which will lead to a decrease in the profitability of production and an increase in the grain cost.

New technologies of grain-producing agricultural enterprises should provide the possibility of post-harvest processing and grain storage in the conditions of the farm with implementation at a time favorable to the owner.

The prospective development of the technological base of the post-harvest processing of grain and seeds preparation should be focused on the implementation of various options in the organization of post-harvest processing [30]. Along with the traditional continuous processing of grain with bringing it to the specified conditions in one pass, two-stage processing should be widely used, including:

- at the first stage – reception, preparation of food and seed grains for short-term storage (preliminary cleaning, temporary ventilation and/or drying if necessary) and storage of grain and seeds during the harvesting period;

- at the second stage – processing of food and seed grain with bringing to the required conditions in the post-harvest period.

The implementation of a two-stage technology will reduce grain losses and preserve its quality, as well as dramatically reduce capital costs for high-performance com-

plex equipment, the loading of which is limited by the harvesting period.

Thus, the analysis of the development of machine-technological systems for post-harvest grain processing over the past 100 years showed that during this period, scientific, design organizations and industry created a system for post-harvest grain processing, which ensures its processing flow, the complex mechanization of post-harvest grain processing was completed.

The materials presented in this article reflect the historical aspects of the creation and development of technologies for post-harvest grain processing, as well as some priority areas for further technological development of grain processing and seed preparation.

CONCLUSIONS

1. Until the 60s of the 20th century, grain and seeds were taken on farms in open areas or covered complexes, using machines and mechanisms separately. All auxiliary technological operations - feeding the starting material into the machine, shipping the cleaning fractions, their packing or the formation of collars - were carried out manually. To service the machines and carry out loading and unloading operations, it was necessary to attract up to 100-150 people to work on grain complexes. When processing grain on separate machines, hard physical labor, negative environmental impact, significant losses and unsatisfactory quality of grain and seeds, and premature failure of equipment were characteristic.

2. In the late 50s and early 60s, with an increase in grain production and an increase in the country's combine fleet, equipment was required to mechanize work on open profiled grain complexes. One of the main tasks assigned to science, design organizations and industry was the creation of self-propelled machines of high performance. In 1961 a mobile heap cleaner ORP-20 with a capacity of 20 tons per hectare was developed. It was in great demand and was produced in tens of thousands of pieces a year. In a modernized form, OVS-25 is in demand at the present time.

3. By the end of the 70s, with the completion of work on the creation of units and complexes, all processes of

the post-harvest processing of grain and seeds preparation for the first time in the country were fully mechanized. As a result, labor productivity in this industry increased by 7-10 times, the cost of processing grain decreased by 2-3 times, its losses decreased, manual, unskilled labor was excluded.

4. Changes in recent years have necessitated fundamental changes in technological support, structure and nomenclature of machines and equipment for post-harvest processing of grain and seeds preparation.

The main scientific task was the development of a system of post-harvest processing of grain and seeds preparation technologies, adaptive to the variety of zonal conditions and the characteristics of farms with different forms of ownership and volumes of grain production.

Particular attention should be paid to the development of a two-stage technology with the implementation during the harvesting period of operations that ensure the grain stability during storage, and in the post-harvest period - bringing grain and seeds to the required conditions.

5. One of the essential resources for increasing the efficiency of post-harvest processing of grain and seeds preparation technologies is fractional technologies. They are promising due to the fact that many grain and seed cleaning machines separate the source material on a complex basis, which depends on the totality of physical and mechanical properties of grain.

Controlling the properties of seed mixtures in the process of in-line processing by fractionation is an urgent scientific task of developing technologies for post-harvest seed preparation, especially when separating difficult-to-separate impurities and low-productive seeds from the main seed material.

6. The development of technologically effective, sparing and low-cost technologies of post-harvest processing of grain and seeds preparation, available to producers of various forms of ownership and with different volumes of grain production, is possible only on the basis of new knowledge about the processes of separation and preservation of the biological potential of grain and seeds.

REFERENCES

1. Poonia T.C. History of seed production and its key issues. *International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences*. 2013. Vol. 3(1). 148-154.
2. Pavlov S.A., Pekhal'skiy I.A., Drincha V.M. Sostoyaniye i zadachi nauchno-tekhnicheskogo obespecheniya mashinnoy podgotovki semya [State and tasks of scientific and technical support for machine preparation of seeds]. *Mekhanizatsiya uborki, posleuborochnoi obrabotki i khraneniya urozhaya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Nauchnye trudy VIM*. 2000. Vol. 132. 73-79.
3. Branedenburg N.R. The principles and practice of seed cleaning: separation with equipment that senses dimensions, shape, density and terminal velocity of seeds. *Seed science and technology*. 1977. Vol. 5. N2. 173-186.
4. Ryabykh V.A. Lidea stroit zavod po proizvodstvu semyan v Rossii [Lidea is building a seed production plant in Russia]. *Perfect Agriculture*. 2020. N5. 26-28.
5. Goryachkin V.P. Ispytaniye sortirovok na Butyrskom khutore 1908 goda [Sorting test at Butyrskiy khutor in 1908]. *Izvestiya byuro po sel'skokhozyaystvennoy mekhanike*. Saint Petersburg: 1910. Ch. I. Iss. 4-5. 94.
6. Ul'rikh N.N. U istokov mekhanizatsii predposevnoy podgotovki semyan i posleuborochnoy obrabotki zerna [At the origins of mechanization of pre-sowing seed preparation and post-harvest grain processing]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 1980. N4. 19-21.
7. Korn A.M. VIM: ot ruchnoy veyalki do zernoobrabatyva-



yushchego zavoda – razvitie i realizatsiya tekhnicheskoy mysli po zernoochistke [VIM: from a manual winder to a grain processing plant – the development and implementation of technical ideas for grain cleaning]. Moscow: VIM. 2006. 72.

8. Ul'rikh N.N. Zadachi i mekhanicheskie sredstva ochistki i sortirovaniya zerna [Tasks and mechanical means of cleaning and sorting grain]. Moscow: Sel'khozgiz. 1935. Vol. 1. 83-132.

9. Pavlovskiy G.T. Tekhnologicheskie osnovy proektirovaniya potochnykh protsessov uborki i posleuborochnoy obrabotki uroznya zernovykh kul'tur [Technological foundations for the design of continuous harvesting processes and post-harvest processing of grain crops]. *Trudy VIM*. 1953. Vol. 46. 195-211.

10. Krasov V.D., Grabel'kovskii N.I. GSKB «Zernoochistka» 50 let. [GSKB "Grain cleaning" is 50 years old] Voronezh: NPO «MODEK». 2006. S. 192.

11. Aniskin V.I., Batarchuk A.I., Vesna B.A., Strona I.G. (red.). Promyshlennoe semenovodstvo: Spravochnik [Industrial seed production: Handbook]. Moscow: Kolos. 1980. 287.

12. Avdeev A.V. Modernizatsiya zernovykh kompleksov [Modernization of grain complexes]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 1987. N12. 43-44.

13. Oleynikov V.D., Kuznetsov V.V., Gozman G.I. Agregaty i komplekсы dlya posleuborochnoy obrabotki zerna [Aggregates and complexes for post-harvest grain processing]. Moscow: Kolos. 1977. 187.

14. Ivanov N.M. Tekhnologicheskoe i tekhnicheskoe obespechenie posleuborochnoy obrabotki v Sibiri [Technological and technical support of post-harvest processing in Siberia]. Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve. Nauchno-prakt. tsentr Nats. akad. nauk Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva. Minsk: 2007. 20-24.

15. Zyulin A.N., Drincha V.M., Yampilov S.S. Fraktsionnye tekhnologii ochistki semyan zernovykh [Fractional technologies for cleaning grain seeds]. *Zemledelie*. 1998. N6. 39-40.

16. Nikolaeva G.T. Mekhanicheskie povrezhdeniya semyan na razlichnykh etapakh zavodskoy obrabotki [Mechanical damage to seeds at different stages of plant processing]. *Biologiya i tekhnologiya semyan*. Khar'kov: 1974. 139-143.

17. Gozman G.I., Babchenko V.D., Zyulin A.N. Kontseptsiya strukturnogo postroeniya tekhnologicheskikh liniy obrabotki semyan v elitno-semenovodcheskikh khozyaystvakh [The concept of structural construction of technological lines for seed processing in elite seed farms]. *NTB VIM*. 1993. N87. 16-18.

18. Letoshnev M.N. Ochistka i sortirovanie semennogo materiala i zernoochistitel'nye mashiny [Seed cleaning and sorting and grain cleaning machines]. Leningrad: Gos. institut opytной agronomii. 1929. 28.

19. Branedenburg N.R., Park J.K. The principles and practice of seed cleaning: separation with equipment that senses surface texture, color, resilience and electrical properties of seeds. *Seed science and technology*. 1977. Vol. 5. N2. 187-197.

20. Matveev A.S. K opredeleniyu trudnotdelimyykh semyan kul'turnykh i sornykh rasteniy v semenakh zernovykh kul'tur [To the determination of hard-to-separate seeds of cultivated and weed plants in the seeds of grain crops]. *Sbornik nauchnykh trudov VIM*. 1987. Vol. 112. 20-43.

21. Aniskin V.I., Matveev A.S. Snizit' travmirovaniye semyan pri uborke i posleuborochnoy [To reduce damage to seeds during harvesting and post-harvesting]. *Selektsiya i semenovodstvo*. 1986. N1. 53-55.

22. Chazov S.A., Khaydukova V.S., Ereemeeva V.G. Polevaya vskhozhest' semyan polevykh kul'tur [Field germination of seeds of field crops]. *Selektsiya i semenovodstvo*. 1987. N1. 52-54.

23. Orobinskiy V.I., Gievskiy A.M. Teoreticheskie predposylki vydeleniya biologicheskii nepolnotsennogo zerna pri posleuborochnoy obrabotke [Theoretical prerequisites for the isolation of biologically defective grain during post-harvest processing]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2006. N13. 161-174.

24. Tarasenko A.P., Orobinskiy V.I., Merchalova M.E. Vliyanie vlazhnosti zerna pri uborke i posleuborochnoy obrabotke na posevnye kachestva semyan [The effect of grain moisture during harvesting and post-harvest processing on the sowing quality of seeds]. *Khraneniye i pererabotka zerna*. 2000. N2. 12-13.

25. Korn A.M. Poisk novykh tekhnologiy sortirovaniya semyan [Search for new technologies for sorting seeds]. *Vestnik RASKhN*. 2008. N2. 15-16.

26. Gregg B., Billups G. Seed conditioning Vol. 1. Management. USA: Science Publishers. 2009. 469.

27. Paige D., Geng S., Jongkaewwattana S. Apparatus for automatic Measurement of Kernel Weight, Length, and Thickness. *Crop Science*. 1991. Vol. 31(5). 1314-1319.

28. Negrini O., Spilman C.K., Wang J.R., Chung D.S., Steele J.L., Posner E. Evaluation of Laboratory Grain Cleaning and Separating Equipment. Part II. *Transactions of ASAE*. 1994. Vol. 37(6). 1913-1918.

29. Wang J.R., Chung D.S., Spilman C.K., Eckhoff S.R., Rhee C., Converse H.H. Evaluation of Laboratory Grain Cleaning and Separating Equipment. Part I. *Transactions of ASAE*. 1994. Vol. 37(2). 507-513.

30. Drincha V.M., Pavlov S.A. Nauchnye priority razvitiya mashinnoy podgotovki semyan [Scientific priorities for the development of machine seed preparation]. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 2001. N3. 6-8.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.10.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 07.10.2020

Статья принята к публикации 27.11.2020
The paper was accepted
for publication on 27.11.2020

Обоснование параметров гравитационной очистительной колонки

Виктор Геннадьевич Хамуев,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: victor250476@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Исследовали гравитационный способ сепарации зернового вороха, при котором очистка от крупных и мелких примесей осуществляется без затрат электроэнергии, при самотечном движении материала в вертикальных очистительных колонках по неподвижным зигзагообразно размещенным сепарирующим гребенкам. *(Цель исследования)* Изучить работу гравитационной колонки на очистке селекционных семян и обосновать ее конструктивные параметры. *(Материалы и методы)* Разработали макетный образец гравитационной колонки. Экспериментально определили: диаметр зубьев гребенок; пропускную способность колонки; возможность более полного выделения из исходного материала фракции «семена»; полноту выделения крупных примесей. Сравнили работу гравитационной колонки и плоского качающегося решета. Оценили заклинивание гребенок семенами очищаемой культуры. *(Результаты и обсуждение)* Отметили, что на очистке пшеницы при производительности 45,6 килограмма в час выход фракции «отход» составил 0,5 процента, потери 0,07 процента, а при производительности 227,8 килограмма в час, соответственно, 0,98 и 0,35 процента, что отвечает исходным требованиям на основные технологические операции для послеуборочной обработки селекционных семян. *(Выводы)* Установили, что гравитационная колонка для выделения мелких примесей селекционных семян пшеницы с высокой эффективностью разделяет частицы, если они отличаются друг от друга по толщине не менее 0,3 миллиметра при зазоре между прутками гребенки 2,0 миллиметра и диаметре поперечного сечения прутка 0,9 миллиметра. Определили, что высокая производительность – до 150 килограммов в час – возможна при поперечном сечении колонки со сторонами 60 и 70 миллиметров. Выявили практически одинаковое качество разделения материала при выделении мелких примесей с помощью как решета, так и гравитационной колонки.

Ключевые слова: очистка семян, сепарация зернового вороха, гравитационная очистительная колонка, воздушно-решетная машина, энергосбережение, производительность.

■ **Для цитирования:** Хамуев В.Г. Обоснование параметров гравитационной очистительной колонки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 26-32. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-26-32.

Justification of the Gravitational Seed Cleaning System Parameters

Victor G. Khamuev,

Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: victor250476@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The author researched the gravitational method of separating a grain heap, in which cleaning from large and small impurities was carried out without energy consumption, with the gravity material flow in vertical cleaning columns along fixed zigzag separating combs. *(Research purpose)* To study the gravity column operation for cleaning selection seeds and substantiate its design parameters. *(Materials and methods)* A prototype gravity column was developed. The author experimentally determined: the combs teeth diameter; column throughput; the possibility of a more complete separation of the seed fraction from the basic material; completeness of large impurities separation. He compared the work of the gravity column and the flat rocking sieve. He assessed the combs jamming by the cleaned culture seeds. *(Results and discussion)* The author noted that on wheat cleaning at a productivity of 45.6 kilogram per hour, the yield of the "waste" fraction was 0.5 percent, a loss of 0.07 percent, and at a productivity of 227.8 kilogram per hour – 0.98 and 0.35 percent, which corresponded to the initial requirements for the main technological operations for post-harvest processing of selection seeds. *(Conclusions)* It was found that a gravity column for separating selection wheat seeds small impurities separated particles with high efficiency if they differed from each other in

thickness of at least 0.3 millimeter with a gap between the comb bars of 2.0 millimeter and a bar cross-section diameter of 0.9 millimeter. It was determined that high productivity – up to 150 kilogram per hour – was possible with a column cross-section with sides of 60 and 70 millimeter. The author revealed practically the same quality of material separation when separating small impurities using both a sieve and a gravity column.

Keywords: seed cleaning, grain heaps separation, gravity wash column, air-sieve machine, energy saving, productivity.

For citation: Khamuev V.G. Obosnovanie parametrov gravitatsionnoy ochistitel'noy kolonki [Justification of the gravitational seed cleaning system parameters]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 26-32 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-26-32.

Для очистки семян, собранных с селекционных питомников, используют воздушно-решетные машины [1-3]. Несмотря на то, что их номинальная производительность на пшенице составляет 150 кг/ч при обработке различных партий (образцов) семян массой от 6 до 20 кг, фактическая производительность составляет от 30 до 67 кг/ч (3-5 образцов/ч) [4-6]. Связано это с необходимостью остановки и очистки машины от застрявших в отверстиях решет семян предыдущей партии для исключения сортосмешивания [7-9].

В Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ проводятся изыскания по совершенствованию технологии и способа очистки образцов семян [10]. Например, разработан гравитационный способ сепарации зернового вороха, при котором очистка от крупных и мелких примесей осуществляется без затрат электроэнергии и при самотечном движении материала в вертикальных очистительных колонках по неподвижным зигзагообразно размещенным сепарирующим гребенкам (вместо колеблющегося решета) [11]. Использование этого способа очистки целесообразно при создании селекционной семяочистительной машины, свободной от недостатков традиционных аналогов [12-14].

Цель исследования – изучить работу гравитационных колонок на очистке селекционных семян и обосновать их конструктивные параметры.

Материалы и методы. Исследования проводили на вертикальной гравитационной колонке (рис. 1). Она имеет прямоугольное сечение 60×70 мм и высоту 500 мм. Три ее стенки изготовлены из металла, а четвертая – из прозрачного органического стекла для наблюдения за процессом очистки. Внутри колонки установлены гребенки, представляющие собой консольно-закрепленные на общей поверхности в ряд металлические прутки.

Очистка семян в колонке заключается в следующем. Исходный материал подается сверху и самотеком движется вниз по гребенкам. Во время движения мелкие примеси проходят через зазоры между прутками и вдоль боковых стенок падают вниз, а семена, скользя по гребенкам, также опускаются вниз, где разделенные фракции собираются в соответствующие емкости.

Чтобы установить оптимальные параметры гравитационной колонки, провели несколько опытов.

Опыт № 1. Определяли диаметр зубьев гребенок при очистке семян пшеницы, засоренных мелкими органическими и минеральными примесями, а также мелкими и щуплыми семенами. При этом оценивали точность разделения исходного материала и фракций «семена» и «отходы» на решетках с продолговатыми отверстиями. Фракция «отход» подвергалась ручной разборке, после чего определяли содержание полноценных семян (потери). Использовали две колонки, в каждой по 9 гребенок, с прутками Ø0,6 мм (колонка 1) и Ø0,9 мм (колонка 2). Зазор между прутками составлял 2,0 мм. Вид кривой изгиба каждого прутка – эвольвента.

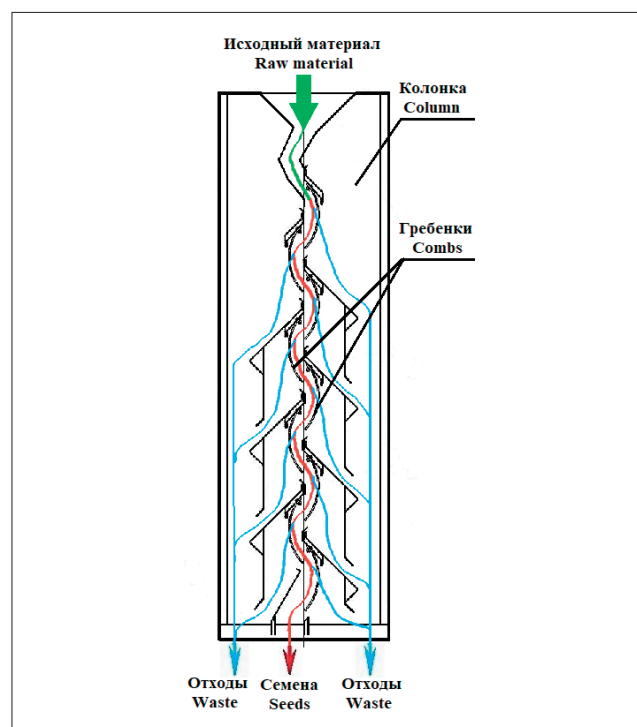


Рис. 1. Схема гравитационной очистительной колонки

Fig. 1. Scheme of a gravity wash column

Опыт № 2. После выбора диаметра прутков гребенок определяли пропускную способность колонки на очистке семян пшеницы, которые разделяли на две фракции при различной производительности. Решет-

ному анализу, а также ручной разборке (см. опыт № 1) подвергались исходный материал и фракция «отход». Зазор между прутками составлял 2,0 мм.

Опыт № 3. Определяли возможность более полного выделения из исходного материала (пшеница) фракции «семена». Использовали две колонки с зазорами между прутками 2,0 мм (колонка 1) и 2,2 мм (колонка 2). Решетный анализ проводили согласно опыту № 1.

Опыт № 4. Определяли полноту выделения крупных примесей. Колонка для выделения крупных примесей отличается тем, что имеет гребенки с увеличенным зазором между прутками. Исходный материал (пшеница) разделялся на две фракции при производительности 60 кг/ч (рис. 1). В отличие от предыдущих опытов все семена и мелкие примеси проходили через зазоры между прутками гребенок и опускались около боковых стенок, а по центру колонки перемещались крупные примеси. Использовали две колонки с зазорами между прутками 3,5 мм (колонка 1) и 4,5 мм (колонка 2). Решетный анализ проводили согласно опыту № 1.

Опыт № 5. Проводили сравнительные исследования работы гравитационной колонки и плоского качающегося решета при обработке семян пшеницы. Использовали колонку с зазорами между прутками 2,0 мм и решето с продолговатыми отверстиями 2,0 мм. Это решето было установлено в качестве подсевного на семяочистительную машину СМ-0,15 [15]. Другие установленные решета имели заведомо большие отверстия, чтобы через них свободно проходил весь очищаемый материал. Аспирационная система была отключена. Кинематический режим оптимальный – 430 колебаний в минуту при производительности 150 кг/ч. Решетный анализ проводили согласно опыту № 1.

Опыт № 6. Исследовали заклинивание гребенок семенами очищаемой культуры (пшеницы).

Первоначально рассматривали влияние производительности на заклинивание. С этой целью 5 кг семян пропускали через колонку. Время работы фиксировали секундомером. После обработки определяли места, где заклинились семена, и их количество.

Далее изучали, насколько стабильно происходит заклинивание гребенок семенами. С этой целью пропускали образец массой 1 кг при производительности 95 кг/ч и подсчитывали количество заклинившихся семян. Колонку очищали от семян и через нее повторно пропускали тот же образец после смешивания выходов. В такой последовательности проводили семь повторностей.

В третьей части опыта № 6, проведенной по выше изложенной методике, определяли возможность самоочистки прутков гребенок.

Результаты и обсуждение. **Опыт № 1.** На очистке пшеницы с производительностью колонки 1, равной 70,3 кг/ч, колонки 2 – 73,6 кг/ч получена чистота

семян 98,0 и 99,0%, что попадает в категории РС и ОС (ГОСТ Р 52325-2005) соответственно [16-18]. Потери семян в первой колонке составили 0,42%, по второй – 0,24%. В первой колонке по сравнению со второй в отходы попало больше семян с поперечным размером зерновок, превышающим установленный между прутками гребенок зазор (рис. 2). Увеличилась точность классификации частиц. Повысился выход фракции «семена» более, чем на 3%. Это свидетельствует о том, что прутки гребенок колонки 1 недостаточно жестки и в процессе работы происходит их колебательное движение, вследствие которого изменяется зазор между прутками. Лучшие результаты получены на колонке 2. В связи с этим все дальнейшие опыты проводили с поперечным диаметром прутков 0,9 мм.

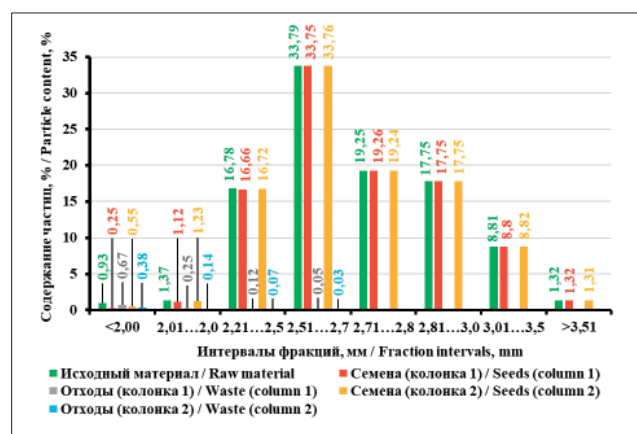


Рис. 2. Распределение частиц очищаемого материала по их толщине во фракциях, полученных в гравитационных колонках с различными диаметрами прутков

Fig. 2. Particle distribution of the material to be cleaned by their thickness in fractions obtained on gravity columns with different rod diameters

Опыт № 2. С увеличением производительности растут выход материала во фракцию «отход» и потери (рис. 3). При производительности 45,6 кг/ч выход фракции «отход» составил 0,5%, потери – 0,07; при производительности 227,8 кг/ч – 0,98 и 0,35% соответственно. Это удовлетворяет исходные требования на основные технологические операции для послеуборочной обработки селекционных семян [19, 20].

Опыт № 3. Для выделения мелких примесей использование колонок с большим размером зазора между прутками повышает в несколько раз как выход фракции «отход», так и потери (рис. 4). Первый показатель возрос с 0,62% (колонка 1) до 2,54% (колонка 2), потери – с 0,24 до 1,68% соответственно. Чистота семян при этом практически осталась такой же – 99,37 и 99,69%. Поэтому использование колонок для выделения мелких примесей с зазором между прутками, расширенным даже на 0,2 мм, нецелесообразно.

Опыт № 4. Высота колонки 500 мм не обеспечивает полного выделения как крупных примесей, так

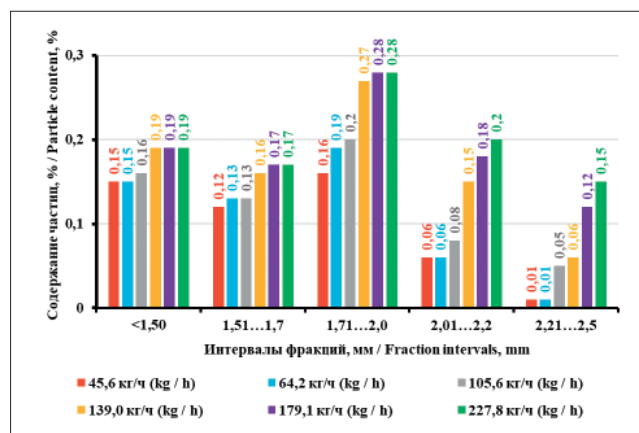


Рис. 3. Распределение частиц фракции «отход» по их толщине при разной производительности гравитационной колонки
Fig. 3. Distribution of particles of the "waste" fraction along their thickness at different productivity of the gravity column

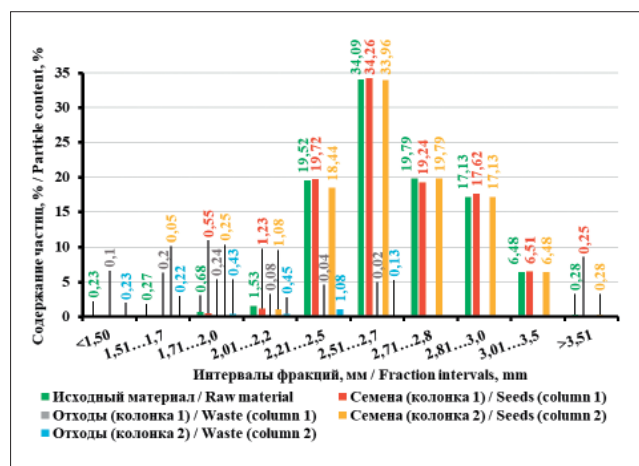


Рис. 4. Распределение частиц очищаемого материала по их толщине во фракциях, полученных в гравитационных колонках с различными зазорами между прутками при выделении мелких примесей
Fig. 4. Distribution of cleaned material particles along their thickness in fractions obtained on gravity columns with the release of small impurities with different gaps between the rods

и семян (рис. 5). В колонке 1 чистота фракции «семена» по отношению к исходному материалу понизилась до 77,72% (в исходном – 86,38%) из-за недостаточно эффективного выделения примесей и больших потерь (8,51%). В колонке 2 чистота фракции «семена» по сравнению с исходной также ухудшилась до 83,54%, но потери значительно уменьшились – с 8,51 до 1,96%.

Опыт № 5. При обработке исходного материала решетом и колонка обеспечивают одинаковое качество разделения материала при производительности 150 кг/ч (рис. 6). Чистота семян составила 99,78% на решетке и 99,49% в колонке. Зато решето значительно меньше допускает потери – 0,08 против 0,24%.

Опыт № 6. При всех уровнях производительности

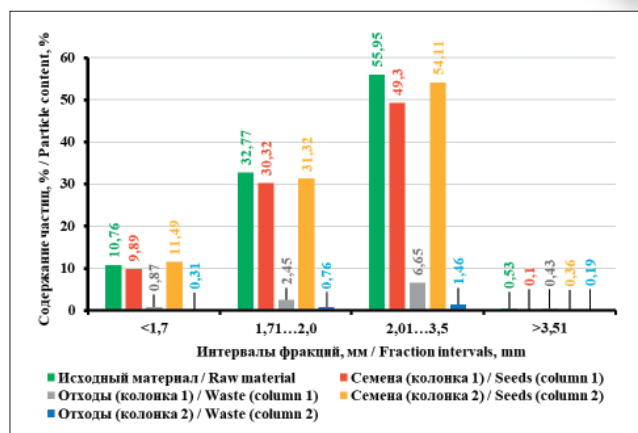


Рис. 5. Распределение частиц очищаемого материала по их толщине во фракциях, полученных при выделении крупных примесей в гравитационных колонках с различными зазорами между прутками
Fig. 5. Distribution of cleaned material particles along their thickness in fractions obtained on gravity columns with the release of large impurities with different gaps between the rods

происходит заклинивание семян между прутками гребенки или между прутком и стенкой колонки (табл. 1). Наименьшее заклинивание (6 семян) имеет место при небольшой производительности около 50 кг/ч. При повышении этого показателя количество заклинившихся семян колеблется в пределах 14-20 шт.

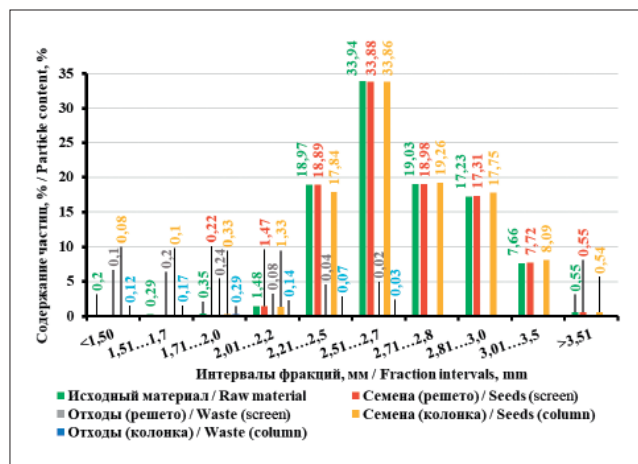


Рис. 6. Распределение частиц очищаемого материала по их толщине во фракциях, полученных на решетке и в гравитационной колонке при производительности 150 кг/ч
Fig. 6. Distribution of cleaned material particles along their thickness in fractions obtained on a screen and in a gravity column at a productivity of 150 kg/h

Во второй части опыта наблюдалось заклинивание 8-18 семян (табл. 2).

В третьей части опыта самоочистка гребенки не происходит, а прослеживается тенденция к росту числа заклинившихся семян: после седьмого пропуска стало 43 шт. (табл. 3). Следовательно, для предотвращения смешивания сортов после обработки партии

Таблица 1

Table 1

Количество заклинившихся семян в зависимости от производительности колонки, шт. THE NUMBER OF JAMMED SEEDS, DEPENDING ON THE PRODUCTIVITY OF THE COLUMN, PCS.						
Номер гребенки Comb number	Производительность, кг/ч Productivity, kg/h					
	49,7	81,6	98,6	130,9	138,5	171,4
1	1	1	3	1	1	2
2	—	1	2	1	1	3
3	—	2	1	—	1	2
4	—	—	2	1	3	2
5	—	5	4	3	—	—
6	2	2	2	5	1	3
7	3	4	4	1	3	1
8	—	2	2	1	1	2
9	—	—	—	6	3	—
Сумма / Total	6	15	20	19	14	15

Таблица 3

Table 3

Количество заклинившихся семян без очистки колонки THE NUMBER OF JAMMED SEEDS WITHOUT CLEANING THE COLUMN							
Номер гребенки Comb number	Номер повторности опыта Experiment replication number						
	1	2	3	4	5	6	7
1	2	8	8	9	9	9	9
2	—	—	—	1	—	—	—
3	1	—	—	—	—	—	—
4	2	1	—	—	4	4	5
5	6	—	1	3	2	2	3
6	7	7	7	7	9	7	10
7	—	2	2	4	4	4	5
8	—	—	—	2	1	3	7
9	2	—	—	2	2	1	4
Сумма / Total	20	18	18	28	31	30	43

селекционных образцов колонку необходимо доочищать вручную.

Выводы. Гравитационная колонка для выделения

Таблица 2

Table 2

Количество заклинившихся семян при производительности 96 кг/ч, шт. NUMBER OF JAMMED SEEDS AT A PRODUCTIVITY OF 96 kg/h, PCS.							
Номер гребенки Comb number	Номер повторности опыта Experiment replication number						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	—	—	1	1	1	4
2	—	1	2	1	1	—	—
3	—	—	—	—	—	—	2
4	2	1	—	—	4	9	3
5	—	2	1	2	—	—	—
6	2	1	3	3	1	—	4
7	3	6	1	2	1	—	2
8	—	1	2	1	1	2	2
9	—	1	1	—	1	4	1
Сумма / Total	8	13	10	10	10	16	16

мелких примесей при очистке селекционных семян пшеницы с высокой эффективностью разделяет частицы, если они отличаются друг от друга по толщине не менее 0,3 мм при зазоре между прутками гребенки 2,0 мм и диаметре поперечного сечения прутка 0,9 мм.

При поперечном сечении колонки 60×70 мм достигается производительность до 150 кг/ч.

Решето как рабочий орган и гравитационная колонка для выделения мелких примесей обеспечивают практически одинаковое качество разделения материала.

Имеет место незначительное заклинивание гребенок семенами. Чем выше производительность, тем больше заклинивание. В зависимости от производительности (50-170 кг/ч) заклинивание составляет 6-20 семян.

Высота колонки для выделения крупных примесей при зазоре между прутками гребенки 4,0 мм должна быть в 2 раза больше высоты колонки для выделения мелких примесей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Jokić G., Prole S., Butaš D., Sedlar A., Bugarin R., Turan J. Analysis the Parameters of Quality Sunflower Hybrid Seed after Processing on Fine Cleaner, Trijer Machine and Gravity Separator. *Savremena poljoprivredna tehnika*. 2016. N42. 25-38.
- Krzysiak Z., Samociuk W., Skic A., Bartnik G., Zarajczyk J., Szmigielski M., Dziki D., Wierzbicki S., Krzywonos L. Effect of Sieve Drum Inclination Angle on Wheat Grain Cleaning in a Novel Rotary Cleaning Device. *Transactions of the ASABE*. 2017. N60. 1751-1758.
- Neale M.A., Hobson R.N., Price J.S., Bruce D.M. Effectiveness of Three Types of Grain Separator for Crop Matter Harvested with a Stripping Header. *Biosystems Engineering*. 2003. N84. 177-191.

- Kaliniewicz Z., Żuk Z., Krzysiak Z. Influence of Steel Plate Roughness on the Frictional Properties of Cereal Kernels. *Sustainability*. 2018. N10. 1003.
- Decker E.A., Rose D.J., Stewart D. Processing of Oats and the Impact of Processing Operations on Nutrition and Health Benefits. *British Journal of Nutrition*. 2014. N112. 58-64.
- Jadwisieńczyk K., Kaliniewicz Z. Analysis of the mustard seeds cleaning process. Part 1. Physical properties of seeds. *Inżynieria Rolnicza*. 2011. N9(134). 57-64.
- Kram B.B., Woliński J., Wolińska A. Comparative studies on geometric traits of nutlets with and without seed cover in Red corolla buckwheat. *Acta Agrophysica*. 2007. N9(3). 657-664.
- Związki między agrofizyka a genetyka i hodowla roślin zbo-



zowych oraz strączkowych [Relations between agrophysics and genetics and breeding of cereals and legumes]. *Acta Agrophysica*. 2009. Iss. 174. 1-55.

9. Rybiński W., Szot B., Rusinek R., Bocianowski J. Estimation of geometric and mechanical properties of seeds of Polish cultivars and lines representing selected species of pulse crops. *International Agrophysics*. 2009. N23(3). 257-267.

10. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Кынев Н.Г. ВИМ – основатель производства селекционной техники в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2008. Т. 2. N4. С. 9-11.

11. Измайлов А.Ю., Лачуга Ю.Ф., Зюлин А.Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурсо- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. Т. 4. N1. С. 2-8.

12. Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А. Разработка и исследования воздушно-решетной зерноочистительной машины МЗУ-20Д // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N2. С. 59-66.

13. Бурков А.И. Тенденции развития воздушно-решетных зерноочистительных машин на современном этапе // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2018. N2(63). С. 4-15.

14. Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А. Фракционная технология и устройства послеуборочной обработ-

ки и переработки зерна плющением // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 16-21.

15. Анишкин В.И., Некипелов Ю.Ф. Механизация опытных работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве зерновых и зернобобовых культур. М.: ВИМ. 2004. 200 с.

16. Moskovsky M.N., Chaava M.M., Chumak I.V. Development of a structural-functional model of a single production process obtaining seed material in farms. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. N6. 2157-2165.

17. Werby R.A. Performance Cleaning Unit for Clover Grains Affecting Some Physical and Mechanical Properties. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 2010. N27(1). 266-283.

18. Doshi J.S., Patel V.B., Patel J.B., Patel J.A. Quantification of Quality Improvement in Wheat Seed Processing. *Journal of Agricultural Engineering*. 2013. Vol. 50. N4. 83-86.

19. Елизаров В.П., Антышев Н.М., Бейлис В.М., Шевцов В.Г. Исходные требования на технологические операции в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. Т. 5. N1. С. 11-14.

20. Елизаров В.П., Антышев Н.М., Бейлис В.М. и др. Исходные требования на базовые машинные технологические операции в растениеводстве. М.: Росинформаготех. 2005. 272 с.

REFERENCES:

1. Jokić G., Prole S., Butaš D., Sedlar A., Bugarin R., Turan J. Analysis the Parameters of Quality Sunflower Hybrid Seed after Processing on Fine Cleaner, Trijer Machine and Gravity Separator. *Savremena poljoprivredna tehnika*. 2016. N42. 25-38 (In English).

2. Krzysiak Z., Samociuk W., Skic A., Bartnik G., Zarajczyk J., Szmigielski M., Dzik D., Wierzbicki S., Krzywonos L. Effect of Sieve Drum Inclination Angle on Wheat Grain Cleaning in a Novel Rotary Cleaning Device. *Transactions of the ASABE*. 2017. N60. 1751-1758 (In English).

3. Neale M.A., Hobson R.N., Price J.S., Bruce D.M. Effectiveness of Three Types of Grain Separator for Crop Matter Harvested with a Stripping Header. *Biosystems Engineering*. 2003. N84. 177-191 (In English).

4. Kaliniewicz Z., Żuk Z., Krzysiak Z. Influence of Steel Plate Roughness on the Frictional Properties of Cereal Kernels. *Sustainability*. 2018. N10. 1003 (In English).

5. Decker E.A., Rose D.J., Stewart D. Processing of Oats and the Impact of Processing Operations on Nutrition and Health Benefits. *British Journal of Nutrition*. 2014. N112. 58-64 (In English).

6. Jadwisieńczak K., Kaliniewicz Z. Analysis of the mustard seeds cleaning process. Part I. Physical properties of seeds. *Inżynieria Rolnicza*. 2011. N9(134). 57-64 (In English).

7. Kram B.B., Woliński J., Wolińska A. Comparative studies on geometric traits of nutlets with and without seed cover in Red corolla buckwheat. *Acta Agrophysica*. 2007. N9(3). 657-664 (In English).

8. Rybiński W., Szot B. Związki między agrofizyka a genetyka i hodowla roslin zbozowych oraz strączkowych [Relations between agrophysics and genetics and breeding of cereals and legumes]. *Acta Agrophysica*. 2009. Iss. 174. 1-55 (In Polish).

9. Rybiński W., Szot B., Rusinek R., Bocianowski J. Estimation of geometric and mechanical properties of seeds of Polish cultivars and lines representing selected species of pulse crops. *International Agrophysics*. 2009. N23(3). 257-267 (In English).

10. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Kynev N.G. VIM – osnovatel' proizvodstva selektsionnoy tekhniki v Rossii [VIM is the founder of the production of breeding equipment in Russia]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2008. Vol. 2. N4. 9-11 (In Russian).

11. Izmaylov A.Yu., Lachuga Yu.F., Zyulin A.N. Razrabotka i vnedrenie vysokoeffektivnykh, resurso- i energosberegayushchikh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv posleuborochnoy obrabotki zerna i podgotovki semyan [Development and implementation of highly efficient, resource- and energy-saving technologies and technical means of post-harvest grain processing and seed preparation]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2009. Vol. 4. N1. 2-8 (In Russian).

12. Savinykh P.A., Syhugov Yu.V., Kazakov V.A. Razrabotka i issledovaniya vozdušno-reshetnoy zernoochistitel'noy mashiny MZU-20D [Development and research of air-sieve grain cleaning machine MZU-20D]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 59-66 (In Russian).

13. Burkov A.I. Tendentsii razvitiya vozdušno-reshetnykh zernoochistitel'nykh mashin na sovremennom etape [Trends in

the development of air-sieve grain cleaning machines at the present stage]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2018. N2(63). 4-15 (In Russian).

14. Savinykh P.A., Sychugov Yu.V., Kazakov V.A. Fraktsionnaya tekhnologiya i ustroystva posleuborochnoy obrabotki i pererabotki zerna plyushcheniem [Fractional technology and devices for post-harvest processing and processing of grain by crushing]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N4. 16-21 (In Russian).

15. Aniskin V.I., Nekipelov Yu.F. Mekhanizatsiya opytnykh rabot v selektsii, sortoispytanii i pervichnom semenovodstve zernovykh i zernobobovykh kul'tur [Mechanization of experimental work in breeding, variety testing and primary seed production of grain and leguminous crops]. Moscow: VIM. 2004. 200 (In Russian).

16. Moskovsky M.N., Chaava M.M., Chumak I.V. Development of a structural-functional model of a single production process obtaining seed material in farms. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. N6. 2157-2165 (In English).

17. Werby R.A. Performance Cleaning Unit for Clover Grains Affecting Some Physical and Mechanical Properties. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 2010. N27(1). 266-283 (In English).

18. Doshi J.S., Patel V.B., Patel J.B., Patel J.A. Quantification of Quality Improvement in Wheat Seed Processing. *Journal of Agricultural Engineering*. 2013. Vol. 50. N4. 83-86 (In English).

19. Elizarov V.P., Antyshev N.M., Beylis V.M., Shevtsov V.G. Iskhodnye trebovaniya na tekhnologicheskie operatsii v rastenievodstve [Initial requirements for technological operations in crop production]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2011. Vol. 8. N1. 11-14 (In Russian).

20. Elizarov V.P., Antyshev N.M., Beylis V.M., et al. Iskhodnye trebovaniya na bazovye mashinnye tekhnologicheskie operatsii v rastenievodstve [Initial requirements for basic machine technological operations in crop production]. Moscow: Rosinformagotekh. 2005. 272 (In Russian).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 11.09.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 11.09.2020

Статья принята к публикации 20.11.2020
The paper was accepted
for publication on 20.11.2020

Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом

Антон Владиславович Бижаев,

кандидат технических наук,

старший преподаватель, e-mail: a.bizhaev@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что снизить токсичность отработанных газов и повысить эффективность работы тракторов можно с помощью электроприводного силового агрегата для реализации тягового усилия. Коэффициент полезного действия современных электродвигателей достигает в пике 96 процентов, по сравнению с 45 у дизельного двигателя. Подчеркнули, что этот параметр для современных источников электрической энергии равен 85-90 процентам, что открывает возможности для реализации электрической тяги на тракторах. (*Цель исследования*) Представить общую концепцию электроприводного силового агрегата для трактора малого тягового класса и оценить его параметры в первом приближении. (*Материалы и методы*) Для электропривода трактора в качестве источника электрической энергии выбрали литий-ионные аккумуляторы, показывающие лучшие характеристики энергоемкости – 432-864 килоджоуля на килограмм при удельной стоимости 4200-17400 рублей на килограмм. В ходе анализа типов привода силового агрегата рассмотрели дизельный двигатель Д-120 мощностью 20 киловатт, электродвигатель постоянного тока и асинхронный двигатель с аналогичными параметрами. В качестве основы для расчета взяли трактор ВТЗ-2032 с номинальным тяговым усилием 6000 ньютон при работе на стерне. (*Результаты и обсуждение*) Выявили лучшие показатели электропривода вследствие более широкого нагрузочного диапазона характеристик на передачах при снижении удельных затрат на киловатт-час с 24 до 15-16 рублей. (*Выводы*) Определили наиболее эффективный двигатель – электрический бесщеточный постоянного тока. Рассчитали, что удельная стоимость его энергии в 1,5-1,8 раза меньше, чем у дизельного двигателя, и составляет 15-27 рублей на киловатт-час при максимальной эффективности 95 процентов. Установили, что оптимальным решением для питания электропривода будут литий-ионные аккумуляторы. Они отличаются высокой удельной энергоемкостью – 432-864 килоджоуля на килограмм – и низкой ценой за единицу энергии, составляющей 5-45 рублей за килоджоуль.

Ключевые слова: электротрактор, электротяга, электрическая трансмиссия, электромобиль, тяговый расчет трактора, тракторный двигатель.

■ Для цитирования: Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 33-42. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.

Research of Tractor Power Unit with Electric Drive Parameters

Anton V. Bizhaev,

Ph.D.(Eng.), senior lecturer,

e-mail: a.bizhaev@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The author showed that it was possible to reduce the exhaust gases toxicity and increase tractors efficiency using an electric power unit to implement traction. The efficiency of modern electric motors was at its peak of 96 percent, compared to 45 for a diesel engine. He emphasized that this parameter for modern sources of electrical energy was 85-90 percent, which opened up opportunities for the implementation of an electric tractor. (*Research purpose*) To present the general concept of an electric drive power unit for a tractor of a small traction class and to evaluate its parameters as a first approximation. (*Materials and methods*) For the tractor's electric drive lithium-ion batteries were chosen as a source of electrical energy, showing the best characteristics of energy intensity – 432-864 kilojoule per kilogram with a unit cost of 4200-17400 rubles per kilogram. During the analyses of the power unit drive types, a D-120 diesel engine with a power of 20 kilowatt, a DC electric motor and an asynchronous motor with similar parameters were studied. The VTZ-2032 tractor with a nominal tractive effort of 600 Newtons when working on stubble was taken as the basis for the calculation. (*Results and discussion*) The author determined the best indicators of the electric drive

by the power characteristics fullness in the gears with a decrease in unit costs per kWh from 24 to 15-16 rubles. (*Conclusions*) The most efficient engine was determined – a brushless DC electric motor. The author calculated that the specific cost of its energy was 1.5-1.8 times less than that of a diesel engine, and amounted to 15-27 rubles per kilowatt-hour with a maximum efficiency of 95 percent. It was found that lithium-ion batteries would be the optimal solution for powering the electric drive. They were distinguished by a high specific energy consumption – 432-864 kilojoule per kilogram – and a low price per energy unit, amounting to 5-45 rubles per kilojoule.

Keywords: electric tractor, electric traction, electric transmission, electric vehicle, traction calculation of a tractor, tractor engine.

■ For citation: Bizhaev A.V. Issledovanie parametrov traktora s elektroprivodnym silovym agregatom [Research of tractor power unit with electric drive parameters]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 33-42 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.

Производители тракторной техники решают сразу несколько задач: повышение тягового КПД трактора, уменьшение токсичных выбросов отработанных газов двигателя в атмосферу, снижение давления на почву, а также улучшение потребительских свойств трактора, таких как цена, эргономичность, шумность, вибрация и т.д. Для тепличных хозяйств и других крытых помещений в АПК основной проблемой стали выбросы токсичных компонентов в среду помещения. Это приводит к различным заболеваниям живых организмов, а предприятие снижает темпы производства.

Существует большое количество разработок, позволяющих снизить содержание токсичных компонентов в отработанных газах: использование нейтрализаторов, совершенствование процесса сгорания топлива в двигателе, применение различных видов альтернативного топлива и т.д. [1, 2].

Текущий технологический уровень производства способствует разработке сложных электронных компонентов на микроуровне, совершенствовать автоматизированные системы управления. Данная концепция позволяет внедрить электроприводные технологии для реализации тяги трактора. Актуальной задачей остается и совершенствование тракторов с электрической тягой российского производства [3, 4].

Тракторы с электроприводом в качестве механического источника энергии для силового агрегата по современной терминологии стали называть электротракторами. Источником энергии в них может быть как аккумуляторная батарея (АКБ), так и ДВС с сочлененным генератором, то есть гибридная машина. К подобным тракторам можно отнести уже существующие, такие как *Edison model 1* на базе ХТЗ-2511 или электротрактор, созданный компанией *MOBEL* на базе модели Беларус-920. Из зарубежных фирм можно назвать *John Deere* (электротрактор *SESAM*) и *Fendt (e100 Vario)*. Переход на электрическую тягу позволяет осуществить более гибкое управление системой, что открывает возможность для автономного управления трактором. Данное направление находится на раннем этапе развития, поэтому большого серийного производства таких тракторов не существует. Многие тракторы на электрической тяге пред-

ставлены опытными образцами либо произведены мелкими сериями.

Для реализации проекта электротрактора необходимо разработать не только требования к системам этой машины, но и концепцию в целом. Поставленные задачи частично решены на базе уже созданных тракторов с электротягой. Однако эта информация не разглашается крупными заводами, а имеющаяся в открытом доступе служит только точкой опоры для дальнейших исследований по данному вопросу.

Если рассматривать возможность приобретения электротрактора для малого хозяйства, то возникает проблема с высокой удельной стоимостью трактора по отношению к его весу. Это связано в первую очередь с аккумуляторными батареями, необходимыми для обеспечения электропривода энергией. Второе место по цене занимает сама система электропривода и управляющая электроника. Например, цена трактора *Edison model 1* на базе ХТЗ-2511 составляет около 20 тыс. долл., что пока не оправдывает эффективности его использования. Поэтому актуальным остается снижение цены на подобную технику.

Несмотря высокую цену трактора, эффективность использования электропривода по энергозатратам сравнимо высокая. Известно, что КПД современных электродвигателей в пике составляет 90-96%, в зависимости от параметров. Это большое значение по сравнению с КПД дизельных двигателей, значения которых лежат обычно в области 40-45% (Красовский А.Б. 2015, Ютт В.Е. 2016). Однако даже при более низком КПД дизельного двигателя его цена тоже остается ниже, чем для электроприводных систем. Кроме прочего, силовой агрегат с ДВС в целом занимает меньше объема по сравнению с аккумуляторной системой, что накладывает дополнительные сложности размещения электроприводных систем на борту.

Для тепличных или фермерских помещений обычно используют тракторы малых тяговых классов с небольшой мощностью, которые могут использоваться на кормораздаче или прочих сельскохозяйственных операциях. Необходимо учитывать, что габариты таких тракторов малы, а это осложняет расположение в них дополнительных систем, в том числе и устройств электроприводной системы. Кроме того, механиче-

ская трансмиссия на малых машинах имеет больший КПД по сравнению с электрической. Установка электрической трансмиссии на тракторах таких габаритов и мощностей не оправдана. Электрическую трансмиссию обычно устанавливают на мобильных машинах большой мощности и габаритов, в этом случае использование механической трансмиссии не рационально ввиду более низкого КПД [5].

С учетом характеристик электродвигателей при использовании современных электронных автоматизированных систем управления нет необходимости в большом количестве передач на мобильных машинах, а в некоторых случаях и в коробке передач в принципе. Это обеспечивается благодаря широкому диапазону характеристик электроприводных систем и гибкости электронного управления.

Цель исследования – представить общую концепцию электроприводного силового агрегата для трактора малого тягового класса и оценить его параметры в первом приближении.

Для этого предстоит решить следующие задачи:

- обосновать выбор типа привода силового агрегата трактора;
- оценить характеристики источников электрической энергии для питания электроприводной системы;
- смоделировать тяговые параметры трактора с

различным типом привода силового агрегата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. С целью решения проблем, возникающих в ходе анализа электротрактора, необходимо компромиссное решение, которое будет удовлетворять техническим требованиям, функциональному назначению и условиям существования на рынке. Кроме выполнения основных задач такой трактор должен иметь оптимальную характеристику взаимосвязи между эффективностью и производительностью, проблемы которой до сих пор актуальны [6].

Первоначально следует определиться со схемой компоновки силового агрегата трактора, который предположительно должен выполнять различные виды работ в помещениях с ограниченной вентиляцией. Известны различные компоновки подобных систем, начиная с расположения двигателя внутреннего сгорания в качестве источника механической энергии и заканчивая его замещением электродвигателем с сопутствующими системами. Если в силовом агрегате присутствуют несколько двигателей с различным типом потребляемой энергии, то такая машина называется гибридной.

Гибридный вариант трактора – промежуточное звено между классическим типом с ДВС и электротрактором в обиходном представлении. Его характеристики могут значительно варьироваться. Рассматри-

Таблица 1

Table 1

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАКТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ*
BASIC PARAMETERS OF TRACTORS WITH DIFFERENT POWER UNITS TYPES*

Параметры Parameters	Типы тракторов / Tractor types		
	с дизельным ДВС with diesel internal combustion engine	гибридный hybrid	электротрактор с АКБ** electric tractor with accumulator battery
КПД Efficiency	1	2	3
Токсичность Toxicity	1	2	3
Цена трактора Tractor price	3	2	1
Габариты системы System dimensions	3	2	1
Сложность конструкции Construction complexity	3	1	2
Рекуперация энергии Energy recovery	1	3	3
Шумность Noisiness	1	2	3
Вибрации Vibrations	1	2	3
Скорость заправки/зарядки Refueling / charging speed	3	3	1
Инфраструктура обслуживания Service infrastructure	3	2	1
Требования к обслуживанию Service requirements	3	2	2

*Оценку провели ранжированием: 1 – негативный уровень показателя; 2 – показатель со средним значением; 3 – более благоприятное значение

* The evaluation was performed by ranking: 1 – negative level of the indicator; 2 – an indicator with an average value; 3 – a more favorable value

**АКБ – аккумуляторная батарея

вая гибридный трактор в качестве объекта исследования, можно выделить определенные преимущества и недостатки по сравнению с тракторами, имеющими дизельный двигатель или электроприводную систему (табл. 1) [5, 7-9].

Гибридные системы в мобильных машинах обычно используют в тех случаях, где имеет место неустановившееся движение с целью рекуперации мощности для ее последующей реализации [10]. Большую долю времени на таких режимах работают автомобили в городском цикле движения. При выполнении трактором агротехнических операций режимы частых торможений и разгонов не свойственны, и основные динамические перепады при тягово-приводных работах обеспечиваются вследствие колебаний нагрузки. Подобный гибридный трактор был создан на базе трактора ВТЗ-2048А мощностью 33 кВт в Российском государственном агроинженерном университете – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева в 2008 г. по заказу Министерства сельского хозяйства РФ. Принцип его работы заключается в быстром накоплении и отдаче энергии при колебаниях нагрузки на двигатель. В данном случае в роли накопителей энергии выступали ионисторы или суперконденсаторы, цена которых на единицу энергии гораздо выше перспективных аккумуляторных источников типа литий-ионных батарей [4, 11].

Для работы трактора в теплицах и других помещениях с ограниченной вентиляцией компенсация колебаний нагрузки считается не таким важным свойством как отсутствие токсичных выбросов. Особенность трактора с гибридным силовым агрегатом заключается в его способности работать не только в режимах компенсации энергии за счет электродвигате-

ля и ее рекуперации, а еще и режимов, при которых обеспечивается работа трактора только лишь с помощью ДВС, либо только за счет временного обеспечения электрической тяги от аккумуляторной батареи (АКБ). Поэтому снижения токсичности отработанных газов можно добиться, перемещаясь внутри помещения только с помощью электротяги с питанием от АКБ определенной емкости, а за его пределами – на приводе от дизельного двигателя. В целях питания электропривода нужны элементы для временного хранения заряда, которые будут отвечать требованиям к функциям трактора. Элементы временного хранения заряда как источники питания для электропривода различаются по характеристикам и цене (табл. 2). В данном случае необходимо выбрать оптимальный вариант.

Современные литий-ионные АКБ обладают большим запасом энергии, чем суперконденсаторы, и дешевле по отношению к энергоемкости. В свою очередь, ионисторы занимают промежуточное положение между аккумуляторами и конденсаторами по физическому принципу действия [12]. Литий-ионные аккумуляторы быстрее заряжаются и выдают большие токи, но для длительных режимов работ это свойство не первостепенно. Кроме того, единица энергии ионистора обходится дороже. Электролитические конденсаторы обладают большим ресурсом, широким диапазоном рабочих температур и низкой ценой за единицу веса, но сравнимо низкой энергоемкостью, что отрицательно сказывается при их выборе как источников питания для электропривода.

В качестве наиболее перспективных элементов питания, имеющих высокую энергоемкость и другие приемлемые параметры, можно рассматривать ли-

Таблица 2
Table 2

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА
MAIN CHARACTERISTICS OF TEMPORARY CHARGE STORAGE ELEMENTS

Параметры Parameters	Электролитические конденсаторы Electrolytic capacitors	Ионисторы (суперконденсаторы) Supercapacitors	Литий-ионные АКБ (различные типы) Lithium-ion batteries (various types)
Энергоемкость, Вт·ч/кг Power consumption, W·h/kg	0,05-0,2	4 -32	120-280
Энергоемкость, кДж/кг Energy intensity, kJ/kg	0,18-0,72	14,4-115,2	432-864
Цена, руб./кДж Price, RUB/kJ	650-5000	130-2300	5-45
Цена, руб./кг Price, RUB/kg	150-3600	15 000-32 000	4200-17 400
Количество полных циклов заряда/разряда до потери 20% емкости Number of full charge / discharge cycles until 20% capacity lost	1 000 000-5 000 000	500 000-1 000 000	600-15 000
Диапазон рабочих температур, °C Operating temperature range, °C	-50...+125	-40...+75	-20...+65
Среднее время зарядки, с Average charging time, s	0,1-2,0	5-30	900-1800

тий-ионные аккумуляторы. Они способны переносить до 15000 циклов зарядки-разрядки до потери 20% емкости, а их КПД может достигать 95% [11, 13]. Рассматриваемые АКБ способны заряжаться от энергии дизельного двигателя при преобразовании генератором, затем отдавать ее при необходимости в систему электропривода. Нужно учитывать, что литий-ионные АКБ при отдаче больших токов сильно нагреваются, поэтому для поддержания рабочих характеристик им необходима система охлаждения [14].

После выбора источника хранения электрического заряда как элемента компоновки необходимо оценить тяговые и эффективные параметры трактора с электроприводом силового агрегата, а также сравнить их с базовой системой. В качестве основы для расчета этих параметров нужно исходить из характеристик двигателя. В зависимости от типа двигателя, приводящего силовую установку, параметры тяги и эффективности работы будут отличаться. В тракторном и автомобильном производстве обычно применяются 3 типа двигателей [15]:

- дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС);
- электрический двигатель постоянного тока (ДПТ);
- электрический асинхронный двигатель (АД).

Для рассмотрения тяговых и экономических показателей тракторов с применением различных типов двигателей необходимо задать начальные параметры. За базу для дальнейшего расчетного исследования можно принять трактор ВТЗ-2032 (Агромаш-30ТК) с дизельным двигателем Д-120, номинальной мощностью 18 кВт, при частоте вращения $n_n = 1800 \text{ мин}^{-1}$. При расчете параметров, рассматривают идентичные условия эксплуатации трактора, приближенные к реальным (табл. 3).

Реальный трактор оборудован механической трансмиссией с 6 базовыми передачами. Для теоретического анализа можно условиться этой компоновкой с применением различных типов двигателей. В основе тягового расчета лежит общепринятая методика [16]. Исходя из взаимосвязи параметров с двигателем, можно определить мощность на крюке:

$$N_{кр} = \frac{(G_{тр}\varphi_{кр} + G_{тр}f_k)V_t}{\eta_{общ}(1-\delta)} = \frac{(P_{кр} + P_f)V_t}{\eta_{общ}(1-\delta)}, \quad (1)$$

где $N_{кр}$ – мощность на крюке, кВт;

$P_{кр}$ – усилие трактора на крюке, кН;

P_f – сила сопротивления качению колес трактора, кН;

V_t – теоретическая скорость трактора, м/с;

$\eta_{общ}$ – суммарный КПД всех элементов, участвующих в образовании и передаче мощности, определяется как $\eta_{общ} = \eta_{тр} \cdot \eta_{зар} \cdot \eta_{раз} \cdot \eta_{пр}$;

δ – буксование.

Из методики тягового расчета трактора известно, что его характеристики зависят от параметров и режимов работы двигателя, которые обычно подбира-

Исходные данные для тягового расчета параметров трактора	
INITIAL DATA FOR TRACTION CALCULATION OF TRACTOR PARAMETERS	
Параметры Parameters	Значение Value
$\varphi_{кр}$, коэффициент использования сцепного веса трактора coefficient of using the tractor coupling weight	0,4
f_k , коэффициент сопротивления качению колес машины coefficient of rolling resistance of the machine wheels	0,08
r_k , кинематический радиус колеса трактора, м kinematic radius of the tractor wheel, m	0,8
$G_{тр}$, полная масса трактора, кг total tractor weight, kg	2100
V_{min} , минимальная скорость машины, км/ч minimum vehicle speed, km/h	4
V_{max} , максимальная скорость машины, км/ч maximum vehicle speed, km/h	24
$g_{ен}$, удельный эффективный расход топлива при номинальной мощности, г/кВт·ч specific effective fuel consumption at rated power, g/kWh	300
$i_{тр}$, количество передач трансмиссии number of transmission gears	6
$\eta_{тр}$, КПД трансмиссии transmission efficiency	0,9
$\eta_{зар}$, КПД зарядки АКБ battery charging efficiency	0,9
$\eta_{раз}$, КПД разрядки АКБ battery discharge efficiency	0,9
$\eta_{пр}$, КПД полупроводниковых силовых преобразователей efficiency of semiconductor power converters	0,85
C_t , условная цена на 1 литр дизельного топлива, руб./л conditional price for 1 liter of diesel fuel, rubles/l	45
$C_{э}$, условная тарифная ставка за 1 кВт·ч электрической энергии, руб./кВт·ч conventional tariff rate for 1 kWh of electric energy, rubles/kWh	6
Фон опорной поверхности для определения показателя буксования Support surface background for determining slip rate	Стерня Stubble

ются путем аппроксимации или других математических методов, описывающих реальную функцию по известным методикам для АД [17,18], ДПТ [19, 20] и ДВС [21, 22], встречающимся и в других исследованиях. В целях упрощения оценки экономической эффективности трактора был введен новый показатель $g_{ц}$ – удельная энергостойкость, руб./кВт·ч. Он показывает, затраты в рублях на реализацию 1 кВт мощности в течение 1 ч, и зависит от цены на топливо или электроэнергию. Этот показатель удобен для сравнения расходов на реализацию мощности трактора с двигателями, различными по типу потребляемой энергии. Для трактора с приводом силовой установки от ДВС он выражается зависимостью:

$$g_{\text{ц}} = \frac{C_{\text{т}} \cdot G_{\text{т}}}{\rho \cdot N_{\text{кр}}} = \frac{C_{\text{т}} \cdot g_{\text{кр}}}{\rho}, \quad (2)$$

где $g_{\text{ц}}$ – удельная энергостоймость, руб./кВт·ч;
 $G_{\text{т}}$ – часовой расход топлива, кг/ч;
 ρ – плотность топлива, кг/л;
 $C_{\text{т}}$ – цена за литр топлива, руб./л,
 $g_{\text{кр}}$ – удельный эффективный расход топлива для трактора, кг/кВт·ч.

Для трактора с электроприводным силовым агрегатом и питанием от аккумулятора или другого накопителя электрической энергии удельную энергостоймость определяют другим способом:

$$g_{\text{ц}} = C_{\text{э}} \frac{P_{\text{е}}}{N_{\text{кр}}},$$

где $C_{\text{э}}$ – тарифная ставка за электроэнергию, руб./кВт·ч;
 $P_{\text{е}}$ – электрическая мощность, подведенная к электродвигателю, кВт;

$N_{\text{е}}$ – механическая мощность на выходе, кВт.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При рассмотрении источника энергии для электропривода в расчетах использовали параметры литий-ионных аккумуляторных батарей. Это объясняется их высокой удельной энергоемкостью – 432-864 кДж/кг, то есть больше, чем у ионисторов (в 7,5-30 раз) и у конденсаторов (в 1200-2400 раз), а также низкой ценой за единицу энергии, составляющей 5-45 руб./кДж, что меньше в 25-50 раз по сравнению с ионисторами и в 100-130 раз – с конденсаторами по средним значениям. Мощность, потребляемая электроприводом, обуславливает их вес, а также характеристику КПД при разряде. Рассмотрим тяговую характеристику трактора ВТЗ-2032 на 6-ступенчатой коробке передач, в основе которой лежит внешняя скоростная характеристика дизель-

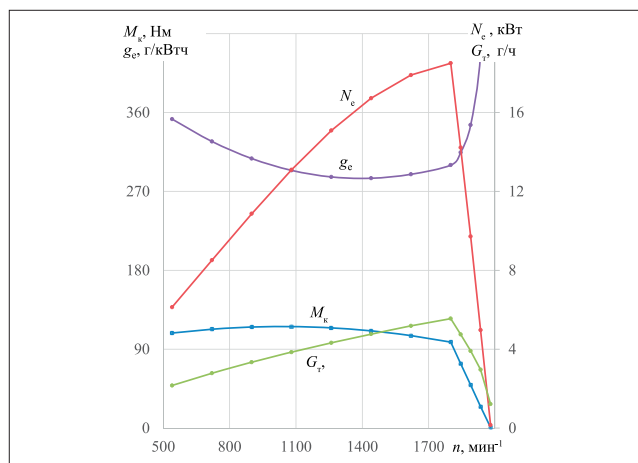


Рис. 1. Характеристики дизельного двигателя внутреннего сгорания: $M_{\text{к}}$ – крутящий момент; $N_{\text{е}}$ – эффективная мощность; $G_{\text{т}}$ – часовой расход топлива; $g_{\text{е}}$ – удельный эффективный расход топлива

Fig. 1. Characteristics of a diesel internal combustion engine: $M_{\text{к}}$ – torque; $N_{\text{е}}$ – effective power; $G_{\text{т}}$ – hourly fuel consumption; $g_{\text{е}}$ – specific effective fuel consumption

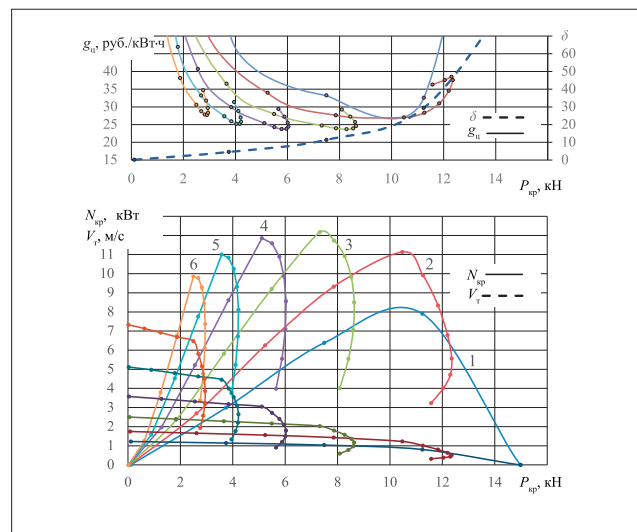


Рис. 2. Тяговые характеристики трактора ВТЗ-2032 при использовании дизельного двигателя внутреннего сгорания:

$N_{\text{кр}}$ – мощность на крюке; $V_{\text{т}}$ – теоретическая скорость трактора; $g_{\text{ц}}$ – удельная энергостоймость; δ – буксование. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач

Fig. 2. VTZ-2032 tractor traction characteristics when using a diesel internal combustion engine: $N_{\text{кр}}$ – power on the hook; $V_{\text{т}}$ – theoretical tractor speed; $g_{\text{ц}}$ – specific energy consumption; δ – slipping. The numbers 1-6 indicate the serial numbers of transmission

ного двигателя Д-120 (рис. 1).

Можно отметить области недоиспользованной тяговой мощности между кривыми для каждой передачи (рис 2). При этом показано, что удельный ценовой расход энергии в минимуме составляет около 24 руб./кВт·ч.

По тяговой характеристике трактора с электродвигателем постоянного тока (ДПТ) видно, что запол-

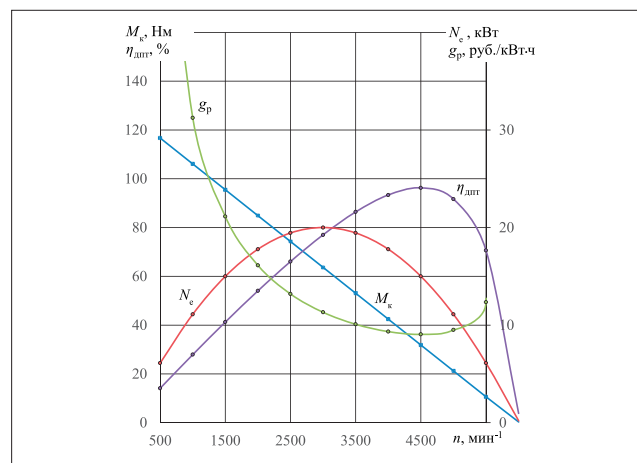


Рис. 3. Характеристики электрического двигателя постоянного тока: $M_{\text{к}}$ – крутящий момент; $N_{\text{е}}$ – эффективная мощность; $\eta_{\text{дпт}}$ – КПД двигателя; $g_{\text{р}}$ – удельный ценовой расход энергии

Fig.3. DC Electric Motor Characteristics: $M_{\text{к}}$ – torque; $N_{\text{е}}$ – effective power; $\eta_{\text{дпт}}$ – engine efficiency; $g_{\text{р}}$ – specific price energy consumption

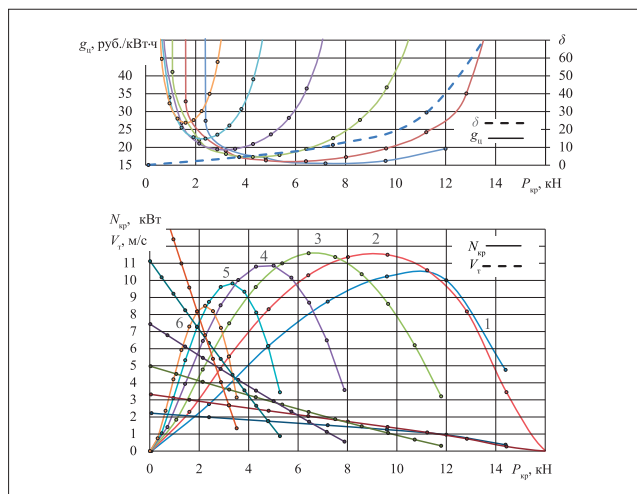


Рис. 4. Тяговые характеристики трактора ВТЗ-2032 при использовании электродвигателя постоянного тока: $N_{кр}$ – мощность на крюке; V_t – теоретическая скорость трактора; $g_{ц}$ – удельная энергостоймость; δ – буксование. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач

Fig. 4. VTZ-2032 tractor traction characteristics when using a DC electric motor: $N_{кр}$ – power on the hook; V_t – theoretical tractor speed; $g_{ц}$ – specific energy consumption; δ – slipping. The numbers 1-6 indicate the serial numbers of transmission

ненность зон недоиспользованной мощности будет выше, чем с использованием ДВС, причем настолько, что возможно отказаться от нескольких передач, так как их наличие теряет смысл из-за перекрытия зон характеристиками других передач (рис. 3).

В случае использования дизельных двигателей постоянной мощности (ДПМ), в которых запас крутящего момента составляет около 30-40%, можно добиться близких показателей. Однако негативный эффект будет заключаться в возможной длительной работе дизеля на коррекционной ветви, что приведет в первую очередь к повышению выбросов сажи при эквивалентной мощности.

ДПТ обеспечивает удобный нагрузочный режим трактора, повышая крутящий момент при увеличении внешнего момента сопротивления (рис. 4). При этом его КПД остается в высоком диапазоне на большом интервале по частоте вращения. Минимальное значение $g_{ц}$ составляет 15 руб./кВт·ч, что улучшает показатель на 30-40% по сравнению с дизельным ДВС.

Механическая характеристика асинхронного двигателя при эквивалентной мощности будет отличаться от ДПТ более узким диапазоном работы (рис. 5). Таким образом, тяговая характеристика трактора больше схожа с используемым дизельным ДВС (рис. 6). Нужно учитывать, что асинхронной машиной можно управлять более гибко – путем изменения частоты тока и величины напряжения, что позволит расширить ее диапазон работы. Такое управление делает ее более универсальной, хотя и повышает трудозатраты.

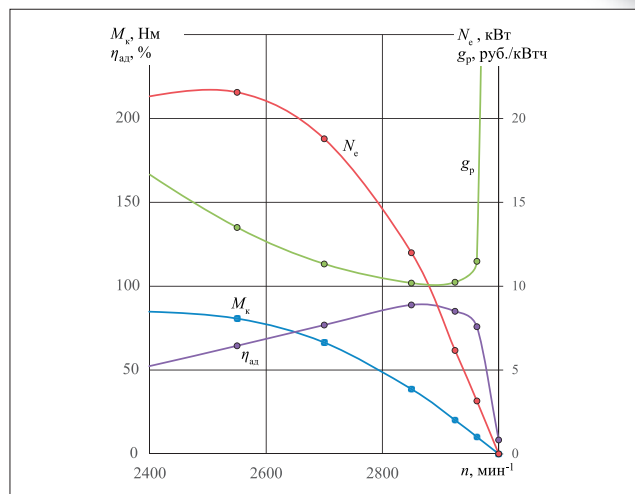


Рис. 5. Характеристики асинхронного двигателя: M_k – крутящий момент; N_e – эффективная мощность; $\eta_{ад}$ – КПД двигателя; g_p – удельный ценной расход энергии

Fig. 5. Asynchronous motor characteristics: M_k – torque; N_e – effective power; $\eta_{ад}$ – engine efficiency; g_p – specific price energy consumption

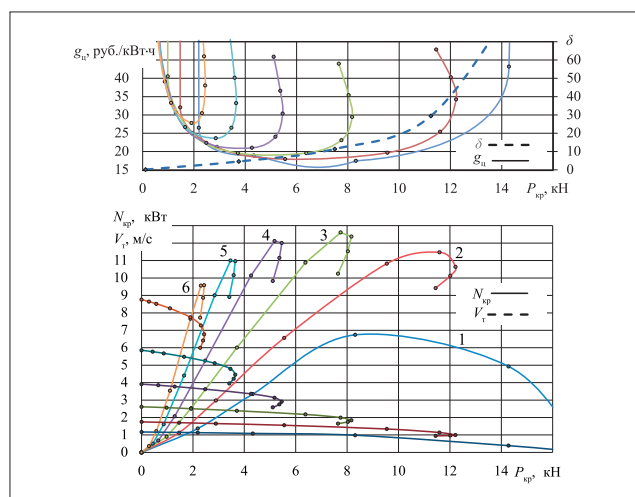


Рис. 6. Тяговые характеристики трактора ВТЗ-2032 при использовании асинхронного электродвигателя: $N_{кр}$ – мощность на крюке; V_t – теоретическая скорость трактора, м/с; $g_{ц}$ – удельная энергостоймость; δ – буксование. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач

Fig. 6. VTZ-2032 tractor traction characteristics when using an asynchronous electric motor: $N_{кр}$ – power on the hook; V_t – theoretical speed of the tractor, m/s; $g_{ц}$ – specific energy consumption; δ – slipping. The numbers 1-6 indicate the serial numbers of transmission

Минимальный удельный ценной расход энергии $g_{ц}$ при использовании асинхронной машины составляет 16 руб./кВт·ч, что сопоставимо с ДПТ. Однако характеристики АД имеют более узкий диапазон, без внедрения управляющих систем.

Кроме системы частотного преобразователя для гибкого управления АД, потребуется и система управления электроприводом в целом – также, как и для

ДПТ, на которую придется основная доля затрат.

Асинхронные машины по сравнению с машинами постоянного тока имеют более низкий КПД. Это связано прежде всего с потерей энергии на образование вращающегося магнитного поля, создающего ЭДС в роторе при физическом процессе, называемого скольжением. Поэтому эффективность таких двигателей не может быть выше вследствие физического принципа работы.

Для ДПТ такой проблемы не существует, поэтому их КПД, который в пике составляет 95%, выше, чем у АД, находящийся в области 89%. Габариты при такой же мощности у АД будут в 1,5-3,0 раза больше. Затруднить выбор двигателей постоянного тока в качестве привода силовой установки трактора может также наличие коллекторно-щеточного узла, обеспечивающего статус данному двигателю контактной машины. Современный технологический уровень позволяет отказаться от коллекторно-щеточного узла ДПТ, заменив его полупроводниковыми электронными компонентами [23]. На ротор устанавливают постоянные магниты, которые приводятся в движение вращающимся магнитным полем статора, управляемого полупроводниковыми элементами [24, 25]. Такие электродвигатели называются вентильными и относятся к частному случаю синхронных машин, при этом имея характеристики, подобные ДПТ [26, 27]. Аналогичные двигатели устанавливают на некоторые электромобили, в том числе *Tesla*, в которых в качестве постоянных магнитов используется ниодимовый сплав, обеспечивающий предельную температуру работы около 250°C. Такие двигатели считаются перспективными и для трактора.

Выводы. Для дизельного двигателя удельные ценовые расходы в максимуме мощности на передачах составляют 23-29 руб./кВт·ч. При использовании ДПТ этот показатель составляет 15-27 руб./кВт·ч. Для асинхронной машины – 16 -24 руб./кВт·ч. При отклонении от пика мощности этот параметр растет при любых типах двигателей из рассматриваемых.

Моделирование тягового расчета показало преимущество электрических двигателей по характеристикам. Прежде всего это связано с заполненностью участков недоиспользованной мощности между ли-

ниями мощности соседних передач, что позволяет снизить их количество.

Выбор типа силового агрегата для трактора сводится в первую очередь к выбору двигателя. Наиболее эффективные варианты – ДПТ и асинхронный, их ценовые энергетические расходы в 1,5-1,8 раза меньше при рассматриваемых параметрах. ДПТ имеет лучшие нагрузочные характеристики, по сравнению с асинхронным электродвигателем, однако при частотном регулировании последнего можно добиться плавности изменения характеристик. Так как кроме частотной системы управления АД нужна еще и система управления электроприводом, это потребует дополнительные затраты при максимальном КПД АД около 89% по сравнению 95% у ДПТ, то более оптимальным в данном случае станет выбор ДПТ вентильного типа.

С точки зрения хранения энергии для двигателя на борту мобильной машины система из дизельного двигателя в сопряжении с генератором наиболее предпочтительна по отношению к энергоемкости и ее удельной стоимости. Поэтому, при работе тракторов малой мощности в закрытых помещениях с целью снижения токсичности ОГ, снижения шумности и вибраций, рационально только временное использование электропривода от источников электрической энергии, выбор базы которых сводится к литий-ионным АКБ. Это объясняется их высокой удельной энергоемкостью 432-864 кДж/кг, то есть больше, чем у ионисторов (в 7,5-30 раз) и у конденсаторов (в 1200-2400 раз), а также низкой ценой за единицу энергии, составляющей 5-45 руб./кДж, что ниже в 25-50 раз по сравнению с ионисторами и в 100-130 раз – с конденсаторами по средним значениям.

По общим оценкам гибридный силовой агрегат из дизельного двигателя и электродвигателя, питаемого от источника электроэнергии небольшой емкости с системой рекуперации и подзарядки от ДВС, перспективен для работы в помещениях с ограниченной вентиляцией воздуха, а также на других бытовых и сельскохозяйственных операциях, включая режимы с отсутствием продолжительных динамических изменений скорости. Этот силовой агрегат можно взять за основу для дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марков В.А., Деянин С.Н., Быковская Л.И., Маркова И.Г. и др. Биогаз – перспективное топливо для дизелей // *Грузовик*. 2018. №5. С. 29-39.
2. Бижаев А.В. Исследование методов добавок воды к топливу в поршневой двигатель внутреннего сгорания // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. Т. 9. №1. С. 16-19.
3. Загинайлов В.И., Андреев С.А. История развития, состояние и перспективы применения электромобильной тех-

ники в полеводстве // *Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2017. №6(82). С.15-22.

4. Иванов С.А., Бобровников Д.Е. Использование накопителей энергии в тягово-транспортных средствах. М.: Триада. 2018. 124 с.

5. Исаков П.П., Иванченко П.Н., Егоров А.Д. Электромех-



ханические трансмиссии гусеничных тракторов. Л.: Машиностроение. 1981. 302 с.

6. Майстренко Н.А., Уваров В.П. Потребительские ориентиры эффективного использования перспективных транспортно-технологических средств // *Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина*. 2016. N1. С. 14-15.

7. Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., and Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006. N55(6). 756-764.

8. Burress T.A., Campbell S.L., Coomer C.L., Ayers C.W. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Oak Ridge National Laboratory. – U.S. Department of Energy Vehicle Technologies. March 2011. 79.

9. Строганов В.И., Козловский В.Н. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: Монография. М.: МАДИ. 2014. 264 с.

10. Иванов А.М., Иванов С.А. Комбинированные энергоустановки с ИКЭ – основа эффективного использования топливно-энергетических ресурсов XXI века // *Электротехника*. 2003. N12. С. 2-6.

11. Скундин А.М. Литий-ионные аккумуляторы: современное состояние, проблемы и перспективы // *Электрохимическая энергетика*. 2011. Т. 1. С. 5-15.

12. Деспотули А., Андреева А. Суперконденсаторы для электроники (часть 1) // *Современная электроника*. 2006. N5. С. 10-14.

13. Tarascon J.-M., Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*. 2011. Vol. 414. 359-367.

14. Ivanov D.A., Velikoretskiy A.A., Nekrasov A.S., Papkin I.A. Lithium-ion batteries with forced air cooling: simulation and laboratory tests. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019. T. 13. N1. 5552-5558.

15. Бижаев А.В. Проблемы выбора типа привода силового агрегата трактора на электрической тяге // *Чтения академика В. Н. Болтинского: Сборник статей*. 2020. С. 247-252.

16. Кутьков Г.М., Соловейчик А.А., Сидоров М. В. Теория

и расчет полноприводного трактора // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. Т. 8. N2. С. 8-14.

17. Якушев А.Я., Назирхонов Т.М., Викулов И.П., Марков К.В. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2019. Т. 16. Вып. 4. С. 592-601.

18. Фаттахов К.М., Фаттахов Р.К. Расчет и построение пусковых характеристик асинхронного двигателя по каталожным данным // *Нефтегазовое дело*. 2012. N3. С. 25-31.

19. Черняк Ю.В., Гатченко В.А., Карашук С.В. Модель тягового привода электровоза постоянного тока с широтно-импульсным регулированием напряжения тяговых электродвигателей // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2018. N1(36). С. 28-29.

20. Шухарев С.А. Моделирование работы двигателя постоянного тока // *Вестник института тяги и подвижного состава*. 2018. N14. С. 7-12.

21. Бижаев А.В., Чумаков В.Л., Путан А.А. Расчетная модель основных параметров рабочего цикла дизеля с использованием различных типов топлив // *Доклады ТСХА: Сборник статей*. 2020. Выпуск 292. Ч. I. С. 244-247.

22. Дерюшев В.В., Виноградова Т.А. Анализ скоростных характеристик современных двигателей. *Мир транспорта и технологических машин*. 2019. N1(64). С. 3-10.

23. Chau K., Chan C., and Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*. 2008. 55(6). 2246-2257.

24. Al-Mashakbeh A.S.O. Proportional integral and derivative control of brushless DC motor. *European Journal of Scientific Research*. 2009. 35(2), 198-203.

25. Hanselman Duane C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. 2003. 392.

26. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. СПб.: КОРОНА-Век. 2016. 336 с.

27. Dolgih A., Martemyanov V., Borikov V. Dependence of the torque-rotor position characteristic from the tape winding current. *Przeglad elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95. N9. 71-75.

REFERENCES

1. Markov B.A., Devyanin C.N., Bykovskaya L.I., Markova I.G. et al. Biogaz – перспективное топливо для дизелей [Biogas is a promising fuel for diesel engines]. *Gruzovik*. 2018. N5. 29-39 (In Russian).

2. Bizhaev A.V. Issledovanie metodov dobavok vody k toplivu v porshnevoy dvigatel' vnutrennego sgoraniya [Investigation of methods for adding water to fuel in a piston internal combustion engine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. Vol. 9. N1. 16-19 (In Russian).

3. Zaginaylov V.I., Andreev S.A. Istoriya razvitiya, sostoyaniye i perspektivy primeneniya elektromobil'noy tekhniki v polevodstve [The history of development, the state and prospects of the use of electromobile equipment in field cultivation]. *Vestnik federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosu-*

darstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina». 2017. N6(82). 15-22 (In Russian).

4. Ivanov S.A., Bobrovnikov D.E. Ispol'zovanie nakopiteley energii v tyagovo-transportnykh sredstvakh [The use of energy storage devices in traction vehicles]. Moscow: Triada. 2018. 124 (In Russian).

5. Isakov P.P., Ivanchenko P.N., Egorov A.D. Elektromekhanicheskie transmissii gusenichnykh traktorov [Electromechanical transmissions of tracked tractors]. Leningrad: Mashinostroyeniye. 1981. 302 (In Russian).

6. Maystrenko N.A., Uvarov V.P. Potrebitel'skie orientiry effektivnogo ispol'zovaniya perspektivnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv [Consumer guidelines for the effective use of promising transport and technological means]. *Vestnik MGAU imeni V.P. Goryachkina*. 2016. N1. 14-15 (In Russian).

7. Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., and Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006. N55(6). 756-1764 (In English).
8. Burrell T.A., Campbell S.L., Coomer C.L., Ayers C.W. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Oak Ridge National Laboratory. – U.S. Department of Energy Vehicle Technologies. March 2011. 79 (In English).
9. Stroganov V.I., Kozlovskiy V.N. Modelirovanie sistem elektromobiley i avtomobiley s kombinirovannoy silovoy ustanovkoy v protsessakh proektirovaniya i proizvodstva: Monografiya. [Modeling of systems of electric vehicles and vehicles with a combined power plant in the design and production processes: Monograph]. Moscow: MADI. 2014. 264 (In Russian).
10. Ivanov A.M., Ivanov S.A. Kombinirovannyye energoustanovki s IKE – osnova effektivnogo ispol'zovaniya toplivno-energeticheskikh resursov XXI veka [Combined power plants with IKE – the basis for the effective use of fuel and energy resources of the XXI century]. *Elektrotehnika*. 2003. N12. 2-6 (In Russian).
11. Skundin A.M. Litiy-ionnyye akkumulyatory: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy [Lithium-ion batteries: current state, problems and prospects]. *Elektrokhimicheskaya energetika*. 2011. Vol. 1. 5-15 (In Russian).
12. Despotuli A., Andreeva A. Superkondensatory dlya elektroniki (chast' I) [Supercapacitors for electronics (part I)]. *Sovremennaya elektronika*. 2006. N5. 10-14 (In Russian).
13. Tarascon J.-M., Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*. 2011. Vol. 414. 359-367 (In English).
14. Ivanov D.A., Velikoretskiy A.A., Nekrasov A.S., Papkin I.A. Lithium-ion batteries with forced air cooling: simulation and laboratory tests. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019. Vol. 13. N1. 5552-5558 (In English).
15. Bizhaev A.V. Problemy vybora tipa privoda silovogo agregata traktora na elektricheskoy tyage [Problems of choosing the tractor power unit drive type on electric traction]. *Chleniya akademika V. N. Boltinskogo: Sbornik statey*. 2020. 247-252 (In Russian).
16. Kut'kov G.M., Soloveychik A.A., Sidorov M. V. Teoriya i raschet polnoprivodnogo traktora [Theory and calculation of an all-wheel drive tractor]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2014. Vol. 8. N2. 8-14 (In Russian).
17. Yakushev A.Ya., Nazirkhonov T.M., Vikulov I.P., Markov K.V. Opredelenie osnovnykh parametrov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya [Determination of the main parameters of an asynchronous traction electric motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*. 2019. Vol. 16. Iss. 4. 592-601 (In Russian).
18. Fattakhov K.M., Fattakhov R.K. Raschet i postroenie puskovykh kharakteristik asinkhronnogo dvigatelya po katalognym dannym [Calculation and construction of starting characteristics of an induction motor according to catalog data]. *Neft-egazovoe delo*. 2012. N3. 25-31 (In Russian).
19. Chernyak Yu.V., Gatchenko V.A., Karashchuk S.V. Model' tyagovogo privoda elektrovoza postoyannogo toka s shirotno-impul'snym regulirovaniem napryazheniya tyagovykh elektrodvigatelye [Model of a traction drive of a direct current electric locomotive with pulse-width regulation of the voltage of traction electric motors]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport*. 2018. N1(36). 28-29 (In Russian).
20. Shukharev S.A. Modelirovanie raboty dvigatelya postoyannogo toka [Modeling the operation of a DC motor]. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava*. 2018. N14. 7-12 (In Russian).
21. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Putan A.A. Raschetnaya model' osnovnykh parametrov rabochego tsikla dizelya s ispol'zovaniem razlichnykh tipov topliv [Computational model of the main parameters of the diesel engine operating cycle using different types of fuels]. *Doklady TSKHA: Sbornik statey*. 2020. Iss. 292. Ch. I. 244-247 (In Russian).
22. Deryushev V.V., Vinogradova T.A. Analiz skorostnykh kharakteristik sovremennykh dvigateley [Analysis of the speed characteristics of modern engines]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2019. N1(64). 3-10 (In Russian).
23. Chau K., Chan C., and Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*. 2008. 55(6). 2246-2257 (In English).
24. Al-Mashakbeh, A.S.O. (2009). Proportional integral and derivative control of brushless DC motor. *European Journal of Scientific Research*. 35(2). 198-203 (In English).
25. Hanselman Duane C. Brushless permanent magnet motor design / Duane Hanselman. 2nd ed. 2003. 392 (In English).
26. Ovchinnikov I.E. Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove [Valve electric motors and a drive based on them]. Saint Petersburg: KORONA-Vek. 2016. 336 (In Russian).
27. Dolgih A., Martemyanov V., Borikov V. Dependence of the torque-rotor position characteristic from the tape winding current. *Przeglad elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95. N9. 71-75 (In English).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.10.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 14.10.2020

Статья принята к публикации 24.11.2020
The paper was accepted
for publication on 24.11.2020

Расчет экологических порогов нормального давления колесных движителей машин на полевых работах на глинистых почвах

Александр Николаевич Панасюк,
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
ведущий научный сотрудник, alex28rus@list.ru;

Александр Васильевич Липкань,
старший научный сотрудник

Дальневосточный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства,
г. Благовещенск, Российская Федерация

Реферат. Одно из условий достижения максимальной урожайности сельскохозяйственных культур – оптимальная плотность почвы. В Амурской области экологические пороги уплотнения для зерновых культур составляют 1,0-1,24 грамма на кубический сантиметр, для сои – 1,09-1,25, что соответствует нормальному давлению 80-120 килопаскалей в зависимости от влажности почвы. Показали, что применяемые в Амурской области тракторы, воздействуя на почву, превышают экологический порог уплотнения. (*Цель исследования*) Обосновать экологическую совместимость мобильной полевой энергетики, в первую очередь тракторов, занятых на полевых работах, по уплотняющему воздействию от передаваемой их движителями нормальной нагрузки на почву. (*Материалы и методы*) Проанализировали экспериментальные данные изменения плотности, твердости и сопротивления почвы обработке. Получили эмпирическую зависимость для расчета прироста сопротивления обработке почвы от уплотняющей нагрузки в слое 0-20 сантиметров. (*Результаты и обсуждение*) Установили рост сопротивления вспашке на 12-25 процентов при нормальной нагрузке 138-170 килопаскалей, передаваемой движителями машин, что соответствует плотности почвы 1,25-1,30 грамма на кубический сантиметр; при нагрузке 180-250 килопаскалей сопротивление увеличивается на 43-50 процентов, что эквивалентно плотности почвы 1,30-1,35 грамма на кубический сантиметр; при давлении 300-350 килопаскалей эти показатели повышаются на 60-67 процентов и до 1,40-1,45 грамма на кубический сантиметр; а при 400 килопаскалях выявили рост сопротивления на 70-90 процентов, что сравнимо с плотностью 1,48 грамма на кубический сантиметр. (*Выводы*) Определили, что предельное значение нормального давления под движителями машин на полевых работах следует ограничить до 150-175 килопаскалей. Установили экологический порог нормального давления – не более 120-135 килопаскалей при влажности почвы 20-23 процента, что сравнимо с плотностью почвы 1,2-1,25 грамма на кубический сантиметр. Рассчитали предельное значение нормального давления движителя на почву – 350 паскалей, что соответствует критическому уплотнению почвы 1,30 грамма на кубический сантиметр. **Ключевые слова:** уплотнение почвы, мобильная полевая энергетика, сопротивление почвы обработке, экологический порог нормального давления на почву, урожайность, тракторы.

Для цитирования: Панасюк А.Н., Липкань А.В. Расчет экологических порогов нормального давления колесных движителей машин на полевых работах на глинистых почвах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 43-48. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-43-48.

Calculation of the Ecological Thresholds of Normal Pressure of Machine Propulsion Drive in Working on Clay Soils

Alexander N. Panasyuk,
Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian
academy of sciences, leading researcher,
e-mail: alex28rus@list.ru;

Alexander V. Lipkan,
senior researcher

Far Eastern Research Institute of Agricultural Mechanization and Electrification, Blagoveshchensk, Russian Federation

Abstract. One of the conditions for achieving maximum land productivity is optimal soil density. In the Amur Region, ecological compaction thresholds for cereals are 1.0-1.24 grams per cubic centimeter, for soybeans – 1.09-1.25, which corresponds to a normal pressure of 80-120 kilopascals, depending on soil moisture. The authors showed that the tractors used in the Amur Region, acting on the soil, exceed the ecological compaction threshold. (*Research purpose*) To substantiate the ecological compatibility of mobile field energy, primarily tractors engaged in field work, in terms of the compacting effect from the normal load transmitted by their propulsion drive to the soil. (*Materials and methods*) The authors analyzed the experimental data on changes in density, hardness and resistance

of soil to processing. An empirical dependence was obtained for calculating the increase in resistance to soil cultivation from the compaction load in a layer of 0-20 centimeters. (*Results and discussion*) The authors established an increase in plowing resistance of 12-25 percents at a normal load of 138-170 kilopascals, transmitted by the machine propulsion drive, which corresponded to a soil density of 1.25-1.30 grams per cubic centimeter; at a load of 180-250 kilopascals, the resistance increased by 43-50 percents which was equivalent to a soil density of 1.30-1.35 grams per cubic centimeter; at a pressure of 300-350 kilopascals, these indicators increased by 60-67 percents and up to 1.40-1.45 grams per cubic centimeter; and at 400 kilopascals, they showed an increase in resistance of 70-90 percents which is comparable to a density of 1.48 grams per cubic centimeter. (*Conclusions*) It was determined that the limit value of the normal pressure under the machine propulsion drive in field work should be limited to 150-175 kilopascals. The ecological threshold of normal pressure was established – no more than 120-135 kilopascals with soil moisture of 20-23 percents which was comparable to the soil density of 1.2-1.25 grams per cubic centimeter. The limiting value of the normal pressure of the propulsion drive on the soil was calculated – 350 Pa, which corresponded to the critical soil compaction of 1.30 grams per cubic centimeter.

Keywords: soil compaction, mobile field power engineering, soil resistance to cultivation, ecological threshold of normal pressure on the soil, yield, tractors.

For citation: Panasyuk A.N., Lipkan' A.V. Raschet ekologicheskikh porogov normal'nogo davleniya kolesnykh dvizhiteley mashin na polevykh rabotakh na glinistyykh pochvakh [Calculation of the ecological thresholds of normal pressure of machine propulsion drive in working on clay soils]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. T. 14. N4. 43-48 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-43-48.

Существенная интегральная характеристика почвы – ее плотность. От этого показателя зависят водный и воздушный режимы, биологическая активность почвенной биоты, то есть плодородие [1].

Установлено, что максимальная урожайность сельскохозяйственных культур достигается при оптимальной плотности почвы, уровень которой различен в зависимости от видов почв и культур и отличаются от равновесной плотности естественного сложения [2, 3]. Чем больше глинистой фракции содержит почва, тем меньше значения ее оптимальной плотности. От плотности почвы зависят ее твердость и сопротивление обработке. Поэтому необходимо учитывать экологическую совместимость мобильной полевой энергетики, в первую очередь тракторов, занятых на полевых работах, по уплотняющему воздействию от передаваемой на почву нормальной нагрузки [4].

Цель исследований – обосновать экологическую совместимость мобильной полевой энергетики, в первую очередь тракторов, занятых на полевых работах, по уплотняющему воздействию от передаваемой их движителями нормальной нагрузки на почву.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Согласно данным Амурского статистического ежегодника 2017 г., для лугово-черноземовидных и лугово-глеевых оструктуренных почв, по механическому составу-средних и тяжелых суглинках, занимающих 78,8% пашни в регионе, экологические пороги уплотнения для зерновых культур составляют 1,0-1,24 г/см³, для сои – 1,09-1,25 г/см³ [5]. По другим оценкам, усредненный экологический порог уплотнения равен 1,18-1,20 г/см³. Провели анализ результатов исследований уплотняющего воздействия тракторов по коэффициенту уплотнения (табл. 1). Выявили, что практически все колесные тракторы, применяемые в Амурской области, превышают экологический порог уплотнения [6, 7]. Исключение, со-

ставляет малая линейка тракторов: K-744P1; CASE IH 450; NH T9.040. Плотность почвы по следу трактора находится на верхней границе экологического порога уплотнения.

Для зерновых культур при плотности почвы 1,16-1,18 г/см³ (для пропашных – 1,39-1,45) считается, что предел оптимальной плотности превышен на 0,08-0,12 г/см³ (для пропашных – на 0,19-0,25), то есть оптимальное значение плотности принимается равным 1,08-1,06 г/см³ (для пропашных – 1,2).

Для тяжелосуглинистых черноземов, если верхний предел оптимальной плотности не превышает 1,2 г/см³, обработку почвы с целью ее разуплотнения можно не проводить [1]. При увеличении плотности почвы под воздействием движителей машин более 1,3 г/см³ происходит так называемая техногенная деградация почвы вследствие механической нагрузки на нее [7, 8]. Почва переуплотняется, идет разрушение ее структуры: начинается практическое снижение пористости почвы и доступности для растений почвенной влаги. Для всех видов почв при плотности 1,39-1,40 г/см³ наблюдается отсутствие роста и развития растений сельскохозяйственных культур. Таким образом, можно принять усредненное значение экологического порога уплотнения – 1,2 г/см³.

Обработка экспериментальных данных по уплотняющему воздействию колесных движителей мобильных полевых и транспортных агрегатов позволила установить определенную корреляцию нормального давления в пятне контакта движителя с почвой с ее плотностью после прохода агрегата в зависимости от исходной плотности (табл. 2).

Только при нормальном давлении, не превышающем 130 кПа, можно утверждать, что движители не оказывают переуплотняющего воздействия. Кроме того, при высоких значениях эксплуатационной мас-

Таблица 1

Table 1

Коэффициент уплотнения почвы по следу трактора (поле, подготовленное под посев, $W_0=20-23\%$)
THE TRACTOR'S TRACK SOIL COMPACTION COEFFICIENT (THE FIELD PREPARED FOR SOWING, $W_0 = 20-23\%$)

Марка трактора Tractor brand	Тяговый класс Traction class	Колесная формула Wheel formula	Плотность почвы, г/см ³ Soil density, g / cm ³		Коэффициент уплотнения Compaction factor	Эксплуатационная масса, т Operating weight, t
			вне следа off trail	по следу on trail		
MTЗ-80	1,4	4К2 <i>a</i> один single	1,12	1,32	1,18	3,0
MTЗ-82	1,4	4К4 <i>a</i> один single	1,17	1,59	1,36	3,2
T-150K	3,0	4К2 <i>b</i> один single	1,08	1,35	1,25	7,8
T-150K	3,0	4К2 <i>a</i> один single	1,12	1,39	1,24	7,8
NH T7.060	3,0	4К4 <i>a</i> один single	1,0	1,28	1,28	8,1
К 701	5,0	4К4 <i>b</i> один single	1,12	1,40	1,29	13,5
MTЗ 3552	5,0	4К4 <i>a</i> сдвоен doubled	1,15	1,34	1,16	12,3
К 744P1	5,0	4К4 <i>a</i> один single	1,00	1,16	1,16	16,1
К 744P3	5,0	4К4 <i>b</i> один single	0,92	1,22	1,32	17,0
К 744P4	5,0-6,0	4К4 <i>b</i> один single	1,16	1,42	1,22	17,5
К 744P4	5,0-6,0	4К4 <i>b</i> один single	1,02	1,28	1,25	17,5
К 744P4	5,0-6,0	4К4 <i>b</i> один single	0,94	1,27	1,35	17,5
NH T9.535	6,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	1,13	1,24	1,10	19,0
Case IH 450	6,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	0,94	1,16	1,23	22,4
BV 485	6,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	0,94	1,21	1,29	22,0
NH T9.505	6,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	0,94	1,29	1,37	22,4
NH T9.040	8,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	0,94	1,20	1,27	23,4

сы колесных тракторов и избыточном нормальном давлении под движителем повышается сопротивление перекачиванию, увеличиваются глубина колеи и расход непроизводительной энергии [9].

Экологический порог нормального давления $q_{\text{н}}$ в

зависимости от влажности почвы находится в пределах 80-120 кПа (среднее 100 кПа), для почв, склонных к переувлажнению, – 50-100 кПа, что соответствует уплотняющему воздействию 60-90 кН/м (среднее – 75 кН/м) [10, 11].

Таблица 2
Table 2

ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ПОЧВЫ В ПАХОТНОМ ГОРИЗОНТЕ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОД ДВИЖИТЕЛЯМИ МАШИН (ПРИ ИСХОДНОЙ ПЛОТНОСТИ 1,00-1,12 г/см³) DEPENDENCE OF THE SOIL DENSITY IN THE PLOW HORIZON ON THE NORMAL PRESSURE UNDER THE MACHINE PROPULSION DRIVE (WITH AN INITIAL DENSITY OF 1.00-1.12 g/cm³)	
Интервалы нормального давления под движителями машин, кПа Normal pressure intervals under machine propulsion drive, kPa	Плотность почвы, г/см³ Soil density, g/cm³
≤ 50	≤ 1,1
50-100	1,11-1,15
115-130	1,15-1,20
135-150	1,18-1,28
150-200	1,20-1,31
145-250	1,24-1,35
275-300	1,28-1,40
300-340	1,34-1,45
350-400	1,45-1,52
> 450	1,58-1,62

Изменение нормальных напряжений в почве подчиняется известной зависимости гиперболического тангенса (по В.В. Кацыгину). Анализ изменения плотности, твердости и сопротивления почвы обработке позволил выдвинуть гипотезу и получить эмпирическую формулу для расчета прироста сопротивления от уплотняющей нагрузки:

$$\Delta k_0 = k_p^{\text{крит}} \cdot \operatorname{th} \left(\frac{q_{\text{тек}} - q_{\text{эк}}}{q_{\text{пред}}} \cdot \frac{\rho_{\text{тек}} - \rho_0}{\rho_0} \right), \quad (1)$$

где Δk_0 – прирост сопротивления;

$$k_p^{\text{крит}} = \frac{\rho_{\text{пред}}}{\rho_0};$$

$\rho_{\text{пред}}$ – предельное значение плотности (1,62 г/см³);

ρ_0 – нижний уровень оптимального значения плотности почвы (1,0-1,06 г/см³);

$q_{\text{тек}}$ – текущее значение нормального давления на

почву под движителем, кПа;

$q_{\text{пред}}$ – предельное значение нормального давления движителя на почву, соответствующее критическому уплотнению почвы, кПа;

$\rho_{\text{тек}}$ – плотность почвы под движителем, г/см³ (при соответствующем $q_{\text{тек}}$);

$\rho_{\text{эк}}$ – экологический порог плотности почвы, г/см³;

ρ_0 – усредненная оптимальная плотность почвы вне следа движителя, г/см³.

Под k_0 понимается прирост сопротивления обработке по следу к сопротивлению обработке вне следа:

$$\Delta k_0 = \frac{k_{0 \text{ в следе}}}{k_0}, \quad (2)$$

где $k_{0 \text{ в следе}}$ – сопротивление обработке по следу;

k_0 – сопротивление обработке вне следа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для подтверждения

Таблица 3
Table 3

ПРИРОСТЫ ТВЕРДОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В СЛЕДЕ ДВИЖИТЕЛЯ INCREASES IN HARDNESS AND RESISTANCE TO TILLAGE DEPENDING ON THE NORMAL PRESSURE IN THE PROPULSION DRIVE TRAIL								
Нормальное давление в следе, кПа Normal pressure in the trail, kPa	Относительный прирост сопротивления Relative resistance gain			Сопротивление обработке, кН/м² Resistance to processing, kN / m²	Твердость почвы, МПа Soil hardness, MPa	Прирост сопротивления обработке Increase in processing resistance		
	диапазон range	среднее значение mean	коэффициент вариации, % the coefficient of variation, %			диапазон range	среднее значение mean	коэффициент вариации, % the coefficient of variation, %
Off trail	–	–	–	57,8	1,13-1,19	–	–	–
136-154	0,11-0,16	0,13	17,0	69,1-64,7	1,61-1,63	1,11-1,14	1,12	18,6
166-170	0,19-0,21	0,20	13,0	64,4- 72,4	1,61- 1,67	1,23-1,25	1,24	10,2
183-205	0,31-0,34	0,32	5,4	83,0-86,8	1,97 -2,69	1,42-1,50	1,44	14,6
253-272	0 27-0,31	0,28	12,5	79,0 -83,2	1,65- 1,96	1,37-1,44	1,40	12,0
300	0,38	0,38	18,0	93,1	1,96	1,58-1,61	1,62	13,0
350	0,38-0,39			92,6-94,7	2,06-2,61	1,60-1,64		
407	0,42-0,47	0,43	11,0	99,4-109,8	2,48-2,56	1,72-1,90	1,76	1,76

Таблица 4

Table 4

РАСЧЕТ ПРИРОСТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ
CALCULATION OF THE INCREASE IN RESISTANCE TO TILLAGE DEPENDING ON THE NORMAL PRESSURE

Варианты сочетаний / Combination options										Обозначения кривой на рисунке Curve designation in the figure		
$q_{\text{эк}} = 80 \text{ кПа}, q_{\text{пред}} = 350 \text{ кПа}, \rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3, \rho_{\text{эк}} = 1,2 \text{ г/см}^3, k_p = 1,62$												
q	100	115	135	150	200	275	300	350	▲			
ρ	1,15	1,18	1,23	1,25	1,29	1,38	1,39	1,45				
Δk_o	–	1,0	1,21	1,37	1,58	1,62	1,62	1,62				
$q_{\text{эк}} = 80 \text{ кПа}, q_{\text{пред}} = 250 \text{ кПа}, \rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3, \rho_{\text{эк}} = 1,2 \text{ г/см}^3, k_p = 1,62$												
q	100	115	135	140	150	200	275	300	350	400	450	●
ρ	1,15	1,18	1,23	1,25	1,27	1,28	1,35	1,40	1,45	1,48	1,58	
Δk_o	–	1,0	1,42	1,47	1,53	1,61	1,62	–	–	–	–	
$q_{\text{эк}} = 100 \text{ кПа}, q_{\text{пред}} = 350 \text{ кПа}, \rho_0 = 1,04 \text{ г/см}^3, \rho_{\text{эк}} = 1,25 \text{ г/см}^3, k_p = 1,62$												
Δk_o	–	–	–	1,0	1,11	1,52	1,61	1,62	1,62	–	–	○
$q_{\text{эк}} = 80 \text{ кПа}, q_{\text{пред}} = 450 \text{ кПа}, \rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3, \rho_{\text{эк}} = 1,2 \text{ г/см}^3, k_p = 1,62$												
q	125	135	150	160	175	200	250	300	320	350	400	◆
ρ	1,19	1,23	1,24	1,26	1,27	1,32	1,35	1,40	1,42	1,45	1,48	
Δk_o	–	1,03	1,31	1,37	1,41	1,53	1,60	1,61	1,62	1,62	1,62	

выдвинутой гипотезы использованы усредненные экспериментальные значения нормального давления, плотности почвы и сопротивления обработке в слое 0-20 см (табл. 3). Влажность поля, подготовленного под посев, равна 20-23%.

Обработка экспериментальных данных зависимости сопротивления почвы основной обработке от нормальной нагрузки, передаваемой движителями машин, показывает, что в интервале $q = 136-170 \text{ кПа}$ сопротивление вспашке возрастает на 11-25% (это соответствует интервалу плотности почвы $\rho = 1,25-1,30 \text{ г/см}^3$); в интервале $q = 180-270 \text{ кПа}$ сопротивление увеличивается на 43-50% ($\rho = 1,30-1,35 \text{ г/см}^3$); при давлении в интервале $q = 300-350 \text{ кПа}$ сопротивление обработки повышается на 58-65% ($\rho = 1,40-1,45 \text{ г/см}^3$); при нормальном давлении $q \geq 400 \text{ кПа}$ сопротивление больше на 70-90% ($\rho = 1,48 \text{ г/см}^3$).

Относительный прирост сопротивления определяем по формуле:

$$\xi_{k_o} = 1 - k_o/k_{\text{в следе}} \quad (3)$$

Экспериментальные данные сравнивали с результатами расчетов прироста сопротивления обработке почвы по предложенной зависимости (табл. 4, рисунок). Использовали различные варианты сочетаний составляющих формулы (1). Расчетные значения сравнивали с экспериментальными данными изменения коэффициента сопротивления обработке почвы.

Выводы. Предельное значение нормального давления под движителями машин, занятых на полевых работах, следует ограничить до 150-175 кПа в зависимости от исходного состояния почвы плотностью 1,00-1,08 г/см³. Экологический порог нормального давления не должен превышать 120-135 кПа, оптимальные

значения нормального давления – 80-100 кПа при предельном значении нормального давления движителя на почву, соответствующем критическому уплотнению почвы 350 кПа (влажность почвы – 20-23%). Экологический порог уплотнения составляет 1,20-1,25 г/см³; критическим следует считать значение 1,30 г/см³.

На уборочных и уборочно-транспортных работах

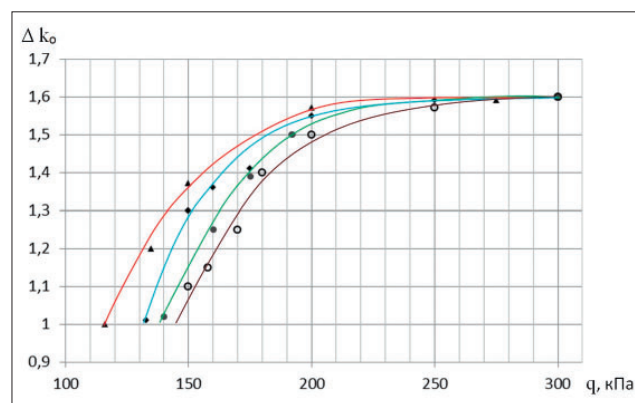


Рисунок. Зависимость прироста коэффициента сопротивления обработке почвы от нормального давления под движителем при различных значениях экологического порога уплотняющего воздействия ($q_{\text{эк}}$)

Figure. Dependence of the increase in the coefficient of resistance to tillage on the normal pressure under the propulsion drive at various values of the ecological threshold of the compaction effect ($q_{\text{эк}}$)

при влажности почвы не более 23% экологический порог нормального давления не должен превышать 250-300 кПа. Критический порог уплотнения – 1,34-1,40 г/см³, при этом прирост сопротивления почвы обработке в следе движителя приближается к своему предельному значению. Найденная эмпирическая за-

висимость реально описывает изменения физических свойств почвы под воздействием нормальных нагрузок от движителей машин и может быть использована

на для расчета прироста сопротивления почвы обработке для суглинистых и глинистых лугово-черноземовидных почв в пахотном горизонте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. М.: ВИМ. 1998. 368 с.
2. Гуськов В.В., Велеев Н.Н., Атоманов Ю.Е. Тракторы. М.: Машиностроение. 1988. 376 с.
3. Захарова Е.Б. Структура и продуктивность соевого агрофитоценоза в зависимости от уплотнения почвы // *Земледелие*. 2010. N7. С. 39-40.
4. Щитов С.В. Пути снижения техногенного воздействия колесной энергетики в условиях Дальнего Востока: монография. Благовещенск: ДальГА. 2004. 212 с.
5. Панасюк А.Н., Кашбулгаев Р.А., Липкань А.В. Методологические основы оценки экологической и энергетической эффективности технологических систем в растениеводстве // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2017. N91. С. 55-63.
6. Гуреев И.И. Экологические последствия применения комплексов машин для механизации обработки почвы // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. Т. 29. N8. С. 77-79.

7. Гуреев И.И., Климов Н.С. Обоснование критерия регионального нормирования механической нагрузки на почву при комплексной механизации агротехнологий // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. N2. С. 35-80.
8. Hunger R. Bodenverdichtung: Prävention vor Regeneration. *Schweizer Landtechnik*. 2012. 74, Aug. 46-48.
9. Buliński J., Leszczyński Ł. Effect of multiple passages and the wheel load on soil deformation. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2012. N59. 5-12.
10. Емельянов А.М., Бумбар И.В., Канделя М.В., Рябченко В.Н. Гусеничные зерно- и кормоуборочные комбайны. Основы теории и конструктивно-технологические устройства: монография. Благовещенск: ДальГАУ. 2013. 285 с.
11. Eugene G. Exclusive test reveal power loss. *Farm and Power Equipment*. 1995. Vol. 42. N1. 4-6.

REFERENSIS

1. Rusanov V.A. Problema pereuplotneniya pochv dvizhiteleyami i effektivnye puti ee resheniya [The problem of overpopulation of soils by propellers and the effective ways to solve it]. Moscow: VIM. 1998. 368 (In Russian).
2. Gus'kov V.V., Veleev N.N., Atomanov Yu.E. Traktory [Tractors]. Moscow: Mashinostroenie. 1988. 376 (In Russian).
3. Zakharova E.B. Struktura i produktivnost' soevogo agrofitotsenoza v zavisimosti ot uplotneniya pochvy [The structure and productivity of soybean agrophytocenosis depending on soil compaction]. *Zemledelie*. 2010. N7. 39-40 (In Russian).
4. Shchitov S.V. Puti snizheniya tekhnogennogo vozdeystviya kolesnoy energetiki v usloviyakh Dal'nego Vostoka: monografiya [Ways to reduce the technogenic impact of wheeled energy in the Far East: monograph]. Blagoveshchensk: Dal'GA. 2004. 212 (In Russian).
5. Panasyuk A.N., Kashbulgayanov R.A., Lipkan' A.V. Metodologicheskie osnovy otsenki ekologicheskoy i energeticheskoy effektivnosti tekhnologo-tekhnicheskikh sistem v rastenievodstve [Foundations for Assessing the Environmental and Energy Efficiency of Technological and Technical Systems in Crop Production]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2017. N91. 55-63 (In Russian).
6. Gureev I.I. Ekologicheskie posledstviya primeneniya kompleksov mashin dlya mekhanizatsii obrabotki pochvy [Environmental consequences of the use of machine complexes for the mechanization of soil tillage]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2015. Vol. 29. N8. 77-79 (In Russian).

7. Gureev I.I., Klimov N.S. Obosnovanie kriteriya regional'nogo normirovaniya mekhanicheskoy nagruzki na pochvu pri kompleksnoy mekhanizatsii agrotekhnologiy [Substantiation of the criterion for regional rationing of mechanical load on the soil with integrated mechanization of agricultural technologies]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2017. N2. 35-80 (In Russian).
8. Hunger R. Bodenverdichtung: Prävention vor Regeneration. *Schweizer Landtechnik*. 2012. 74, Aug. 46-48.
9. Buliński J., Leszczyński Ł. Effect of multiple passages and the wheel load on soil deformation. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2012. N59. 5-12.
10. Emel'yanov, A.M., Bumbar I.V., Kandelya M.V., Ryabchenko V.N. Gusenichnye zerno- i kormouborochnye kombayny. Osnovy teorii i konstruktivno-tekhnologicheskie ustroystva: monografiya [Caterpillar grains- and fodder harvesters. Fundamentals of theory and structural and technological devices: monograph]. Blagoveshchensk: Dal'GAU. 2013. 285 (In Russian).
11. Eugene G. Exclusive test reveal power loss. *Farm and Power Equipment*. 1995. Vol. 42. N1. 4-6.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.07.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 30.07.2020

Статья принята к публикации 16.11.2020
The paper was accepted
for publication on 16.11.2020

Исследование работы и формирование состава уборочно-транспортного комплекса из зерноуборочных комбайнов зарубежного производства

Григорий Александрович Иовлев,
кандидат экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: gri-iovlev@yandex.ru;

Анатолий Георгиевич Несговоров,
старший преподаватель кафедры,
e-mail: ag.nesgovorov@gmail.com;
Ирина Игоревна Голдина,
старший преподаватель кафедры,
e-mail: ir.goldina@mail.ru

Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Реферат. Показали, что главное условие оценки уборочно-транспортного комплекса – снижение издержек при уборке и транспортировке урожая зерновых. (*Цель исследования*) Оценить технико-экономические показатели и эксплуатационные свойства зарубежных зерноуборочных комбайнов и их влияние на производительность всего уборочно-транспортного комплекса. На основании статистических данных, полученных во время сбора информации, рассчитать показатели, которые влияют на управление работой уборочно-транспортного комплекса. (*Материалы и методы*) Использовали статистические материалы по работе зерноуборочных комбайнов, транспортных средств на отвозке. Учитывали технические характеристики зерноуборочных комбайнов и транспортных средств. Рассмотрели элементы теории вероятностей для формирования состава уборочно-транспортного комплекса. Исследования провели одновременно в двух структурных подразделениях сельскохозяйственной организации, находящихся друг от друга на расстоянии 19-20 километров. Применяли методы: экономико-статистический, прогнозирования, экономико-математического моделирования, экспертных оценок и другие. (*Результаты и обсуждение*) Получили 89 значений по показателю «Время заполнения бункера зерноуборочного комбайна», 45 – по критерию «Время ожидания загрузки транспортным средством». Рассчитали математическое ожидание первого показателя: в первом уборочном отряде для *Tiscano 450* – 22,68 минуты; *Mega 370* – 20,74 минуты; для *Tiscano 450* из второго уборочного отряда – 19,24 минуты. (*Выводы*) Выявили особенности формирования уборочно-транспортных комплексов, состоящих из зарубежных зерноуборочных комбайнов и транспортных средств. Определили производительность, качественные показатели технологического процесса обмолота зерновых культур и урожайность, при которых использование зарубежных зерноуборочных комбайнов становится экономически целесообразным.

Ключевые слова: уборка зерновых, уборочно-транспортный комплекс, время заполнения бункера, математическое ожидание.

Для цитирования: Иовлев Г.А., Несговоров А.Г., Голдина И.И. Исследование работы и формирование состава уборочно-транспортного комплекса из зерноуборочных комбайнов зарубежного производства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 49-56. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-49-56.

Operation Research and Formation of the Harvesting Transport Complex of the Grain Harvesters of Foreign Production

Grigory A. Iovlev,
Ph.D.(Eng), associate professor, head of the department,
e-mail: gri-iovlev@yandex.ru;
Anatoliy G. Nesgovorov,
senior lecturer of the department,
e-mail: ag.nesgovorov@gmail.com;

Irina I. Goldina,
senior lecturer of the department,
e-mail: ir.goldina@mail.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Agrarian University”, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The authors showed that the main condition for assessing the harvesting transport complex is to reduce costs during harvesting and transportation of grain crops. (*Research purpose*) To assess the technical and economic indicators and operational

properties of foreign grain harvesters and their impact on the productivity of the entire harvesting transport complex. Based on the statistical data obtained during the information collection, to calculate the indicators that affect the harvesting transport complex management. (*Materials and methods*) The authors used statistical materials on the combine harvesters operation, transport vehicles for transportation. They took studied combine harvesters and vehicles technical characteristics. They considered the elements of the theory of probability for the formation of the harvesting transport complex. The studies were carried out simultaneously in two structural divisions of an agricultural organization, located at a distance of 19-20 kilometers from each other. Economic and statistical, forecasting, economic and mathematical modeling, expert assessments and others methods were used. (*Results and discussion*) The authors received 89 values for the indicator "Time to fill the combine harvester bunker", 45 – according to the criterion "Waiting time for vehicle loading". They calculated the mathematical expectation of the first indicator: in the first harvesting team for the Tucano 450 – 22.68 minutes; Mega 370 – 20.74 minutes; for a Tucano 450 from the second harvesting team – 19.24 minutes. (*Conclusions*) The authors revealed the features of harvesting transport complexes formation, consisting of foreign combine harvesters and vehicles. They determined the productivity, quality indicators of the technological process of threshing grain crops and yield, at which the use of foreign combine harvesters became economically feasible.

Keywords: grain harvesting, harvesting transport complex, bunker filling time, mathematical expectation.

For citation: Iovlev G.A., Nesgovorov A.G., Goldina I.I. Issledovanie raboty i formirovanie sostava uborочно-transportnogo kompleksa iz zernouborochnykh kombaynov zarubezhnogo proizvodstva [Operation research and formation of the harvesting transport complex of the grain harvesters of foreign production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 49-56 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-49-56.

Оптимизация работы уборочных и уборочно-транспортных комплексов (УТК) остается актуальной темой исследований. Снижение издержек на этом этапе производства зерновых должно стать главным условием оценки УТК независимо от того, какая техника в них задействована – отечественная или импортная.

Цель исследования – оценить технико-экономические показатели и эксплуатационные свойства зарубежных зерноуборочных комбайнов, влияющие на производительность всего УТК, а также на основании статистических данных, полученных во время сбора информации, рассчитать показатели, на основании которых можно управлять работой УТК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для сравнения эксплуатационных свойств зарубежных зерноуборочных комбайнов рассмотрим основные технические характеристики (табл. 1) [1, 2].

Зерноуборочные комбайны примерно одного класса, но показатели Тусано 450 немного лучше, чем Мегэ 370: по площади системы сепарации – на 0,9%, по объему зернового бункера – на 9,8%, по мощности двигателя – на 7,2%. Модель *Tucano 450* – это улучшенный, более современный вариант *Mega 370*. Технико-экономические показатели зарубежных комбайнов позволяют более качественно выполнять технологический процесс уборки зерновых культур [3].

Для расчетов по оптимизации работы УТК следует учитывать продолжительность:

- заполнения бункера;
- ожидания транспортного средства для разгрузки зерноуборочных комбайнов;
- ожидания загрузки;
- движения транспортного средства до следующего комбайна;

- разгрузки бункера.

Для получения данных показателей провели исследования в сентябре 2020 г. в одной из сельхозорганизаций Свердловской области. Предприятие поддерживает высокую культуру земледелия, имеет мощную материально-техническую базу, развитое животноводство, производительность труда выше средней по области. Для снятия показателей разработали формы, при хронометрировании учитывали начало и окончание технологической операции. Результат заносили в бумажный носитель. Всего провели 178 замеров и получили 89 показателей для исследования работы 6 зерноуборочных комбайнов (первый убо-

Таблица 1 Table 1
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ
COMBINE HARVESTERS TECHNICAL CHARACTERISTICS

Показатели Indicators	Tucano 450	Mega 370
Ширина барабана, мм Reel width, mm	1580	1580
Диаметр барабана, мм Reel diameter, mm	450	450
Угол охвата подбарабана, град. Concave coverage angle, deg.	151	151
Длина соломотряса, м Straw walker length, m	4,4	4,4
Площадь соломотряса, м ² Straw walker area, m ²	7,0	7,0
Площадь системы сепарации, м ² Separation system area, m ²	8,75	8,67
Объем зернового бункера, л Grain bunker volume, l	9000	8200
Мощность двигателя, кВт/л.с. Engine power, kW/h.p.	220/299	205/279
Масса, кг Weight, kg	12 750	11 800

рочный отряд – два *Tiscano 450*, один *Mega 370*, второй уборочный отряд – три *Tiscano 450*).

Время заполнения бункера – случайная величина при большом числе замеров. Поэтому для инженерных расчетов используют неслучайную величину, то есть математическое ожидание:

$$M(X) = x_1 p_1 + x_2 p_2 + x_3 p_3 + \dots + x_n p_n, \quad (1)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – возможные значения времени заполнения бункера, мин;

$p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ – вероятность появления случайной величины при большом количестве замеров.

Математическое ожидание для отряда № 1 в варианте с зерноуборочными комбайнами *Tiscano 450* равно:

$$M(X) = 18 \cdot 0,20 + 20 \cdot 0,25 + 22 \cdot 0,17 + 24 \cdot 0,05 + 26 \cdot 0,14 + 28 \cdot 0,05 + 30 \cdot 0,08 + 34 \cdot 0,05 = 3,6 + 5 + 3,74 + 1,2 + 3,64 + 1,4 + 2,4 + 1,7 = 22,68 \text{ мин},$$

а для зерноуборочного комбайна *Mega 370* составляет:

$$M(X) = 18 \cdot 0,41 + 20 \cdot 0,35 + 22 \cdot 0,06 + 24 \cdot 0,06 + 28 \cdot 0,06 + 32 \cdot 0,06 = 7,38 + 7 + 1,32 + 1,44 + 1,68 + 1,92 = 20,74 \text{ мин}.$$

Вычислим этот показатель для отряда № 2, где работали только *Tiscano 450*:

$$M(X) = 12 \cdot 0,05 + 14 \cdot 0,12 + 16 \cdot 0,12 + 18 \cdot 0,17 + 20 \cdot 0,24 + 22 \cdot 0,21 + 26 \cdot 0,02 + 28 \cdot 0,05 + 32 \cdot 0,02 = 0,6 + 1,68 + 1,92 + 3,06 + 4,8 + 4,62 + 0,52 + 1,4 + 0,64 = 19,24 \text{ мин}.$$

Полученные данные примем для дальнейших расчетов по оптимизации работы УТК.

Для наглядности расчетов математического ожидания по показателю «время заполнения бункера» представим в виде графиков (рис. 1). По оси абсцисс отложим возможные значения времени заполнения бункера, по оси ординат – появление случайной величины в общем количестве замеров.

На примере работы зерноуборочных комбайнов *Tiscano 450* из первого уборочного отряда рассчитаем дисперсию:

$$D(X) = (x_1 - m)^2 p_1 + (x_2 - m)^2 p_2 + (x_3 - m)^2 p_3 + \dots + (x_n - m)^2 p_n, \quad (2)$$

где $m = M(X)$ – математическое ожидание, мин.

То есть:

$$D(X) = (18 - 22,68)^2 \cdot 0,2 + (20 - 22,68)^2 \cdot 0,25 + (22 - 22,68)^2 \cdot 0,17 + (24 - 22,68)^2 \cdot 0,05 + (26 - 22,68)^2 \cdot 0,14 + (28 - 22,68)^2 \cdot 0,05 + (30 - 22,68)^2 \cdot 0,08 + (34 - 22,68)^2 \cdot 0,05 = 4,38 + 1,8 + 0,08 + 0,09 + 1,54 + 1,41 + 4,29 + 6,41 = 20 \text{ мин}^2.$$

Среднее квадратическое отклонение рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \sqrt{20} = 4,47 \text{ мин}.$$

$$\text{Для Mega 370 } D(X) = 14,77 \text{ мин}^2;$$

$$\sigma = \sqrt{14,77} = 3,84 \text{ мин}.$$

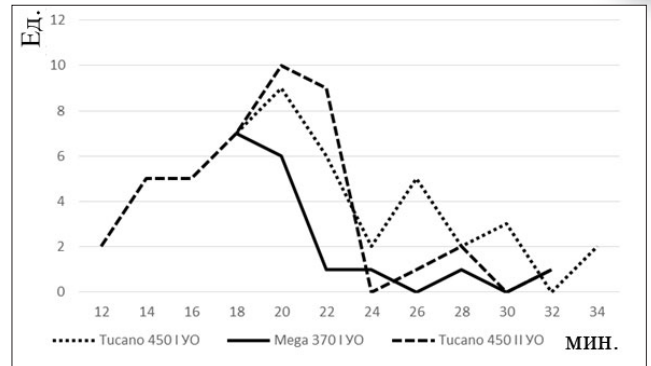


Рис. 1. Время заполнения бункера зерноуборочного комбайна и количество значений случайной величины (YO – уборочный отряд)

Fig. 1. Combine harvester bunker filling time and the number of values of a random variable (YO – harvesting team)

Для *Tiscano 450* из второго уборочного отряда

$$D(X) = 17,18 \text{ мин}^2; \sigma = \sqrt{17,18} = 4,14 \text{ мин}.$$

В диапазоне $M(X) \pm \sigma$ находится: у зерноуборочного комбайна *Tiscano 450* из первого уборочного отряда – 0,80 всего количества событий; у *Mega 370* – 0,88; у *Tiscano 450* из второго уборочного отряда – 0,86. Наполнение бункеров во всех случаях на 80-88% происходит в течение диапазона времени математического ожидания с учетом среднего квадратического отклонения. Это говорит о стабильности данного показателя и о возможности вести дальнейшие расчеты по оптимизации работы УТК.

С точки зрения обеспечения зерноуборочных комбайнов транспортом на основании статистических данных по показателю «время ожидания транспортного средства» можно сделать вывод о том, что уборочные отряды работали практически без остановок, кроме технологических. Так, время ожидания транспортного средства в первом уборочном отряде составило 3,2% от дневного фонда рабочего времени, у второго уборочного отряда – 3,7%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Следующий этап исследований – обоснование возможности оперативной оптимизации работы уборочно-транспортного комплекса [4-11].

Ранее была отмечена актуальность снижения энергетических затрат при уборке и транспортировании к местам хранения сельскохозяйственной продукции [4]. Авторы рассматривают развитие транспортной системы АПК как основу технологической модернизации аграрного производства. Они перечисляют условия для сокращения энергозатрат в растениеводстве:

- эффективное использование сельхозтехники;
- внедрение новых технологий и энергосберегающей техники;
- рациональное комплектование машинно-тракторных агрегатов;
- использование уборочных машин с высокой про-

изводительностью;

- организация проведения полевых работ в соответствии с агротехническими требованиями.

Некоторые ученые указывают на отсутствие четких методических разработок и рекомендаций, сравнительного анализа по расчету оптимального количества комбайнов в основном технологическом звене УТК [5].

Использование информационных технологий, основанных на математическом моделировании, способствует эффективному применению сложной сельхозтехники [6]. Аналогичные задачи были поставлены при изучении функционирования технологических комплексов и систем в производственных процессах АПК, изменения дневной производительности уборочной технологической системы, в ходе математического моделирования по выбору оптимальных транспортных средств и схем взаимодействия уборочно-транспортных машин [12-16].

Мы в своем исследовании по показателю «время заполнения бункера» рассчитали текущую урожайность убираемой культуры (данные для расчетов взяли из инструкции по эксплуатации зерноуборочных комбайнов):

$$u = 10^{-4} \frac{Q_B \rho_3 \lambda_B}{l_p V \beta}, \quad (3)$$

где u – урожайность сельскохозяйственной культуры, т/га;

Q_B – вместимость бункера, м³;

ρ_3 – объемная масса пшеницы, равная 0,785 т/м³;

λ_B – коэффициент заполнения бункера, составляющий 1,1 (с трансформирующейся крышей);

l_p – длина рабочего пути заполнения бункера комбайна, м ($l_p = V t_{зб}$, где V – рабочая скорость зерноуборочного комбайна, равная 7,0 км/ч, $t_{зб}$ – время заполнения бункера, ч);

B – ширина захвата жатки, м;

β – коэффициент использования ширины захвата жатки, $\beta = 0,96$.

Подставив соответствующие значения, получили значения текущей урожайности пшеницы при расчете по показателям работы комбайнов:

- *Tiscano 450* первого уборочного отряда – 4,06 т/га;

- *Mega 370* первого уборочного отряда – 4,01 т/га;

- *Tiscano 450* второго уборочного отряда – 4,82 т/га.

Рассчитаем урожайность в диапазоне времени заполнения бункера от 12 до 34 мин (табл. 2).

Для анализа работы транспортного отряда разработали форму, куда заносили следующие статистические данные, характеризующие работу отряда:

- время ожидания загрузки после возвращения со склада (ожидание загрузки 1-го бункера);
- время ожидания 2-го бункера;
- время ожидания 3-го бункера;
- время транспортного цикла (движение после загрузки до склада и после выгрузки на складе до поля).

Таблица 2

Table 2

ВРЕМЯ ЗАПОЛНЕНИЯ БУНКЕРА И УРОЖАЙНОСТЬ BUNKER FILLING TIME AND PRODUCTIVITY	
Время заполнения бункера комбайна, мин Bunker filling time, min	Урожайность, т/га Productivity, t/ha
12	7,71
14	6,62
16	5,77
18	5,14
20	4,63
22	4,20
24	3,85
26	3,56
28	3,30
30	3,08
32	2,89
34	2,70

Транспортный отряд первого уборочного отряда состоит из тракторов: Беларусь 892, *Deutz-Fahr Agrotac 150*, *Deutz-Fahr Agrotac 720*, *Laser 150* с прицепами *PRONAR T663/1*, *LMR-14*, *Zugdeichsel*. Три трактора с прицепами вместимостью два бункера, один трактор с прицепом вместимостью три бункера. В течение рабочего дня работы первого уборочного отряда выполнили 54 замера.

Математическое ожидание по показателю «время ожидания загрузки транспортным средством» составило 13,26 мин. Данный показатель представим в виде графика (рис. 2). По оси абсцисс отложим возможные значения времени ожидания загрузки, по оси ординат – появления случайной величины в общем количестве замеров.

За рабочий день время ожидания загрузки транспортными средствами составило 519 мин (8,65 ч), или 25,4% от дневного фонда рабочего времени транспортного отряда. Практически это время простоя одного транспортного средства в течение дня. Предложения по оптимизации работы транспортных средств представим после теоретического расчета потребного ко-

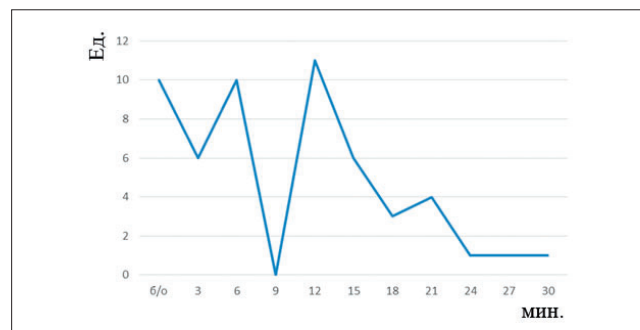


Рис. 2. Время ожидания загрузки четырьмя транспортными средствами

Fig. 2. Waiting time for loading by four vehicles

личества транспортных единиц для организации работы УТК.

После оперативного определения урожайности следует установить количество транспортных средств, необходимых для обеспечения оптимальной (без простоев) работы уборочного комплекса:

$$n_{\text{тр}}^{\text{изук}} = \frac{C_1 \times T_p}{q_1 \times T_b}, \quad (4)$$

где, $n_{\text{тр}}^{\text{изук}}$ – количество транспортных средств, необходимых для обслуживания одного зерноуборочного комбайна, ед.;

C_1 – масса зерна в бункере зерноуборочного комбайна, т;

T_p – продолжительность транспортного цикла, ч;

q_1 – грузоподъемность транспортного средства, т;

T_b – время заполнения бункера зерном, ч.

Подставим значения:

$$C_1 = V_{p3} = 8,73 \cdot 0,785 = 6,86 \text{ т},$$

где V – объем бункера зерноуборочного комбайна, м³;
 ρ_3 – объемная масса пшеницы 0,785 т/м³.

В соответствии с инструкцией по эксплуатации зерноуборочных комбайнов *Tiscano 450* и *Mega 370*, вместимость бункера при коэффициенте заполнения 1,1 (с трансформирующейся крышей) составляет 9,0 и 8,2 м³ соответственно. Для расчетов примем значение 8,73 м³.

Тогда

$$n_{\text{тр}}^{\text{изук}} = \frac{6,86 \cdot 0,91}{15,9 \cdot 0,37} = 1,06 \text{ ед.}$$

Расчетная грузоподъемность одного транспортного средства составляет 15,9 т, математическое ожидание времени транспортного цикла – 54,85 мин (0,91 ч). Под временем транспортного цикла мы подразумеваем продолжительность:

- движения транспортного средства после загрузки до зерносклада;
- выгрузки;
- движения до поля или сразу до первого зерноуборочного комбайна.

Для организации работы уборочного комплекса (3 комбайна) необходимо 3,18 ед. транспортных средств. Математическое ожидание показателя «время ожидания загрузки транспортным средством» в этом слу-

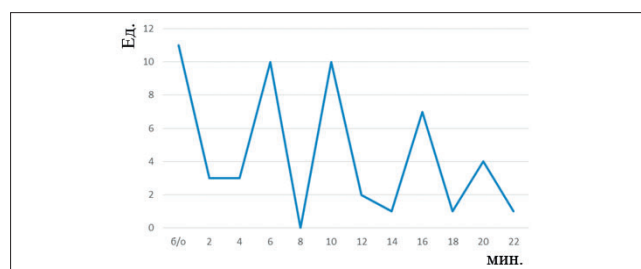


Рис. 3. Время ожидания загрузки тремя транспортными средствами

Fig. 3. Waiting time for loading by three vehicles

Таблица 3		Table 3	
Количество транспортных средств для обеспечения оптимальной работы уборочного комплекса в зависимости от урожайности		THE NUMBER OF VEHICLES TO ENSURE THE HARVESTING COMPLEX OPTIMAL OPERATION, DEPENDING ON THE PRODUCTIVITY	
Урожайность, т/га	Productivity, t/ha	Количество транспортных средств, ед.	Number of vehicles, units
3,0		2,3	
3,5		2,7	
4,0		3,1	
4,5		3,5	
5,0		3,8	
5,5		4,2	
6,0		4,5	
6,5		4,9	
7,0		5,3	
7,5		5,6	
8,0		6,2	

чае составит 11,41 мин (рис. 3).

В ходе расчетов определили потребность в транспортных средствах для обеспечения оптимальной работы уборочного комплекса в зависимости от урожайности (табл. 3).

В зависимости от расстояния до склада при расчетах используют поправочные коэффициенты:

- до 5 км – 0,77;
- 10 км – 1,00;
- 15 км – 1,30;
- 20 км – 1,59;
- 25 км – 1,85;
- 30 км – 2,00.

От организации работы транспорта на отвозке зерна зависит эффективность работы зерноуборочных комбайнов и всего УТК. Приведем пример расчета по определению транспортных затрат для транспортного агрегата в составе: *Deutz-Fahr Agrottron 720* с прицепом *Zugdeichsel*.

Исходные данные:

- вместимость прицепа – 32 м³;
- собственная масса – 5530 кг;
- грузоподъемность – 20 т.

Часовая производительность транспортного агрегата определяется по формуле [17-19]:

$$W_{\text{ч}} = \frac{Q_n \lambda_{\text{г}}}{t_{\text{об}}}, \quad (5)$$

где Q_n – номинальная грузоподъемность, т;

$\lambda_{\text{г}}$ – коэффициент использования грузоподъемности;

$t_{\text{об}}$ – время транспортного цикла, ч.

Время транспортного цикла равно:

$$t_{\text{об}} = \frac{l_{\text{гп}}}{V_{\text{гп}}} + \frac{l_{\text{хх}}}{V_{\text{хх}}} + t_{\text{пп}}, \quad (6)$$

где $l_{\text{гп}}$, $l_{\text{хх}}$ – пробег с грузом, пробег без груза (холо-

стой или порожний), км;

$V_{ГР}$, $V_{ХХ}$ – скорость транспортного средства с грузом, без груза, км;

$t_{ПР}$ – время ожидания загрузки, ч.

Математическое ожидание показателя «время ожидания загрузки транспортным средством» составило 13,26 мин, или 0,22 ч.

Для определения скорости транспортного средства необходимо найти тяговое сопротивление прицепа с грузом и без него:

$$R_{ПР} = f_{ПП} G_{ПР}, \quad (7)$$

где $f_{ПП}$ – коэффициент сопротивления качению прицепа;

$G_{ПР}$ – вес прицепа, кН.

Для груженого прицепа: $R_{ПР} = 0,04 \cdot 255,8 = 10,2$ кН.

Для порожнего прицепа: $R_{ПР} = 0,04 \cdot 54,2 = 2,2$ кН.

Для трактора *Deutz-Fahr Agrottron 720* с груженым прицепом *Zugdeichsel* подбираем передачу III6, скорость движения 23,5 км/ч; с порожним прицепом – передача III9, скорость движения 39,5 км/ч:

$$t_{ОБ} = (12/23,5) + (12/39,5) + 0,22 =$$

$$= 0,51 + 0,3 + 0,22 = 1,03 \text{ ч,}$$

$$W_{ч} = (20,55/1,03) = 19,95 \text{ т/ч.}$$

Сменная производительность определяется по формуле:

$$W_{СМ} = Q_{НЛГ} n_p,$$

где n_p – количество рейсов за смену.

$$W_{СМ} = 20,55 \cdot 8 = 164,4 \text{ т.}$$

Расход топлива на одну перевезенную тонну зерна равен:

$$g_T = (G_{Т.Р} + G_{Т.П} + G_{Т.ПЕР} + G_{Т.ХД}) / W_{ч}, \quad (8)$$

где $G_{Т.Р} + G_{Т.П} + G_{Т.ПЕР} + G_{Т.ХД}$ – средние часовые расходы топлива в течение смены, кг/ч при выполнении основной (чистой) работы, холостых ходов и во время холостой работы двигателя (во время остановок агрегата с работающим двигателем). Средние часовые расходы топлива принимаются по справочным данным или расчетным путем через удельный расход топлива на 1 эффективную л.с. и степень загрузки двигателя. Коэффициент использования времени смены принимаем равным 0,75.

$$g_T = (15,45 \cdot 0,75 + 8,5 \cdot 0,25) / 19,95 = (11,6 + 2,1) / 19,95 = 0,69 \text{ кг/т.}$$

Для расчета примерной себестоимости 1 т перевезенного зерна используем амортизационные отчисления, приходящиеся на единицу выполненной работы, и стоимость топлива, расходуемого на перевозку 1 т зерна.

При расчете амортизационных отчислений учитываем:

- стоимость трактора *Deutz-Fahr Agrottron 720* – 14 866 000 руб.;

- стоимость прицепа – 3 444 000 руб.;

- норму амортизации – 9,1% (для обеих машин);

- число рабочих дней в году – 248 [20].

Амортизационные отчисления на единицу обрабатываемой площади определим по следующей формуле:

$$A_{ГА} = \frac{(C_{ТР} + C_{К}) N_{ам}}{D_p W_{СМ}}, \quad (9)$$

где $C_{ТР}$, $C_{К}$ – стоимость тракторов и борон соответственно, руб.;

$N_{ам}$ – норма амортизации, %;

D_p – число рабочих дней в году.

$$A_{ГА} = [(14686000 + 3444000) \cdot 9,1] / (248 \cdot 164,4) = 40,47 \text{ руб./т}$$

Стоимость топлива, расходуемого на транспортировку 1 т зерна, определяем по формуле:

$$З_T = g_T C_T = 0,69 \cdot 46,5 = 32,08 \text{ руб./т,} \quad (10)$$

где C_T – стоимость топлива, руб./кг. Для расчетов стоимость топлива взята по состоянию на 01.11.2020 года.

Затраты на оплату труда определяются по формуле:

$$З_{ОТ} = \tau_{час} T_{СМ} = 2007 \cdot 8 = 16\,056 \text{ руб,} \quad (11)$$

где $\tau_{час}$ – часовая тарифная ставка, руб.;

$T_{СМ}$ – продолжительность рабочей смены, ч.

Примерные затраты на перевозку 1 т зерна составляют 170,21 руб. Расходы на дневной объем перевозок одним транспортным средством составляют 27983,22 руб.

Выводы. На основании времени заполнения бункера можно рассчитать урожайность сельскохозяйственной культуры (в нашем случае это пшеница). По расчетному значению математического ожидания урожайность на полях первого уборочного отряда составила 4,03 т/га, во втором уборочном отряде – 48,2 т/га, а фактические данные – 4,13 и 4,96 т/га соответственно (погрешность 2,5 и 2,9%).

По урожайности можно определить необходимое количество транспортных средств для отвозки. При четырех транспортных средствах математическое ожидание по показателю «время ожидания загрузки транспортным средством» составило 13,26 мин, за рабочий день – 519 мин (8,65 ч), или 25,4% от дневного фонда рабочего времени транспортного отряда. Расчетное количество транспортных средств равно 3 ед. Смоделировав их работу, мы смогли на 21,4% сократить время на ожидание загрузки. Расчетное значение затрат на работу одного транспортного средства в течение одного дня составило 27983,22 руб. Эта сумма – ожидаемая примерная экономия от сокращения одного транспортного средства в транспортном отряде. Зная расстояние от поля до склада, можно вносить корректировку по количеству транспортных средств. При площади зерновых в сельхозорганизации около 6000 га и урожайности 4-5 т/га возможное снижение затрат на весь объем уборки составит 1129,8 тыс. руб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жалнин Э.В., Ценч Ю.С., Пьянков В.С. Методика анализа технического уровня зерноуборочных комбайнов по функциональным и конструктивным параметрам // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N2. С. 4-8.
2. Демин Е.Е., Старцев А.С., Нестеров Е.С., Бровкова Р.В. Результаты аналитических исследований технических параметров зерноуборочных комбайнов // *Аграрный научный журнал*. 2018. N9. С. 56-60.
3. Иовлев Г.А., Голдина И.И. Обзор испытаний зерноуборочных комбайнов на качество выполнения технологического процесса обмолота зерновых культур: Россия, Беларусь // *Теория и практика мировой науки*. 2017. N11. С. 56-61.
4. Успенский И.А., Кокорев Г.Д., Юхин И.А., Шафоростов В.А. Повышение эффективности уборочно-транспортных работ в агропромышленном комплексе на примере семячковых культур // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2018. N4 (40). С. 148-154.
5. Чеботарев М.И., Шапиро Е.А., Таран А.Д. Расчет гарантирующего количества рисоуборочных комбайнов в основном технологическом звене уборочно-транспортного комплекса // *Рисоводство*. 2018. N4 (41). С. 56-59.
6. Курочкин В.Н. Управление эффективностью уборочно-транспортного процесса согласованием производительностей его фаз с применением цифровой модели // *Вестник аграрной науки Дона*. 2019. N2 (46). С. 29-36.
7. Younus A., Jayan P.R. Performance Evaluation of Root Crop Harvesters. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2015. Vol. 11. Iss. 06. 38-52.
8. Dzhamburshin A.S., Turymbetova G.D. Substantiation of expedient parameters and operating modes of the stripping device for harvesting grain crops in Kazakhstan. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. Iss. 11. 691-698.
9. Das S.C., Panigrahi J.K., Mallik S.K.. Technological innovation and integration of enterprise applications (EA) for achieving operational excellence: an empirical analysis of trends in ERP system. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. Iss. 5. 733-741.
10. Iovlev G., Goldina I., Zorkov V. Optimization of the Composition of the Harvesting and Transport Complex. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10. Iss. 04. 152-161.
11. Kusumastutia R.D., van Donk D.P., Teunterb R. Crop-related harvesting and processing planning: a review. *International Journal of Production Economics*. 2016. Vol. 174. 76-92.
12. Астафьев В.Л., Султанов И.И. Обоснование транспортного обеспечения на уборочных работах // *Вестник науки и образования*. 2018. N15-1(51). С. 24-29.
13. Зимин В.К., Фаткин И.С. Функционирование технологических комплексов и систем в производственных процессах в агропромышленных комплексах // *Вестник Российского государственного аграрного заочного университета*. 2020. N32(37). С. 40-44.
14. Овчинников Н.И., Косарева А.В., Мошкин Н.И. Динамика изменения дневной производительности уборочной технологической системы с транспортным обеспечением // *Вестник ВСГУТУ*. 2018. N2(69). С. 32-37.
15. Петухов А.С., Алдошин Д.Н. Математическая модель для выбора оптимальных транспортных средств для сельскохозяйственных перевозок // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2018. N7-1. С. 22-24.
16. Тихоновский В.В., Блинский Ю.Н., Тихоновская К.В. Взаимодействие уборочно-транспортных машин при использовании большегрузного прицепа-перегрузателя // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2018. Т. 48. N2. С. 63-71.
17. Машков С.В., Казакова Е.С. Методика определения потребности в уборочных машинах // *Вестник СанГУПС*. 2018. N3(41). С. 15-20.
18. Бышов Н.В., Макаров В.А., Макарова О.В., Гаспарян С.В., Шемякин А.В. Эффективность и единство посевных и уборочных комплексов в зерновом подкомплексе // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2019. N3(43). С. 136-141.
19. Комаров В.А., Нуянзин Е.А., Курашкин М.И. Исследование влияния сезонной наработки зерно- и кормоуборочных комбайнов на продолжительность уборочных работ // *Техника и оборудование для села*. 2020. N1 (271). С. 36-39.
20. Ряднов А.И. Метод выбора транспортных средств при уборке сельскохозяйственных культур // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2020. N1(57). С. 349-356.

REFERENCES

1. Zhalnin E.V., Tsench Yu.S., P'yankov V.S. Metodika analiza tekhnicheskogo urovnya zernouborochnykh kombaynov po funktsional'nyim i konstruktivnym parametram [Methodology for analyzing the technical level of grain harvesters by functional and design parameters]. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N2. 4-8 (In Russian).
2. Demin E.E., Startsev A.S., Nesterov E.S., Brovkova R.V. Rezultaty analiticheskikh issledovaniy tekhnicheskikh parametrov zernouborochnykh kombaynov [The results of analytical studies of the technical parameters of grain harvesters]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2018. N9. 56-60 (In Russian).
3. Iovlev G.A., Goldina I.I. Obzor ispytaniy zernouborochnykh kombaynov na kachestvo vypolneniya tekhnologicheskogo protsessa obmolota zernovykh kul'tur: Rossiya, Belarus' [Review of tests of grain harvesters for the quality of the technological process of threshing grain crops: Russia, Belarus]. *Teoriya i praktika mirovoi nauki*. 2017. N11. 56-61 (In Russian).
4. Uspenskiy I.A., Kokorev G.D., Yukhin I.A., Shaforostov V.A. Povyshenie effektivnosti uborochno-transportnykh rabot v agropromyshlennom komplekse na primere semechkovykh kul'tur

[Increasing the efficiency of harvesting and transport operations in the agro-industrial complex on the example of pome crops]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2018. N4(40). 148-154 (In Russian).

5. Chebotarev M.I., Shapiro E.A., Taran A.D. Raschet garantiruyushchego kolichstva risuborochnykh kombaynov v osnovnom tekhnologicheskoy zvene uborochno-transportnogo kompleksa [Calculation of the guaranteed number of rice harvesters in the main technological link of the harvesting and transport complex]. *Risovodstvo*. 2018. N4(41). 56-59 (In Russian).

6. Kurochkin V.N. Upravlenie effektivnost'yu uborochno-transportnogo protsessa soglasovaniem proizvoditel'nostey ego faz s primeneniem tsifrovoy modeli [Management of the efficiency of the harvesting and transport process by coordinating the productivity of its phases with the use of a digital model]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2019. N2(46). 29-36 (In Russian).

7. Younus A., Jayan P.R. Performance Evaluation of Root Crop Harvesters. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2015. Vol. 11. Iss. 06. 38-52 (In English).

8. Dzhamburshin A.S., Turymbetova G.D. Substantiation of expedient parameters and operating modes of the stripping device for harvesting grain crops in Kazakhstan. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. Iss. 11. 691-698 (In English).

9. Das S.C., Panigrahi J.K., Mallik S.K. Technological innovation and integration of enterprise applications (EA) for achieving operational excellence: an empirical analysis of trends in ERP system. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. Iss. 5. 733-741 (In English).

10. Iovlev G., Goldina I., Zorkov V. Optimization of the Composition of the Harvesting and Transport Complex. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10. Iss. 04. 152-161 (In English).

11. Kusumastutia R.D., van Donk D.P., Teunter R. Crop-related harvesting and processing planning: a review. *International Journal of Production Economics*. 2016. Vol. 174. 76-92 (In English).

12. Astaf'ev V.L., Sultanov I.I. Obosnovanie transportnogo obespecheniya na uborochnykh rabotakh [Justification of transport support at harvesting works]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2018. N15-1(51). 24-29 (In Russian).

13. Zimin V.K., Fatkin I.S. Funktsionirovanie tekhnologicheskikh kompleksov i sistem v proizvodstvennykh protsessakh v agropromyshlennykh kompleksakh [Functioning of technological complexes and systems in production processes in agro-industrial complexes].

Vestnik Rossiiskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta. 2020. N32(37). 40-44 (In Russian).

14. Ovchinnikov N.I., Kosareva A.V., Moshkin N.I. Dinamika izmeneniya dnevnoy proizvoditel'nosti uborochnoy tekhnologicheskoy sistemy s transportnym obespecheniem [Dynamics of changes in the daily productivity of the harvesting technological system with transport support]. *Vestnik VSGUTU*. 2018. N2(69). 32-37 (In Russian).

15. Petukhov A.S., Aldoshin D.N. Matematicheskaya model' dlya vybora optimal'nykh transportnykh sredstv dlya sel'skokhozyaystvennykh perevozk [A mathematical model for choosing optimal vehicles for agricultural transport]. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2018. N7-1. 22-24 (In Russian).

16. Tikhonovskiy V.V., Blynskiy Yu.N., Tikhonovskaya K.V. Vzaimodeistvie uborochno-transportnykh mashin pri ispol'zovanii bol'shegruznogo pritsepa-peregruzhatelya [Interaction of harvesting transport machines when using a heavy-duty loading trailer]. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2018. Vol. 48. N2. 63-71 (In Russian).

17. Mashkov S.V., Kazakova E.S. Metodika opredeleniya potrebnosti v uborochnykh mashinakh [Methodology for determining the need for harvesting machines]. *Vestnik SanGUPS*. 2018. N3(41). 15-20 (In Russian).

18. Byshov N.V., Makarov V.A., Makarova O.V., Gasparyan S.V., Shemyakin A.V. Effektivnost' i edinstvo posevnykh i uborochnykh kompleksov v zernovom podkomplekse [Efficiency and unity of sowing and harvesting complexes in the grain sub-complex]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2019. N3(43). 136-141 (In Russian).

19. Komarov V.A., Nuyanzin E.A., Kurashkin M.I. Issledovanie vliyaniya sezonnoy narabotki zerno- i kormuborochnykh kombaynov na prodolzhitel'nost' uborochnykh rabot [Research of the influence of seasonal operating time of grain and forage harvesters on the duration of harvesting]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020. N1(271). 36-39 (In Russian).

20. Ryadnov A.I. Metod vybora transportnykh sredstv pri uborke sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Method of choosing vehicles for harvesting agricultural crops]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2020. N1(57). 349-356 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15.10.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 15.10.2020

Статья принята к публикации 25.11.2020
The paper was accepted
for publication on 25.11.2020

Разработка цифровой модели рабочего органа земледельческого орудия

Виктор Иванович Мяленко,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: library82@mail.ru

Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кемерово, Российская Федерация

Реферат. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель рабочего органа земледельческого орудия, позволяющую рассчитать и предвидеть его ожидаемое поведение в период всего срока эксплуатации. (*Цель исследования*) Разработать алгоритм последовательных моделей, составляющих цифровой двойник рабочего органа земледельческого орудия. (*Материалы и методы*) Первую составляющую алгоритма цифрового двойника определили методом ускоренных имитационных нагружений рабочего органа клина-рыхлителя, принятого в качестве объекта исследования. Вторую составляющую выявили методом тестирования различных почв с определением силовых эквивалентов. При описании последующих составляющих учитывали физико-механические свойства почв и материалы (упрочнения) для изготовления рабочих органов. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что алгоритм построения цифрового двойника рабочего органа земледельческого орудия складывается из цепочки последовательных действий и представляет систему цифрового описания рабочего органа, обеспечивающую нормативный срок службы при эксплуатации. В качестве первой составляющей алгоритма приняли результаты имитационного погружения, которые регистрируют характер распределения нормальных сил по поверхностям трения. Во второй составляющей учитывали результаты определения силового эквивалента при нагружении рабочего органа в условиях реальной почвенной среды. Выявили возможность построения карт интенсивностей абразивного износа поверхности трения, прогнозных расчетов элементов конструкции. Третью и четвертую составляющие применяли для обеспечения нормативного срока службы рабочего органа, исходя из минимальных затрат при изготовлении, соотнесенных к единице выработки нормативного ресурса. (*Выводы*) Полученный алгоритм построения цифрового двойника – удобный инструмент при создании новых конструкций рабочих органов земледельческих орудий. **Ключевые слова:** земледельческое орудие, цифровой двойник, имитационная модель, метод имитационных нагружений, динамический винт, номограмма определения ресурса работоспособности.

Для цитирования: Мяленко В.И. Разработка цифровой модели рабочего органа земледельческого орудия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 57-62. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-57-62.

Development of a Digital Model of the Agricultural Tool Working Element

Victor I. Myalenko,
Dr.Sc.(Eng.), professor
e-mail: library82@mail.ru

Kuzbass State Agricultural Academy, Kemerovo, Russian Federation

Abstract. The digital twin is a virtual model of the agricultural tool working element that allows you to calculate and predict its expected behavior during the entire period of operation. (*Research purpose*) To develop an algorithm for consistent models that make up the digital twin of the agricultural tool working element. (*Materials and methods*) The first component of the digital twin algorithm was determined by the method of accelerated imitation loading of the wedgelock ripper working element, which was accepted as the research object. The second component was determined by testing various soils with the specification of power equivalents. The physical and mechanical properties of soils and materials (hardening) for the manufacture of working elements were taken into account during the description of the following components. (*Results and discussion*) The author showed that the algorithm for constructing a digital twin of the agricultural tool working element consisted from a chain of successive actions and was a system for digital description of the working element, which ensured the standard lifetime during operation. The results of a simulated immersion which registered the nature of the normal forces distribution over the friction surfaces were accepted as the first component of the algorithm. The second component – the results of determining the force equivalent

when loading the working element in a real soil environment. The possibility of constructing maps of the intensity of the friction surface abrasive wear, predictive calculations of structural elements was revealed. The third and fourth components were used to ensure the working element standard lifetime, based on the minimum production costs, correlated to the standard resource unit of development. (*Conclusions*) The resulting algorithm for constructing a digital twin is a convenient tool for creating new designs of agricultural tools working elements.

Keywords: agricultural tool, digital twin, simulation model, method of simulated loading, dynamic screw, nomogram for determining the lifetime.

For citation: Myalenko V.I. Razrabotka tsifrovoy modeli rabocheho organa zemledel'cheskogo orudiya [Development of a digital model of the agricultural tool working element]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 0-0 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-2-0-0.

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель физического объекта, например рабочего органа земледельческого орудия, который воспроизводит его поведение в период реальной эксплуатации. Первоначальные характеристики и геометрические параметры рабочих органов постепенно изменяются в процессе эксплуатации земледельческих орудий вследствие абразивного износа или других причин, включая случаи поломок [1, 2]. Использование модели цифрового двойника позволяет предвидеть ожидаемое поведение рабочего органа в период эксплуатации и предотвратить возникновение критических ситуаций, не снижая качества выполнения технологического процесса за весь срок эксплуатации.

Для создания модели цифрового двойника необходимы длительный опыт наблюдений и данные о поведении рабочего органа в разных режимах реальной эксплуатации. К сожалению, это требует длительных затрат времени наблюдения с учетом сезонности и технологического разнообразия работ, в результате которых объект уже морально устаревает и требует каких-то конструктивных изменений. Поэтому необходимы методы ускоренных процессов и имитаций, которые адекватно отражают реальные процессы и помогают создать электронный паспорт с уравнениями, табличными материалами и математическими моделями, характеризующими работу в реальных условиях [3]. В настоящее время это особенно актуально, когда периодически меняются технологии возделывания сельскохозяйственных культур и требуются надежные конструкции новых рабочих органов земледельческих орудий.

Цель исследования – разработать алгоритм последовательных моделей, составляющих цифровой двойник рабочего органа земледельческого орудия.

Материалы и методы. Целевая функция состоит из нескольких переменных, описывающих разные процессы, которые одновременно воздействуют на рабочий орган в процессе его эксплуатации. В ходе анализа оценивали оптимальные соотношения между переменными по конечному критерию – минималь-

ным затратам на изготовление рабочего органа с обеспечением номинального ресурса работоспособности и качества выполнения технологического процесса [4].

Приборная база исследования включала стенд для ускоренных имитационных нагружений и устройства для пространственного динамометрирования рабочих органов в реальной среде эксплуатации. В качестве макетного образца опытного рабочего органа использовали клин-рыхлитель с лицевой поверхностью 120×120 мм. Абразивная среда представляла рыхлую почвенно-песчаную структуру с влажностью 20-25%, а угол рыхления клина – 30°.

Первая составляющая двойника получена на основе метода имитационных нагружений рабочего органа с последующим построением эпюр нормальных давлений, действующих со стороны обрабатываемой почвы. Вторую составляющую выявили методом тестирования различных почв с нахождением силовых эквивалентов внешнего нагружения. Далее использовали составляющие, учитывающие физико-механические свойства почв зон последующей эксплуатации и выбирали материалы (упрочнения) для изготовления рабочего органа, обеспечивающие нормативный срок службы и качество выполнения технологического процесса. В качестве объекта исследования приняли макетный образец клина-рыхлителя, прошедший этапы научно-исследовательских работ и агробиологической оценки.

Результаты и обсуждение. При нахождении эпюр нормальных давлений применяли метод имитационных ускоренных нагружений, поскольку в условиях реальной эксплуатации требуются длительные сроки наблюдений, вызванные сезонностью работ и сложностью соблюдения идентичности при необходимых повторностях. Принцип измерения нормальных давлений, действующих со стороны почвы на рабочий орган, в нашей работе был основан на практическом применении закона Амонтона-Кулона, где интенсивность трения и, как следствие, абразивного износа пропорциональна нормальному давлению [5]. Предварительно изучили разные методы измерения, в частности метод искусственных баз и методы нанесения

на поверхности трения легкоистираемых материалов покрытий – гальванических разных цветов или лакокрасочных [6]. В настоящей работе применяли имитационный метод (рис. 1).

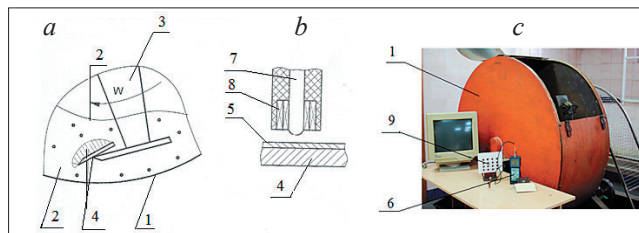


Рис. 1. Стенд для ускоренных имитационных испытаний рабочих органов земледельческих орудий на абразивный износ: а – схема нагружения рабочего органа; б – магнитоиндукционный измеритель толщины слоя легкоистираемого материала; с – общий вид стенда; 1 – круговая камера; 2 – почвенно-песчаная среда; 3 – стойка; 4 – рабочий орган; 5 – легкоистираемый материал; 6 – магнитоиндукционный прибор; 7 – сердечник; 8 – катушка; 9 – кондуктор

Fig. 1. Stand for accelerated imitation tests of agricultural tools working elements for abrasive wear: a – working element loading diagram; b – magneto-inductive meter for easily abrading material layer thickness; c – general view; 1 – circular chamber; 2 – soil-sandy environment; 3 – rack; 4 – working element; 5 – easily abrading material; 6 – magnetic induction device; 7 – core; 8 – coil; 9 – conductor

Внутри круговой камеры, заполненной почвенно-песчаной средой, находится стойка с рабочим органом. На поверхность трения рабочего органа нанесен легкоистираемый материал, толщина слоя которого измерялась магнитоиндукционным прибором с сердечником и катушкой с ориентированием по кондуктору [7]. Значения величин нормальных давлений определяли, ориентируясь на закон Амонтона-Кулона:

$$N = \frac{\Delta I}{\tan \varphi \cdot K_c}; \quad (1)$$

где: N – нормальное давление, Н;

ΔI – точечная величина измеренного износа на поверхности трения рабочего органа, мм;

φ – угол трения, рад.;

K_c – коэффициент сопротивляемости абразивному износу.

Полученные в разных точках длины L лицевой поверхности рабочего органа значения нормальных давлений N откладывали в масштабе на тех же точках с получением эпюры, описывающей $N=f(L)$. Для удобства дальнейшего обсуждения эпюру разместили в координатной плоскости XOY (рис. 2).

Граница эпюры характеризует распределение нормального давления по всей длине поверхности трения и может быть описана следующим уравнением:

$$y = -0,0008x^4 + 0,043x^3 - 0,838x^2 + 7,232x - 20,608 \quad (2)$$

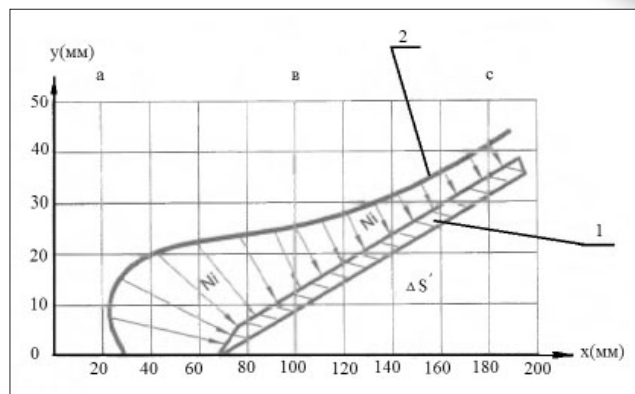


Рис. 2. Эпюра нормальных давлений, действующая по поверхности трения клина-рыхлителя: 1 – рабочий орган; 2 – верхняя граница эпюры

Fig. 2. Shear and moment diagram of normal pressures acting on the friction surface of the wedgelock ripper: 1 – working element; 2 – shear and moment diagram upper border

Судя по характеру распределения нормальных давлений, интервал эпюры от а до b более нагружен в сравнении с интервалом от b до с (рис. 2).

Вместе с тем вся площадь эпюры нормальных давлений по своему физическому смыслу представляет суммарную величину внешнего нагружения (давления), испытываемого рабочим органом. При этом площадь эпюры давления определяется исходя из уравнения:

$$\begin{aligned} S &= \int_{20}^{180} f(x)dx - \Delta S' = \\ &= \int_{20}^{180} (-0,0008x^4 + 0,043x^3 - 0,838x^2 + 7,232x - 20,608)dx - \Delta S' = 442,7 \text{ мм}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

где S – площадь эпюры, мм²;

$\Delta S'$ – площадь с отсутствием давления в пределах интервала интегрирования, мм².

Полученные зависимости (2) и (3) позволяют судить о характере изменения внешнего нагружения по поверхности трения, хотя реальные значения действующих нагрузок в конкретных средах эксплуатации орудий остаются неизвестными.

Вторую составляющую цифрового двойника нашли методом нагружения рабочего органа в условиях реального почвенного сложения (тестирование почв). С этой целью применили устройство для пространственного динамометрирования рабочих органов земледельческих орудий (рис. 3).

Тензометрические звенья воспринимают пространственные силовые характеристики, действующие на рабочий орган со стороны почвы [8]. Расчетная схема определения силового эквивалента представляет собой следующую последовательность:

$$P_x = \sum_{i=1}^6 P_{xi} = P_1 - P_2;$$

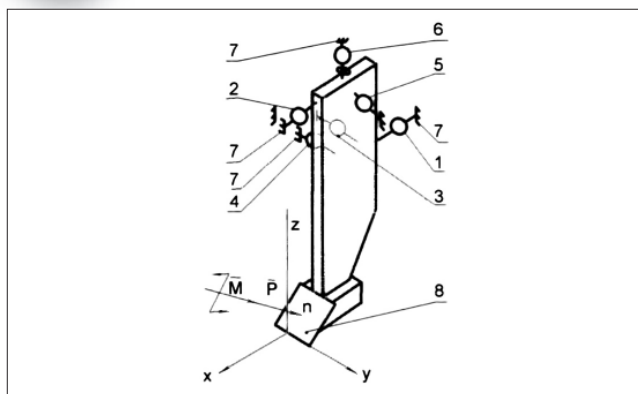


Рис. 3. Схема устройства для пространственного динамометрирования рабочего органа: 1-6 – тензометрические звенья; 7 – кронштейны; 8 – рабочий орган

Fig. 3. Diagram of the device for spatial dynamometry of the working element: 1-6 – strain gauge elements; 7 – brackets; 8 – working element

$$P_y = \sum_{i=1}^6 P_{yi} = P_3 + P_4 - P_5;$$

$$P_z = \sum_{i=1}^6 P_{zi} = P_6;$$

$$M_x = \sum_{i=1}^6 M_{xi} = P_6 \cdot h_{x6} - P_3 \cdot h_{x3} - P_4 \cdot h_{x4} + P_5 \cdot h_{x5};$$

$$M_y = \sum_{i=1}^6 M_{yi} = P_3 \cdot h_{y3} - P_2 \cdot h_{y2} - P_6 \cdot h_{y6};$$

$$M_z = \sum_{i=1}^6 M_{zi} = P_2 \cdot h_{z2} + P_3 \cdot h_{z3} - P_1 \cdot h_{z1} + P_4 \cdot h_{z4} - P_5 \cdot h_{z5},$$

где $P_1, P_2, \dots, P_6$ – усилия, регистрируемые в соответствующих тензометрических звеньях, Н;

h_{x1}, h_{y2}, h_{z3} и т.д. – плечи направления усилий относительно осей координат, м;

$P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z$ – проекции главного вектора P и главного момента M , Н, Нм.

Силовым эквивалентом являются главный вектор P и главный момент M , определяемые из системы уравнений (4). Для расчета центра давления на рабочий орган со стороны почвы (точка n) используем уравненные оси динамического винта и уравнение поверхности рабочего органа:

$$\begin{cases} \frac{M_x - (y \cdot P_z - z \cdot P_y)}{P_x} = \frac{M_y - (z \cdot P_x - x \cdot P_z)}{P_y} = \frac{M_z - (x \cdot P_y - y \cdot P_x)}{P_z}, \\ y = a + bx + cz. \end{cases} \quad (5)$$

где x, y, z – текущие координаты;

a, b, c – постоянные уравнения поверхности рабочего органа.

Решение систем уравнений (5) позволяет определить координаты точки пересечения оси динамического винта с поверхностью рабочего органа (точка n). Возвращаясь к эпюре нормальных давлений (рис. 2), показывающей характер распределения нормальных давлений по лицевой поверхности рабочего органа

при имитационном нагружении, и имея величины силового эквивалента, полученного в условиях реального нагружения, нетрудно установить величины реальных удельных давлений, ожидаемые в последующей практике эксплуатации рабочего органа:

$$\lambda = P / S, \quad (6)$$

где P – главный вектор, Н;

λ – удельное давление, Н/мм².

В зависимости (6) силовой эквивалент представлен только главным вектором P . Значения главного момента M здесь можно не учитывать, считая незначительным его влияние на величины нормальных давлений.

Например, полученная величина главного вектора в одном из наших измерений $P = 872$ Н. Согласно зависимости (3) при площади эпюры $S = 442,7$ мм² величина реального удельного давления определяется как $\lambda = 1,97$ Н/мм² (рис. 2).

Таким образом, сочетание имитационного моделирования и реального определения силового эквивалента дает возможность проведения прочностных расчетов конструкции рабочего органа по координатам центра давления, а также прогнозировать интенсивность абразивного изнашивания поверхности трения с построением карт абразивного износа (рис. 4).

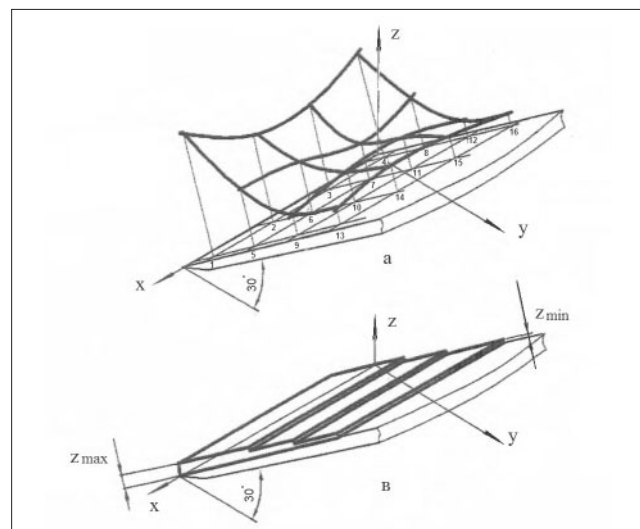


Рис. 4. Карта абразивного износа поверхности трения клина-рыхлителя: а – эпюра интенсивностей износа; б – упрочнение износостойким материалом; $z_{\max}, z_{\min}$ – толщина слоя упрочнения

Fig. 4. Map of wedge lock ripper friction surface abrasive wear: a – shear and moment diagram of wear rates; b – hardening with wear-resistant material; $z_{\max}, z_{\min}$ – hardening layer thickness

В зависимости от нормативных требований к срокам службы рабочего органа карта износа позволяет дифференцировать толщину нанесения наплавочного материала.

Следующие две составляющие алгоритма цифро-

вого двойника нацелены на выбор исходных материалов для изготовления рабочего органа и учета условий и свойств почв, где предполагается последующая эксплуатация сельскохозяйственного орудия. В конечном счете обеспечивается нормативный срок службы рабочего органа при неизменном качестве выполнения технологического процесса. Задача обеих составляющих заключается в обеспечении нормативного срока службы и решается путем выбора целесообразного соотношения между сортаментом материалов для изготовления (упрочнения поверхности трения) рабочего органа и учета абразивных свойств почвы зоны предполагаемой эксплуатации. При этом целесообразность выбора решения оценивается в нахождении минимального значения в соотношении суммы всех затрат на изготовление к единице нормативного срока службы рабочего органа.

Сегодня все почвы по изнашивающей способности можно разделить на три условные категории: первая – 1,3-3,0 г/га, вторая – 0,5-1,3, третья – 0,37-0,65 г/га применительно к стали Л 55 [8]. В то же время разные материалы, применяемые для изготовления поверхностей трения рабочих органов сельскохозяйственных орудий, также имеют неодинаковую относительную износостойкость. Принимая в качестве эталона сталь Л 53 за единицу, ко второй группе материалов можно отнести сплавы структуры аустенит + мартенсит и белый чугун – 2,5-3,5, а в третью группу войдут наплавочные материалы типа сормайт – 5,5 [9, 10].

Тогда последовательность выбора целесообразного материала для противостояния поверхности трения удобно проследить по формализованной номограмме (рис. 5).

На рисунке 5 в первой половине координатных осей номограммы сплошными линиями изображены лучи, характеризующие почвы с различной изнашивающей способностью, а во второй – материалы с различной относительной износостойкостью. Штриховыми линиями обозначен маршрут – ключ, начиная от учета свойств почв к выбору материалов, обеспечивающих нормативный ресурс.

Выводы. Алгоритм построения цифрового двойника рабочего органа сельскохозяйственного орудия сложен из цепочки последовательных действий и представляет систему цифрового описания рабочего органа, обеспечивающую нормативный срок службы при эксплуатации. В качестве первой составляющей алгоритма приняты результаты имитационного нагружения, которые регистрируют характер распре-

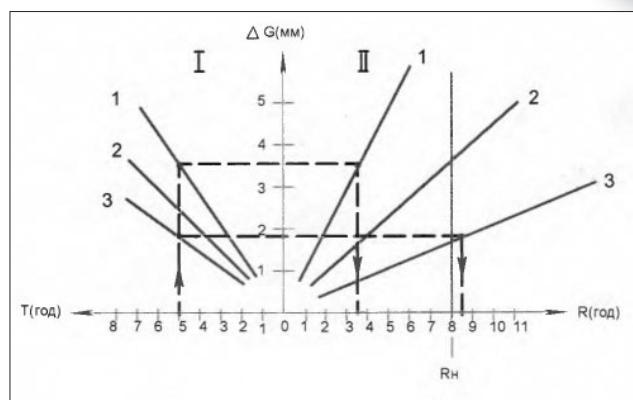


Рис. 5. Формализованная номограмма выбора свойств почв и материалов рабочего органа: T – время (продолжительность) истирания поверхности трения рабочего органа (сталь Л 55); ΔG – точечный вынос металла с поверхности трения; R , R_n – эксплуатационный и нормативный ресурс; I половина: 1, 2, 3 – почвы с различной изнашивающей способностью; II половина: 1, 2, 3 – группы материалов с различной относительной износостойкостью

Fig. 5. Formalized nomogram of the choice of soil properties and working element materials: T – the time (duration) of abrasion of working element friction surface (steel L 55); ΔG – metal point removal from friction surface; R , R_n – operational and standard resource; I half: 1, 2, 3 – soils with different wearing capacity; II half: 1, 2, 3 – groups of materials with different relative wear resistance

деления нормальных сил по поверхностям трения. Второй составляющей являются результаты определения силового эквивалента при нагружении рабочего органа в условиях реальной почвенной среды. Сочетание этих двух составляющих обеспечивает возможность построения карт интенсивностей абразивного износа поверхности трения. Кроме этого, можно найти центр внешнего давления на рабочий орган и провести прогнозные расчеты элементов конструкции.

Третья и четвертая составляющие нацелены на обеспечение нормативного срока службы рабочего органа, исходя из минимальных затрат при изготовлении, соотнесенных к единице выработки нормативного ресурса. Полученный алгоритм построения цифрового двойника – удобный инструмент при создании новых конструкций рабочих органов сельскохозяйственных орудий. Модели, составляющие алгоритма, могут быть усовершенствованы, усложнены и расширены для более адекватного отражения процесса движения рабочего органа в обрабатываемой среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс. 2008. 266 с.
2. Скиркус Р., Янкаускас В., Гайдис Р. Моделирование рабочих контактных нагрузок почвообрабатывающего эле-

мента // *Трение и износ*. 2016. Т. 37. N4. С. 510-515.

3. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузмишина А.М. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для ме- ханообрабатывающего производства // *Тенденции развития*

науки и образования. 2018. N45. С. 50-57.

4. Синягов С.А., Куприяновский В.П., Куренков П.В., Намиот Д.Е., Степаненко А.В., Бубнов П.М., Распопов В.В., Селезнев С.П., Куприяновская Ю.В. Строительство и инженерия на основе стандартов BIM как основа трансформаций инфраструктур в цифровой экономике // *International journal of open information technologies*. 2017. Т. 5. N5. С. 46-79.

5. Кузнецова С.В. Преимущества применения технологии «цифровых двойников» в зарубежном и отечественном производстве // *Проблемы экономики, финансов и управления производством*. 2019. N45. С. 49-57.

6. Хрущев М.М., Бабичев М.Д. Абразивное изнашивание. М.: Наука. 1970. 252 с.

7. Мясенко В.И. Карта абразивного износа поверхности трения почворезущей детали // *Трение и износ*. 2020. Т. 41. N1. С. 128-132.

8. Мясенко В.И., Маринов Н.А. Пространственное динамометрирование рабочих органов почвообрабатывающих орудий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. N5. С. 22-26.

9. Севернев М.М., Подлекарев Н.Н., Сохадзе В.Ш., Китков В.О. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин. Минск: Беларуская Навука. 2011. 334 с.

10. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. Основы трибологии (трение, износ, смазка). М.: Машиностроение. 2001. 664 с.

REFERENCES

1. Panov I.M., Vetokhin V.I. Fizicheskie osnovy mekhaniki pochv [Physical foundations of soil mechanics]. Kiev: Feniks. 2008. 266 (In Russian).

2. Skirkus R., Yankauskas V., Gaydis R. Modelirovanie rabochikh kontaktnykh nagruzok pochvoobrabatyvayushchego elementa [Modeling of working contact loads of a soil-cultivating element]. *Trenie i iznos*. 2016. Vol. 37. N4. 510-515 (In Russian).

3. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. Razrabotka tsifrovogo dvoynika rezhushchego instrumenta dlya mekhanooobrabatyvayushchego proizvodstva [Development of a digital twin of a cutting tool for machining production]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2018. N45. 50-57 (In Russian).

4. Sinyagov S.A., Kupriyanovskiy V.P., Kurenkov P.V., Namiot D.E., Stepanenko A.V., Bubnov P.M., Raspopov V.V., Seleznev S.P., Kupriyanovskaya Yu.V. Stroitel'stvo i inzheneriya na osnove standartov BIM kak osnova transformatsiy infrastruktur v tsifrovoy ekonomike [Construction and engineering based on BIM standards as a basis for transforming infrastructures in the digital economy]. *International journal of open information technologies*. 2017. Vol. 5. N5. 46-79 (In Russian).

5. Kuznetsova S.V. Preimushchestva primeneniya tekhnologii «tsifrovyykh dvoynikov» v zarubezhnom i otechestvennom proiz-

vodstve [Advantages of using the technology of «digital twins» in foreign and domestic production]. *Problemy ekonomiki, finansov i upravleniya proizvodstvom*. 2019. N45. 49-57 (In Russian).

6. Kkrushchev M.M., Babichev M.D. Abrzivnoe iznashivanie. [Abrasive wear] Moscow: Nauka. 1970. 252 (In Russian).

7. Myalenko V.I. Karta abrazivnogo iznosa poverkhnosti treniya pochvorezhushchey detali [The map of abrasive wear of the friction surface of the soil-cutting part]. *Trenie i iznos*. 2020. Vol. 41. N1. 128-132 (In Russian).

8. Myalenko V.I., Marinov N.A. Prostranstvennoe dinamometrirovanie rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh orudiy [Spatial dynamometry of the working elements of tillage implements]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017. Vol. 11. N5. 22-26 (In Russian).

9. Severnev M.M., Podlekarev N.N., Sokhadze V.Sh., Kitkov V.O. Iznos i korroziya sel'skokhozyaystvennykh mashin. [Wear and corrosion of agricultural machinery]. Minsk: Belaruskaya Navuka. 2011. 334 (In Russian).

10. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. Osnovy tribologii (trение, iznos, smazka) [Basics of tribology (friction, wear, grease)]. Moscow: Mashinostroenie. 2001. 664 (In Russian).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.06.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 08.06.2020

Статья принята к публикации 25.11.2020
The paper was accepted
for publication on 25.11.2020

Обоснование выбора системы позиционирования для управления движением мобильного сельскохозяйственного робота

Артем Валерьевич Тетерев,
младший научный сотрудник,
e-mail: artemteterevwork@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Правильно подобранная система позиционирования для управления движением мобильного робототехнического средства обеспечивает высокую точность позиционирования роботизированной платформы на территории сада, позволяет автоматизировать точные операции в саду и систематизировать алгоритмы построения маршрута. (*Цель исследования*) Обосновать рациональный выбор системы позиционирования для управления движением мобильного робототехнического средства. (*Материалы и методы*) Сформировали требования к системе позиционирования для выполнения точных операций в саду, а именно: механизированный сбор плодов и ягод, дифференцированное внесение удобрений и средств химической защиты растений. Назвали основные из них: погрешность определения местоположения не более 5 сантиметров, устойчивость передачи информации на сервер для построения карт движения, движение робототехнического средства по заданной траектории, оснащение маяков мобильным источником питания емкостью не менее 800 миллиампер-час, обмен информацией между маяком и встроенным в робототехническое средство микропроцессорным контроллером по стандарту RS-485, площадь покрытия сигнала не менее 100 квадратных метров. (*Результаты и обсуждение*) Описали шесть наиболее актуальных систем позиционирования следующих производителей: RealTrac, Русофт ЦКТ, Неоматика, ISBC, Avtosensor, Marvelmind. Сравнили их технические и эксплуатационные параметры: рабочие частоты, дальность действия, интерфейс передачи данных, точность определения местоположения и стоимость готовых комплектов. Показали, что Marvelmind обеспечивает бесперебойную работу на частотах 433 и 915 мегагерц с погрешностью определения местоположения не более 2 сантиметров. Провели испытания на малогабаритном роботизированном транспортно-технологическом средстве со следующими характеристиками: максимальная транспортная скорость движения – 30 километров в час, эксплуатационная масса – 500 килограммов, длина 2 метра, ширина – 1,2 метра, высота – 1,6 метра. (*Выводы*) Обосновали выбор наиболее подходящей и доступной системы позиционирования Marvelmind и экспериментально подтвердили заявленную производителем точность позиционирования. При движении по беспетлевому и петлевому повороту точность позиционирования не превысила 1,5 сантиметра, что соответствует агротехническими требованиями к механизированному сбору плодов и ягод, к дифференцированному внесению удобрений и средств химической защиты растений.

Ключевые слова: система позиционирования, метка позиционирования, RFID-метка, ультразвуковой маяк, считыватель, робототехника.

Для цитирования: Тетерев А.В. Обоснование выбора системы позиционирования для управления движением мобильного сельскохозяйственного робота // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 63-70. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-63-70.

Rationale for the Choice of a Positioning System for Mobile Agricultural Robot Movement Controlling

Artem V. Teterev,
junior researcher,
e-mail: artemteterevwork@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. A correctly selected positioning system for controlling the mobile robotic means movement ensures high positioning accuracy of the robotic platform in the garden, allows to automate precise operations in the garden and systematize route planning algorithms. (*Research purpose*) To substantiate the rational choice of a positioning system for controlling the mobile robotic

device movement. (*Materials and methods*) The author formulated requirements for the positioning system to perform precise operations in the garden: mechanized collection of fruits and berries, differentiated application of fertilizers and chemical plant protection products. The main ones were: the positioning error was no more than 5 centimetres, the stability of information transfer to the server for building traffic maps, the movement of a robotic device along a given trajectory, equipping beacons with a mobile power source with a capacity of at least 800 milliampere-hour, information exchange between the beacon and the built-in robotic means with a microprocessor controller according to the RS-485 standard, the signal coverage area was at least 100 square meter. (*Results and discussion*) The six most relevant positioning systems of the following manufacturers were described: RealTrac, Rusoft CKT, Neomatic, ISBC, Avtosensor, Marvelmind. The author compared their technical and operational parameters: operating frequencies, range, data transfer interface, location accuracy and cost of ready-made kits. He showed that Marvelmind provided uninterrupted operation at frequencies of 433 and 915 megahertz with a positioning error of no more than 2 centimetres. The tests were carried out on a small robotic vehicle with the following characteristics: maximum transport speed – 30 kilometre per hour, operating weight – 500 kilograms, length 2 metres, width – 1.2 metres, height – 1.6 metres. (*Conclusions*) The author substantiated the choice of the most suitable and affordable Marvelmind positioning system and experimentally confirmed the positioning accuracy declared by the manufacturer. When driving in a loop-free and looped turn, the positioning accuracy did not exceed 1.5 centimetres, which met the agrotechnical requirements for mechanized collection of fruits and berries, for differentiated application of fertilizers and chemical plant protection products.

Keywords: positioning system, positioning tag, RFID tag, ultrasonic beacon, reader, robotics.

For citation: Teterev A.V. Obosnovanie vybora sistemy pozitsionirovaniya dlya upravleniya dvizheniem mobil'nogo sel'skokhozyaystvennogo robota [Rationale for the choice of a positioning system for mobile agricultural robot movement controlling]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 63-70 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-63-70.

Для оптимизации и управления технологическими рабочими процессами в сельском хозяйстве применяют специализированные системы глобального и локального позиционирования. Они позволяют отслеживать местоположение персонала, специализированного оборудования, животных, вести учет поголовья скота, систематизировать сбор данных и планировать ветеринарные мероприятия, идентифицировать сельскохозяйственную технику и прицепные оборудования. Существует множество различных устройств для реализации систем локального позиционирования с разной точностью и методами отслеживания. Стоимость таких комплектов варьируется в зависимости от назначения и может составлять от десяти тысяч рублей для оснащения игровых вертолетов и до нескольких миллионов рублей для реализации позиционирования на целом производстве.

Цель исследования – обосновать рациональный выбор системы позиционирования для управления движением мобильного робототехнического средства (РТС) по территории сада.

Материалы и методы. Для выполнения механизированного сбора плодов и ягод, дифференцированного внесения удобрений и средств химической защиты растений сформировали следующие требования к системе позиционирования:

- возможность определения местоположения в реальном времени;
- передача информации на сервер для построения карт движения;
- реализация движения РТС по заданной траектории;

- оснащение маяков мобильным источником питания;
- передача информации о местоположении маяка на встроенный в РТС микропроцессорный контроллер по стандарту RS-485;
- площадь покрытия 100 м²;
- точность определения местоположения ±5 см.

Результаты и обсуждение. Для анализа выбрали наиболее часто используемые технологии позиционирования:

- радиочастотная идентификация – радиометки, радиомаяки, *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *BLE*, *UWB* [1];
- спутниковое отслеживание – ГЛОНАСС, *GPS* [2];
- позиционирование в сотовых сетях через мобильную связь.

В большинстве систем позиционирования применяется технология *GPS*/ГЛОНАСС [3]. Она относится к глобальному позиционированию с помощью спутников и не поддерживает необходимой точности определения местоположения [4]. В отличие от нее, локальные технологии *Bluetooth* и *Wi-Fi* обеспечивают большую точность, системы с ними можно использовать в закрытых помещениях, однако радиус действия будет ограничен [5]. Стандарт *BLE* (*Bluetooth Low Energy*) – это версия спецификации ядра технологии *Bluetooth*, применяется для уменьшения размера конечного устройства [6]. *UWB* (*Ultra-Wide Band*) – беспроводная технология связи на малых расстояниях при низких затратах энергии, работающая на радиочастотах 2,85-10,6 ГГц в Российской Федерации. Она хорошо подходит для применения в помещениях [7]. С помощью радиомаяков и радиометок можно

повысить точность системы. Чтобы расширить площадь позиционирования, увеличивают количество радиомаяков в системе [8, 9]. Часто для улучшения точности позиционирования применяют системы с использованием нескольких технологий.

Для управления движением РТС рассмотрели шесть наиболее актуальных систем локального позиционирования в сельском хозяйстве: *RealTrac*, Русофт ЦКТ, Неоматика, *ISBC*, *Avtosensor*, *Marvelmind*.

Комплекс оборудования системы *RealTrac* состоит из меток, базовых станций *Lora* и программного обеспечения (рис. 1) [10]. Метки устанавливают на отслеживаемые объекты, на территории монтируют точки доступа *Lora*. Модуль *GPS*/ГЛОНАСС генерирует и передает данные позиционирования на сервер в режиме реального времени с помощью сети *Lora* (866 МГц). Программное обеспечение сервера обрабатывает поступающую информацию и выводит данные о местонахождении отслеживаемых объектов и их пройденном маршруте. Точность позиционирования – 1-5 м, радиус покрытия – 2 км.

Система позволяет обеспечить позиционирование в саду, отображать маршруты передвижения персонала, определять запретные и информационные зоны на территории ведения работ. Кроме того, возможно применение черного ящика для фиксирования данных о перемещении при выходе метки позиционирования из зоны действия сети передачи данных и последующей передаче данных в полном объеме на сервер при возвращении метки в зону позиционирования. Система обладает большим радиусом покрытия, но имеет низкую точность позиционирования.



Рис. 1. Модель системы позиционирования *RealTrac*
Fig. 1. *RealTrac* Positioning System Model

Системы позиционирования, основанные на применении мобильных сетей, схожи по своему принципу работы с данной системой. Максимальная точность определения местоположения таких систем достигает 10 см.

В комплекте идентификации и учета объектов компании Русофт ЦКТ применяется технология использования радиочастотного электромагнитного излучения – *RFID* (*Radio Frequency Identification*). В его состав входит транспондер – метка, состоящая из двух частей: интегральной схемы для хранения и обработ-

ки информации и антенны для приема и передачи информации, а также считывающее устройство для обработки и распознавания информации, дополнительно осуществляется запись данных в *RFID*-метки (рис. 2) [11].

RFID-метки существуют в разных исполнениях: металлические пластины, силиконовые браслеты, наклейки с чипом. Рабочие диапазоны меток – 860-960 МГц, дальность считывания – 4-12 м.

Различают стационарные и мобильные *RFID*-считыватели. Первые определяют местонахождение маркированных объектов на расстоянии до 12 м через внешние антенны в диапазоне 902,75-927,25 МГц и могут одновременно работать с большим количеством меток, достигающим до нескольких тысяч. Вторые позволяют оператору видеть маркированные метками объекты, работать с документами или искать конкретную метку, функционируют в частотных диапазонах 865-868 МГц и 902-928 МГц и считывают метки на расстоянии до 6 м.

Применение *RFID*-технологии целесообразно при учете сельскохозяйственного оборудования и транспорта на территории сада. Она позволяет идентифицировать метки, но не обеспечивает локального позиционирования объектов.

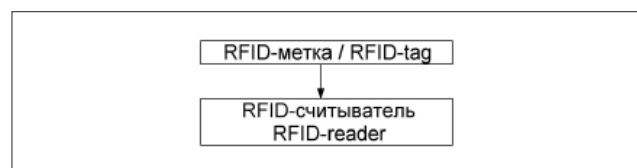


Рис. 2. Модель системы позиционирования Русофт ЦКТ
Fig. 2. Positioning system model of Rusoft CKT

В системе Неоматика предусмотрены определение местоположения объекта, сбор информации с датчиков давления, температуры и влажности окружающей среды, наклона и уровня топлива (рис. 3). Расположенный на объекте приемник получает данные с датчиков по *Bluetooth* на расстоянии до 100 м и данные о своем местоположении по стандарту *GPS*/ГЛОНАСС. Затем передает их по *Bluetooth* на сервер или записывает на встроенный накопитель. Приемник имеет возможность выбора навигационной системы: ГЛОНАСС, *GPS*, ГЛОНАСС+*GPS*. Он может быть настроен с помощью приложения по *Bluetooth* и поддерживает управление через *Bluetooth*, *SMS*, *GPRS*. Точность позиционирования объектов – 1 м, что не соответствует предъявленным требованиям.

Система позиционирования *ISBC* основана на *RFID*-технологии. Она позволяет автоматизировать учет животных, а также работу ветеринаров и зоотехников (рис. 4). Каждому животному присваивается оригинальная личная метка, помогающая фиксировать информацию о перемещении животного и идентифицировать его, например при взвешивании. Дан-

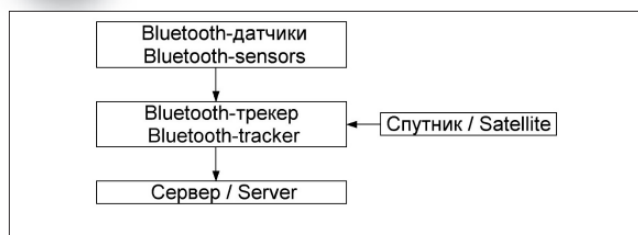


Рис. 3. Модель системы позиционирования Neomatica

Fig. 3. Positioning system model of Neomatica

ные о живой массе передаются в блок управления весами и в считыватель для планирования ветеринарных и зоотехнических мероприятий. Метки считываются на расстоянии 0,1-1,0 м. Считыватель работает на частоте 134,2 кГц при диапазоне считывания 0,5 м. Данная система позволяет идентифицировать объекты, но не обеспечивает локального позиционирования.

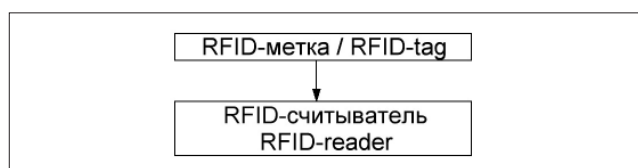


Рис. 4. Модель системы позиционирования ISBC

Fig. 4. Positioning system model of ISBC

Систему позиционирования *Avtosensor* задействуют, когда надо определить местоположение прицепов, навесных орудий, инструментов и прочей сельскохозяйственной техники (рис. 5). Радиометка передает свой уникальный номер на приемник по радиоканалу 2,4 ГГц и служит идентификатором. Приемник может принимать по радиоканалу данные одновременно от 80 радиометок на расстоянии до 200 м и передавать полученные данные на терминал по шине RS-485. Терминал предназначен для обработки и передачи данных на приемник со встроенных в сельскохозяйственную машину модулей GPS/ГЛОНАСС. Система не соответствует исходным требованиям, так как не может обеспечить позиционирование на сельскохозяйственной технике без установленных модулей GPS/ГЛОНАСС.

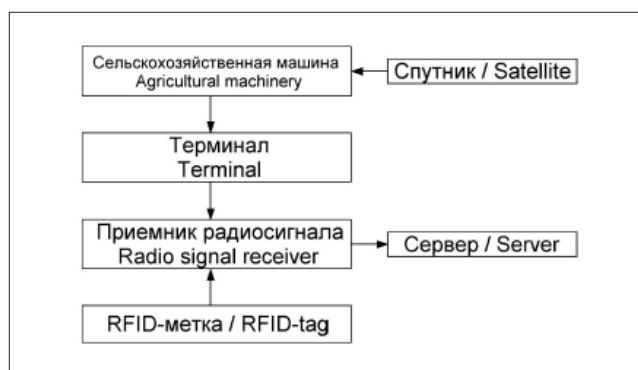


Рис. 5. Модель системы позиционирования Avtosensor

Fig. 5. Positioning system model of Avtosensor

Система фирмы *Marvelmind robotics* предназначена для установки внутри самоходных роботов, используется для комплексного отслеживания объектов или людей, имеющих специальные маяки (рис. 6). Она представляет собой набор ультразвуковых маяков, которые синхронизированы друг с другом по безлицензионному диапазону частоты. Определение собственных координат осуществляется на основе задержки возврата ультразвуковых волн при достижении стационарных маяков методом трилатерации [12-15]. Стационарные маяки устанавливают по заданной территории для отслеживания координат местоположения в трех плоскостях. Система работает на частотах 433 или 915 МГц. Маяки имеют встроенный аккумулятор емкостью 1000 мА·ч. Точность измерения местоположения составляет 2 см, а площадь покрытия достигает 1000 м².

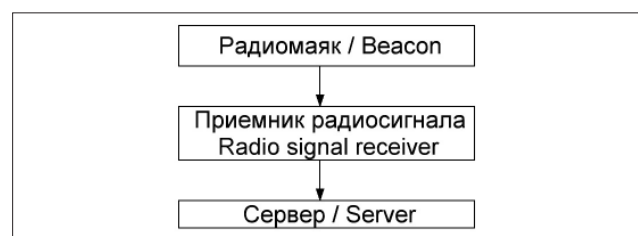


Рис. 6. Модель системы позиционирования Marvelmind

Fig. 6. Positioning system model of Marvelmind

Провели сравнительный анализ технических и эксплуатационных параметров систем локального позиционирования (таблица).

Выяснили, что система компании *Marvelmind* может обеспечить заданную точность позиционирования и работать без применения систем спутникового отслеживания, что важно при выборе системы позиционирования для РТС. С помощью дополнительного маяка можно осуществить мониторинг не только положения, но и направления РТС. Система работает на безлицензионных частотах и имеет возможность передачи данных по интерфейсу RS-485 в микропроцессорный контроллер, установленный в РТС. Для определения координат местоположения маяка применяют метод трилатерации [16]. Принцип ее работы заключается в построении на местности системы смежных треугольников, в которых измеряются длины сторон (рис. 7).

Углы в треугольнике вычисляют по одной из следующих формул:

$$\cos \alpha = \frac{2p(p-a)}{bc} - 1;$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{bc}{p(p-a)}} - 1; \quad p = \frac{a+b+c}{2}, \quad (1)$$

где a , b и c – стороны треугольника, м;

p – полупериметр треугольника, м.

Среднюю квадратическую ошибку вычисленного угла можно определить по следующей формуле:

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ COMPARATIVE ANALYSIS OF POSITIONING SYSTEMS					
Наименование Name	Рабочие частоты Operating frequency	Дальность, м Range	Интерфейс передачи данных Interface	Точность Accuracy	Стоимость, тыс. руб. Cost
RealTrac	866 МГц, GPS/ГЛОНАСС	1000	–	1-5 м	900
Русофт ЦКТ Rusoft CKT	902,75-927,25 МГц, 865-868 МГц, 902-928 МГц	12	RS232	–	600
Неоматика / Neomatika	Bluetooth, GPS/ГЛОНАСС	100	–	–	20
ISBC	134,2 кГц, 125 кГц	9-91	RS232	–	100
Avtosensor	2,4 ГГц	200	RS485	–	15
Marvelmind	433 МГц, 915 МГц	50	RS485	2 см	40

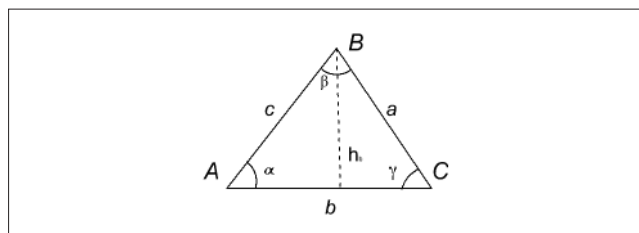


Рис. 7. Модель треугольника трилатерации

A, B, C – вершины треугольника; α, β, γ – углы треугольника; a, b, c – стороны треугольника; h_a – высота треугольника, опущенная из вершины на сторону a

Fig. 7. Model of the trilateration triangle

A, B, C – triangle vertices; α, β, γ – triangle angles; a, b, c – triangle sides; h_a – triangle height lowered from the vertex to the side a

$$m_\alpha^2 = \beta^2 (A^2 m_a^2 + B^2 m_b^2 + C^2 m_c^2), \quad (2)$$

где β – среднее значение связующего угла ряда;

m_a, m_b и m_c – средние квадратические ошибки измерения сторон;

$$A = \frac{1}{h_a};$$

$$B = A \sqrt{1 - \left(\frac{h_a}{b}\right)^2};$$

$$C = A \sqrt{1 - \left(\frac{h_a}{c}\right)^2}, \quad (3)$$

где h_a – высота треугольника, опущенная из вершины на сторону a , м.

Из цепочки треугольников создают сеть трилатерации для линейно протяженных объектов (рис. 8).

Одним из основных недостатков вытянутого ряда цепочки треугольников с измеренными сторонами считается то, что в таких сетях поперечный ряд m_u существенно превышает продольный m_t .

При оценке ожидаемой точности ряда равносторонних треугольников трилатерации используют формулы:

а) для продольного сдвига:

$$m_t = m_s \sqrt{\frac{N}{2}} \quad (\text{при } N \text{ четном}); \quad (4)$$

$$m_t = m_s \sqrt{\frac{N-1}{2}} \quad (\text{при } N \text{ нечетном}), \quad (5)$$

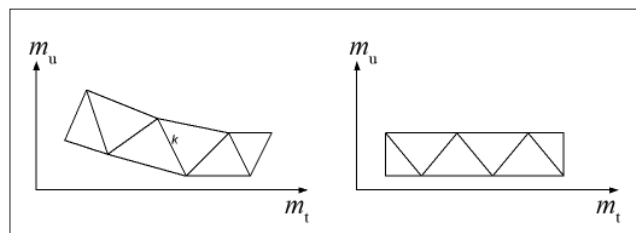


Рис. 8. Модель цепей треугольников сети трилатерации

m_u, m_t – поперечный и продольный ряд цепочки треугольников; k – порядковый номер связующей стороны

Fig. 8 Triangle chains model of the trilateration network

m_u, m_t – transverse and longitudinal row of a chain of triangles; k – serial number of the connecting side

где m_s – средняя квадратическая ошибка измерения сторон;

N – число фигур ряда;

б) для поперечного сдвига:

$$m_u = m_s \sqrt{0,111k^3 + 0,25k^2 + 1,3k}, \quad (6)$$

где k – порядковый номер связующей стороны;

в) для дирекционного угла связующей стороны:

$$m_{\alpha k} = \frac{m_s \rho}{S} m_s \sqrt{1,33k + 0,67}, \quad (7)$$

где S – длина связующей стороны треугольников, м.

Программное обеспечение системы *Marvelmind* находится в свободном доступе вместе с пошаговой инструкцией по установке комплекта на территории. На территории сада устанавливают маяки на расстоянии не более 50 м друг от друга (рис. 9). Мобильный маяк фиксируют на работе для позиционирования относительно стационарных маяков [17].

Для обеспечения навигации по саду необходимо расположить по маяку на каждой стороне территории. При помощи встроенного в каждый маяк компаса координаты системы позиционирования привязываются к координатам карты сада. Для этого определяют азимут базовой стороны сада, на котором расположен маяк 1. Это положение служит началом координат системы позиционирования и имеет координаты (0,0). Для определения начала координат карты необходимо расположить мобильный маяк в точке A .

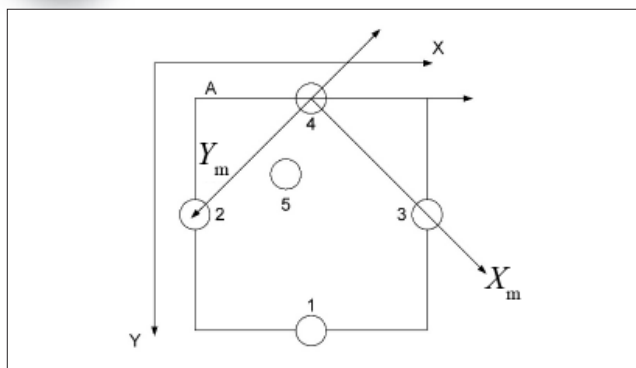


Рис. 9. Взаимное расположение систем координат Marvelmind и сада: 1-4 – расположение стационарных маяков; 5 – расположение мобильного маяка; X, Y – системы координат карты сада; X_m, Y_m – системы координат Marvelmind

Fig. 9. The relative position of the Marvelmind coordinate systems and the garden: 1 - 4 – location of stationary beacons, 5 – location of a mobile beacon. X, Y – coordinate systems of the garden map. X_m, Y_m – Marvelmind coordinate systems

Далее вычисляют угол между осями карты сада и карты системы позиционирования, что позволит пересчитывать координаты карты в координаты системы позиционирования.

В соответствии с указанной выше методикой экспериментально подтвердили заданную точность позиционирования. При проведении испытаний систему позиционирования устанавливали на малогабаритное роботизированное транспортно-технологическое средство (рис. 10).



Рис. 10. Малогабаритное роботизированное транспортно-технологическое средство

Fig. 10. Small-sized robotic transport and technological vehicle

Оно предназначено для транспортирования или буксирования в прицепе малогабаритных грузов массой до одной тонны. Максимальная транспортная скорость движения роботизированного средства – 30 км/ч,

эксплуатационная масса – 500 кг, габаритные размеры ($Д \times Ш \times В$) – 2,0×1,2×1,6 м.

После сопряжения и калибровки маяков погрешность определения местоположения не превышала 1 см. Для подтверждения заявленной производителем точности позиционирования провели тестирование на необходимой для выполнения агротехнических процессов в садоводстве скорости транспортного средства – 4 км/ч. Изучили траектории движения роботизированного средства по беспетлевому и петлевому повороту (рис. 11). Максимальная погрешность позиционирования составила 1,5 см, что соответствует агротехническими требованиями к механизированному сбору плодов и ягод, дифференцированному внесению удобрений и средств химической защиты растений.

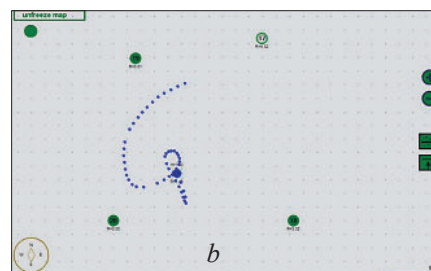
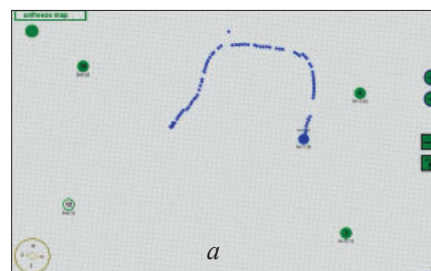


Рис. 11. Траектория движения робототехнического средства с беспетлевым (а) и петлевым (б) поворотом

Fig. 11. Trajectory of robotic vehicle movement with loopless (a) and looped (b) rotation

Выводы. Установили, что на рынке представлено большое количество систем позиционирования. Однако из-за использования разных методов определения местоположения каждой системы их технические и эксплуатационные параметры сильно варьируются, что ограничивает их применение в реальных агротехнологиях и не обеспечивает точности позиционирования в соответствии с агротехническими требованиями.

Сформировали требования к системе позиционирования для выполнения точных операций в саду. Обосновали выбор наиболее подходящей и доступной системы позиционирования – Marvelmind. Описали принцип ее работы и метода определения местоположения – трилатерации.

Экспериментально подтвердили заявленную производителем точность позиционирования – не более 1,5 см.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богуренко П.А., Бурлаков М.Е. Обзор методов локального позиционирования объектов в WI-FI сетях // *Вестник ПНИПУ*. 2017. N23. С. 146-158.
2. Овчинников С. Системы позиционирования и мониторинга // *Технологии и средства связи*. 2014. N2. С. 18-22.
3. Миниахметов Р.М., Рогов А.А., Цымблер М.Л. Обзор алгоритмов локального позиционирования для мобильных устройств // *Вестник Южно-Уральского Государственного университета*. 2013. N2-2. С. 83-95.
4. Соколин Д.Д. (научный руководитель Пароткин Н.Ю.). О решении задачи локального позиционирования объектов в помещениях // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2017. Т. 2. N13. С. 239-241.
5. Yang Q., Zheng S., Liu M., Zhang Y. Research on Wi-Fi indoor positioning in a smart exhibition hall based on received signal strength indication. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*. 2019. N1. 275.
6. Ассур О.С., Филаретов Г.Ф. Разработка комплексного метода позиционирования объектов по данным беспроводных сетей Wi-Fi и устройств BLE (Bluetooth Low Energy) // *Известия института инженерной физики*. 2015. N2(36). С. 2-10.
7. Дмитриев В. Технология передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов (UWB) // *Компоненты и технологии*. 2004. N1(36). С. 64-67.
8. Харламов М.И., Гончаровский О.В. Навигация автономного робота с помощью системы позиционирования для помещений // *Автоматизированные системы управления и информационные технологии*. 2018. С. 110-112.
9. Ladd A.M., Bekris K.E., Rudys A., et al. Robotics-based Location Sensing Using Wireless Ethernet. Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York. USA: ACM. 2002. 227-238.
10. Гимаранов Р.Р., Киричек Р.В., Шпаков М.Н. Технология межмашинного взаимодействия LORA // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2015. Т. 3. N2. С. 62-73.
11. Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. New York: John Wiley & Sons. 2003. 462.
12. Пантюхин А.Р., Беляев А.С. Система определения местоположения объектов внутри помещений // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. N10-3(64). С. 81-84.
13. Колмаков Ю.А., Перевезенцев И.Н. Влияние корреляции свободных членов ряда трилатерации на оценку точности измеренных сторон // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. 2010. N2(50). С. 70-72.
14. Соколов Ю.Г., Тимошенко Н.А., Данильченко П.М. К вопросу составления условных уравнений в геодезических сетях из треугольников с измеренными сторонами // *Полиграфический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2007. N28. С. 34-40.
15. Андоленко В.И., Ключин Е.Б. Исследование точности радиальных симметричных сетей трилатерации // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 1990. N2. С. 3-12.
16. Авакян В.В. Прикладная геодезия: технологии инженерно-геодезических работ. М.: Инфра-Инженерия. 2016. 588 с.
17. Харламов М. И., Гончаровский О.В. Навигация автономного мобильного робота с помощью системы позиционирования Marvelmind // *Инновационные технологии: теория, инструменты, практика*. 2017. Т. 1. С. 56-60.

REFERENCES

1. Bogurenko P.A., Burlakov M.E. Obzor metodov lokal'nogo pozitsionirovaniya obektov v WI-FI setyah [Review of methods for local positioning of objects in WI-FI networks]. *Vestnik PNIPIU*. 2017. N23. 146-158 (In Russian).
2. Ovchinnikov S. Sistemy pozitsionirovaniya i monitoringa [Positioning and monitoring systems]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2014. N2. 18-22 (In Russian).
3. Miniaxmetov R.M., Rogov A.A., Cymbler M.L. Obzor algoritmov lokal'nogo pozitsionirovaniya dlya mobil'nykh ustroystv [Review of local positioning algorithms for mobile devices]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo universiteta*. 2013. N2-2. 83-95 (In Russian).
4. Sokolin D.D. Nauchnyy rukovoditel' –Parot'kin N.Yu. O reshenii zadachi lokal'nogo pozitsionirovaniya obektov v pomeshcheniyah [On the solution of the problem of local positioning of objects in premises]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2017. Vol. 2. N13. 239-241 (In Russian).
5. Yang Q., Zheng S., Liu M., Zhang Y. Research on Wi-Fi indoor positioning in a smart exhibition hall based on received signal strength indication. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*. 2019. N.1. 275 (In English).
6. Assur O.S., Filaretov G.F. Razrabotka kompleksnogo metoda pozitsionirovaniya obektov po dannym besprovodnykh setey Wi-Fi i ustroystv BLE (Bluetooth Low Energy) [Development of an integrated method for positioning objects according to data from wireless Wi-Fi networks and BLE (Bluetooth Low Energy) devices]. *Izvestiya instituta inzhenernoy fiziki*. 2015. N2(36). 2-10 (In Russian).
7. Dmitriev V. Tekhnologiya peredachi informatsii s ispol'zovaniem sverkhshirokopolosnykh signalov (UWB) [Technology of information transmission using ultra-wideband signals (UWB)]. *Komponenty i tekhnologii*. 2004. N1. (36). 64-67 (In Russian).
8. Harlamov M.I., Goncharovskiy O.V. Navigatsiya avtonomnogo robota s pomoshch'yu sistemy pozitsionirovaniya dlya pomeshcheniy [Navigation of an autonomous robot using a positioning system for rooms]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2018. 110-112 (In Russian).

9. Ladd A.M., Bekris K.E., Rudys A., et al. Robotics-based Location Sensing Using Wireless Ethernet. Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York City. USA: ACM. 2002. 227-238 (In English).

10. Gimaranov R.R., Kirichek R.V., Shpakov M.N. Tekhnologiya mezhmashinnogo vzaimodeystviya LORA [LORA machine-to-machine interaction technology]. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii*. 2015. Vol. 3. N2. 62-73 (In Russian).

11. Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. New York: John Wiley & Sons, 2003. 6 (In English).

12. Pantyuhin A.R., Belyaev A.S. Sistema opredeleniya mestopolozheniya obektov vnutri pomeshcheniy [A system for determining the location of objects indoors]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. N10-3(64). 81-84 (In Russian).

13. Kolmakov Yu.A., Perevezentsev I.N. Vliyanie korrelyatsii svobodnykh chlenov ryada trilateratsii na otsenku tochnosti izmerennykh storon [The influence of the correlation of free members of the trilateration series on the assessment of the accuracy of the measured sides]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. N2(50). 70-72 (In Russian).

14. Sokolov Yu.G., Timoshenko N.A., Danil'chenko P.M. K voprosu sostavleniya usloynykh uravneniy v geodezicheskikh setyah iz treugol'nikov s izmerennymi storonami [On the issue of drawing up conditional equations in geodetic networks of triangles with measured sides]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2007. N28. 34-40 (In Russian).

15. Andolenko V.I., Klyushin E.B. Issledovanie tochnosti radial'nykh simmetrichnykh setey trilateratsii [Research of the accuracy of radial symmetric trilateration networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 1990. N2. 3-12 (In Russian).

16. Avakyan V.V. Prikladnaya geodeziya: Tekhnologii inzhenerno-geodezicheskikh rabot [Applied geodesy: technologies of engineering and geodetic works]. Moscow: 2016. 37-40 (In Russian).

17. Harlamov M.I., Goncharovskiy O.V. Navigatsiya avtonomnogo mobil'nogo robota s pomoshch'yu sistemy pozitsionirovaniya Marvelmind [Navigation of an autonomous mobile robot using the Marvelmind positioning system]. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika*. Perm': 2017. Vol. 1. 56-60 (In Russian).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 29.10.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 29.10.2020

Статья принята к публикации 25.11.2020
The paper was accepted
for publication on 25.11.2020

Имитационное моделирование параметров шнека экструдера

Михаил Геннадьевич Загоруйко¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Валентин Владимирович Васильчиков²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: vasilchikovvv@sgau.ru;
Ангела Канвековна Мамахай¹,
специалист, магистрант,
e-mail: mamakhaeva@mail.ru

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

²Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, Саратов, Российская Федерация

Реферат. Экструдирование кормов обеспечивает высокое качество готового продукта. (*Цель исследования*) Повысить долговечность элементов конструкции пресс-экструдера путем оптимизации их прочностных характеристик. (*Материалы и методы*) Исследовали технологический принцип экструзии. Применили метод планирования эксперимента. Рассмотрели процесс работы пресс-экструдера со шнеком переменного шага при переработке чечевицы. Прочностные характеристики элементов пресс-экструдера проверяли в ходе проектировочного расчета или расчета на прочность. (*Результаты и обсуждение*) Показали роль основных геометрических параметров шнека экструдера – наклона витка и шага нарезки – в приготовлении качественных зерновых кормов. Выявили, что шаг витка следует рассчитывать в зависимости от коэффициента трения исходного материала о корпус пресс-экструдера, вида и свойств подаваемого материала. Определили установившиеся напряжения шнека как результат знакопостоянной нагрузки сдвига и температурных воздействий. Рассчитали мощность привода, производительность экструдера для уточнения характеристик шнека, а также гидравлическое сопротивление матричной выходной головки, расстояние технологических зон. Подтвердили, что сборная конструкция шнека, состоящая из участков с разным шагом витка, придает пресс-экструдеру универсальность. (*Выводы*) Установили, что шпонка – один из наиболее нагруженных элементов конструкции шнека пресс-экструдера. Рассчитали максимальное расчетное напряжение от постоянной нагрузки – 26,98 мегапаскаля. Определили, что напряжение в поперечном сечении шпонки при температурном воздействии составило 591 мегапаскаль, что превысило предел текучести для выбранного материала, равный 360 мегапаскалям для стали 45. В ходе экспериментальных исследований получили значение ударной вязкости, которое соответствует стандартному показателю выбранной изначально марки стали (38 килоджоулей на кубометр), но не отвечает требованиям, предъявляемым к данному элементу конструкции (не менее 50 килоджоулей на кубометр).

Ключевые слова: пресс-экструдер, экструдирование кормов, шнек переменного шага, плотность чечевицы, многофакторный эксперимент, оптимизация, имитационное моделирование.

■ Для цитирования: Загоруйко М.Г., Васильчиков В.В., Мамахай А.К. Имитационное моделирование параметров шнека экструдера // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 71-77. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-71-77.

Simulation of the Extruder Screw Parameters

Mikhail G. Zagoruiko¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Valentin V. Vasilchikov²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: vasilchikovvv@sgau.ru;
Angela K. Mamakhai¹,
specialist, master's student,
e-mail: mamakhaeva@mail.ru

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

²Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov, Russian Federation

Abstract. Extrusion of feed ensures a high quality of the finished product. (*Research purpose*) To increase structural elements durability of the press extruder by optimizing their strength characteristics. (*Materials and methods*) The authors studied the

technological principle of extrusion. The experiment planning method was applied. They examined the process of press extruder operation with a variable pitch screw during the lentils processing. The strength characteristics of the press-extruder elements were checked during design or strength calculations. (*Results and discussion*) The authors showed the role of the main geometrical parameters of the extruder screw – the slope of the turn and the cutting step – in the preparation of high-quality grain feed. It was found that the turn pitch should be calculated depending on the friction coefficient of the starting material against the press-extruder body, the type and properties of the supplied material. The auger fatigue stresses were determined as a result of constant sign shear load and temperature effects. The drive power, the extruder productivity were calculated to clarify the screw characteristics, as well as the hydraulic resistance of the matrix output head, the distance of the technological zones. It was confirmed that the prefabricated screw structure, consisting of sections with different pitch, gave the press extruder versatility. (*Conclusions*) The authors found that the key was one of the most loaded structural elements of the press-extruder screw. The maximum calculated voltage from a constant load was calculated – 26.98 megapascals. It was determined that the stress in the cross-section of the key under temperature action was 591 megapascals, which exceeded the yield stress for the selected material, equal to 360 megapascals for steel 45. In the course of experimental studies, a value of impact strength was obtained that corresponded to the standard value of the initially selected steel grade (38 kilojoules per cubic meter), but didn't meet the requirements for this structural element (at least 50 kilojoules per cubic meter).

Keywords: press extruder, feed extrusion, variable pitch screw, lentil density, multifactorial experiment, optimization, simulation.

For citation: Zagoruyko M.G., Vasil'chikov V.V., Mamakhay A.K. Imitatsionnoe modelirovanie parametrov shneka ekstrudera [Simulation of the extruder screw parameters]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 71-77 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-71-77.

Экструдирование зерновых кормов обеспечивает высокое качество готового продукта [1].

Экструдер (червячный пресс) расплавляет и гомогенизирует исходный материал (рис. 1). Червячный экструдер выполняет одновременно роль пластификатора и подающего материал насоса непрерывного действия [2, 3].

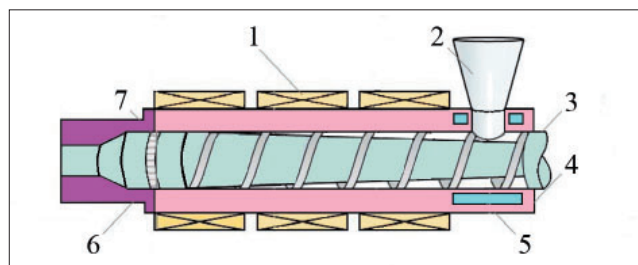


Рис. 1. Зерновой пресс-экструдер (общий вид): 1 – нагреватель; 2 – бункер; 3 – шнек; 4 – цилиндр; 5 – полость для циркуляции воды; 6 – формирующая головка; 7 – решетка с сетками
Fig 1. Grain press extruder. General view: 1 – heater; 2 – hopper; 3 – auger; 4 – cylinder; 5 – cavity for water circulation; 6 – forming head; 7 – grate with meshes

Экструдеры достаточно широко распространены в промышленности (изделия из термопластов), в сельском хозяйстве (корма), в пищевом производстве (кукурузные палочки, сухие завтраки, чипсы, диетические хлебцы, детское питание) [4, 5].

Пластификация возможна не только в результате термоэффекта передачи тепла от нагреваемого кожуха корпуса экструдера, но и от энергии, вызванной деформацией перемещаемого материала в экструдере [6, 7].

Цель исследования – повысить долговечность элементов конструкции пресс-экструдера путем оп-

тимизации их прочностных характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследование технологического принципа экструзии основано на изучении систематического перемещения материала вращающимся шнеком. Рассмотрим процесс работы пресс-экструдера со шнеком переменного шага при переработке чечевицы.

Необходимо определить шаг витка шнека с учетом некоторых допущений:

- однородность материала: он проходит вдоль оси шнека как сплошная однородная масса и перемещается на один шаг винта за один оборот;
- поперечное сечение перемещаемого материала в шнеке перпендикулярно оси шнека и считается условно постоянной по всей его длине.

Основные конструктивные параметры шнека: диаметр D , шаг витка T , глубина нарезки h , зазор между гребнем и корпусом шнека δ , угол наклона винтовой нарезки ϕ , ширина гребня e [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Одни из основных геометрических параметров шнека экструдера – наклон витка и шаг нарезки. От них существенно зависит производительность экструдера. Коэффициент трения исходного материала о корпус пресс-экструдера, вид и свойства подаваемого материала будут влиять на параметр шага витка.

При нарезке угла наклона витка шнека 45° условия должны быть идеальными. С учетом этого определяя параметр глубины нарезки:

$$h = \pi D,$$

где h – глубина нарезки, мм;

D – диаметр шнека, мм.

В расчетах коэффициент трения между шнеком и материалом примем в пределах 0,3-0,6 [8].

Шаг нарезки находится в прямой зависимости от коэффициента трения. Например, при коэффициенте трения 0,5 шаг $h = 1,1D$ [8].

Для обеспечения высокой степени сжатия материала и повышения производительности экструдера целесообразно применять шнек с переменным по длине шагом нарезки [8].

Рассмотрим параметрическое уравнение для винтовой поверхности шнека экструдера с переменным шагом (рис. 2) [8].

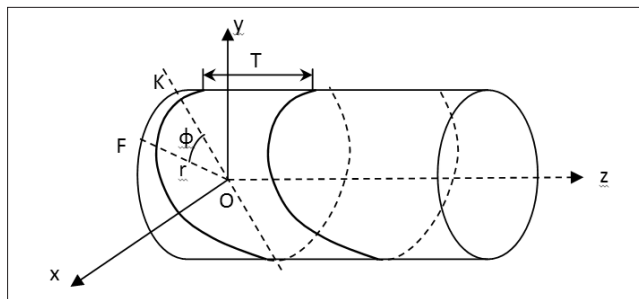


Рис. 2. Винтовая поверхность шнека с переменным шагом
 K, F – исследуемые точки; T – шаг витка; ϕ – угол поворота шнека; r – текущий радиус

Fig. 2. Spiral surface of the screw with variable pitch
 K, F – researched points; T – turn pitch; ϕ – angle of screw rotation; r – current radius

Определим шаг витка при развороте шнека экструдера на угол $\phi = 360n$:

$$T_n = aT_{n-1} = a^n b \quad (1)$$

где n – количество витков;

a – коэффициент пропорциональности;

b – первоначальный шаг витка, мм.

Примем, что T_i – шаг i -го витка (при $0^\circ T_i = b$, при повороте на $360^\circ T = ab$).

Поворот на угол $\phi = 360n$ образован между проекцией OF и осью x (рис. 2). Координаты точки K совпадают с точкой F , а перемещение вдоль продольной оси z изменяется пропорционально углу поворота ϕ и имеет вид:

$$z = CT_n,$$

где C – постоянная параметрического уравнения.

С учетом выражения (1) горизонтальное перемещение шнека примет вид:

$$z = C \cdot a^n b. \quad (2)$$

Составим уравнения винтовой линии шнека экструдера с переменным шагом:

$$x = r \cos \phi; y = r \sin \phi; z = C\phi, \quad (3)$$

где r – текущий радиус, мм.

Дополнительно можно оптимизировать прочность и долговечность как конструкции экструдера в целом, так и отдельных его элементов. Для упрощения рас-

чета воспользуемся следующим правилом: если обеспечена прочность самого слабого (нагруженного) элемента конструкции, то в целом прочность конструкции или машины можно считать обеспеченной.

Прочностные характеристики элементов пресс-экструдера проверяют в ходе проекторочного расчета или расчета на прочность [9].

Проверочный расчет на прочность предоставляет возможность исследования работы экструдера на различных материалах. Конструктивные параметры шнека устанавливают в зависимости от режима работы экструдера, градиента скорости подаваемого материала и его вида. В процессе проекторочных и проверочных расчетов получают следующие параметры: температуру и давление на выходе и входе из зоны дозирования, давление на входе и выходе в зоне питания. Расчетным путем определяют также мощность привода, производительность экструдера для выяснения характеристик шнека, гидравлическое сопротивление матричной выходной головки, расстояния технологических зон.

Проектируют и рассчитывают шнековый пресс в два этапа. Первичная цель проведения прочностного расчета – это обоснование геометрических параметров шнека, а также определение оптимальной частоты вращения исходя из заданной производительности [10].

Производительность вычисляют по формуле:

$$Q = (V \cdot 3600 \cdot \rho_T) / \gamma, \quad (4)$$

где Q – производительность шнека экструдера, кг/ч;

V – скорость вращения шнека, об/мин;

ρ_T – плотность материала, кг/м³;

γ – среднее значение градиента скорости сдвига материала (чечевицы), с⁻¹.

С учетом уравнения винтовой линии шнека экструдера (3) проводят проекторочный расчет необходимого диаметра шнека [9]:

$$Q = 0,68D^{2,5}.$$

Основная цель прочностного расчета экструдера состоит в том, чтобы найти такие оптимальные конструктивные параметры (геометрические характеристики, параметры управления), которые, наряду с прочностными характеристиками, обеспечивали бы снижение общей материалоемкости конструкции.

При проектировании шнеков не учитываются прочностные характеристики их элементов. Однако из-за продольно-поперечного изгиба оси шнека возможен преждевременный износ внешнего цилиндра пресс-экструдера (рис. 3) [9].

Прочность шнека определяют с учетом действия на его ось крутящих и изгибающих моментов.

В большинстве случаев расчет на прочность подобного вида конструкций ведется по упрощенной методике, где учитывают только деформацию от из-

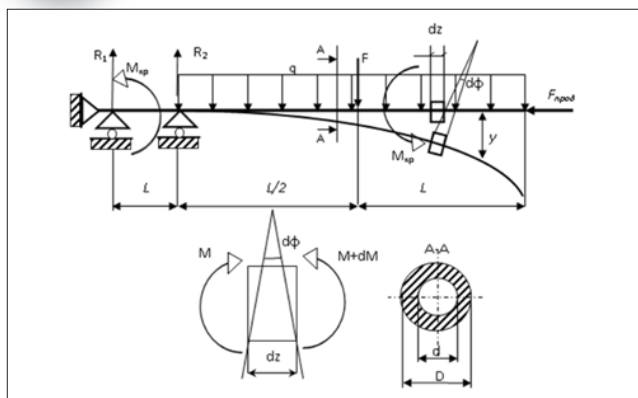


Рис. 3. Расчетная схема шнека экструдера при продольно-поперечном изгибе: R_1, R_2 – опорные реакции; $F, F_{\text{прод.}}$ – действующие усилия; $M_{\text{кр}}, M, M+dM$ – действующие моменты; $dz, d\phi$ – элементарные перемещения; d, D – внутренний и внешний диаметры; L – расстояние распределенной нагрузки

Fig. 3. Design diagram of the extruder screw with longitudinal-transverse bending: R_1, R_2 – support reactions; $F, F_{\text{прод.}}$ – acting efforts; $M_{\text{кр}}, M, M+dM$ – acting moments; $dz, d\phi$ – elementary displacements; d, D – external and internal diameters; L – distance of distributed load

гиба с кручением. Но в нашем примере возникает еще и продольная сила от давления материала при выходе из матрицы. Поэтому будем проводить расчет с учетом деформации продольного изгиба.

Воспользуемся для этого методом начальных параметров [10].

Уравнение изогнутой оси балки при продольно-поперечном изгибе имеет вид:

$$EJ_x \frac{d^2 y}{dx^2} = M_x, \quad (5)$$

где E – модуль продольной упругости, МПа;

J_x – осевой момент инерции сечения, м^4 ;

M_x – изгибающий момент относительно поперечной оси кН·м;

Уравнение изгибающего момента примет вид:

$$M_0 = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + M_x \cos kx + \frac{Q_0}{k} \sin kx, \quad (6)$$

где M_0 – начальное значение изгибающего момента, кН·м;

q – интенсивность равномерно распределенной нагрузки, кН/м;

k – коэффициент, учитывающий давление матери

ала $P, k = \sqrt{\frac{P}{EJ_x}}$;

R – опорная реакция, кН;

Q_0 – начальное значение поперечной силы, кН.

При значении текущей координаты $z = 0$ выражение для определения Q_0 примет вид:

$$Q_0 = \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL}, \quad (7)$$

где L – расстояние равно-распределенной нагрузки, м.

Выполнив проектировочный расчет с учетом вышеизложенного, получим выражение для изгибаю-

щего момента:

$$M_x = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL} \sin kx = 0. \quad (8)$$

Максимальное расчетное нормальное напряжение определим формуле [11]:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{4N(1 + \alpha^4) + \pi \gamma l^2 D(1 - \alpha^4)}{\pi D^2(1 - \alpha^4)}, \quad (9)$$

где σ_{max} – максимальное расчетное нормальное напряжение, МПа.

Касательное напряжение равно [11]:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{16 M_{\text{кр}}}{\pi D^3(1 - \alpha^4)}, \quad (10)$$

где τ_{max} – касательное напряжение, МПа;

$M_{\text{кр}}$ – Крутящий момент, кН·м.

Максимальный прогиб шнека от интенсивности распределенной нагрузки q при продольно-поперечном изгибе определяется следующим образом. Значение изгибающего момента возьмем из (6):

$$EJ_x \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL} \sin kx. \quad (11)$$

Дважды проинтегрировав, мы получим уравнение изогнутой оси шнека:

$$\begin{aligned} EJ_x \frac{d^2 y}{dx^2} &= \frac{q}{2k^2} + \frac{q}{k^4} \cos kx - q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \sin kx + \\ &+ \left[\frac{q}{k^3} \cos kL + q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \cos kL - \frac{PL}{k^2} \right] x + \\ &+ \frac{qL}{2k^2} - \frac{q}{k^4} \cos kL + q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \sin kL - \\ &- \frac{qL}{k^3} \sin kL - q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \cos kL. \end{aligned} \quad (12)$$

Максимальный прогиб оси шнека:

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{EJ} \left\{ \frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \frac{L^2}{2} \right) - \frac{1}{k} \left[\frac{q}{k^3} + q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \cos kL \right] - \right. \\ &- \left. \frac{1}{k^2} \left[\frac{qL}{k} - q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \sin kL \right] \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для оценки прочностных характеристик экструдера рассмотрим самый нагруженный его узел – шнек.

Сама конструкция шнека имеет довольно сложную конфигурацию, поэтому дальнейший анализ его прочностных характеристик аналитическим методом будет недостаточно точным. Для решения задачи воспользуемся методом конечных элементов.

Для большей универсальности пресс-экструдера его шнек представляет собой сборную конструкцию, состоящую из участков с разным шагом витка. Для надежной фиксации элементов шнека на его валу применяют специальные шпонки. Они работают в условиях сложного напряженного состояния, и со временем их надо заменять. Причем замена связана с трудоемким процессом демонтажа кожуха шнека и последующей его сборкой (ГОСТ 23360-78) [12, 13].

В качестве оптимизации конструктивных параметров шнека экструдера подробнее остановимся на повышении его прочностных характеристик. Он испы-

тывает усталостные напряжения от знакопостоянной нагрузки сдвига и температурных воздействий.

В расчете шпонки учитывают напряжение среза и смятие [10]:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{Q}{A_{\text{ср}}} \leq [\tau_{\text{ср}}] \quad (14)$$

где $\tau_{\text{ср}}$ – расчетное напряжение среза в поперечном сечении, МПа;

$Q = F/n$ – поперечная сила, возникающая в этом сечении, МПа;

F – внешняя осевая нагрузка, кН;

n – число соединительных деталей, шт.;

$A_{\text{ср}}$ – площадь поперечного сечения срезаемой детали (площадь среза), м^2 ;

$[\tau_{\text{ср}}]$ – допускаемое напряжение при расчетах на срез, зависящее от материала соединительных деталей и условий работы конструкции, МПа.

Допускаемое напряжение смятия равно:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{F}{nA_{\text{см}}} \leq [\sigma_{\text{см}}]$$

где $A_{\text{см}}$ – площадь смятия, м^2 .

С учетом того, что шпонки обычно имеют фаски, выражение для определения площади смятия примет вид:

$$A_{\text{см}} = (H - t_1 - f) l_p \quad (15)$$

где H – высота шпонки, мм;

t_1 – глубина шпоночного паза на валу, мм;

$f = 0,06h$ – высота фаски, мм;

l_p – расчетная длина шпонки, мм.

При расчете на долговечность ключевым фактором станет максимальный прочностной запас.

Прочностной запас при сложном напряженном состоянии [10] вычисляют по формуле:

$$S = \frac{S_\sigma \cdot S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq [S], \quad (16)$$

где S – общий прочностной запас, МПа;

S_σ – прочностной запас по напряжениям нормальным (деформация от температурного воздействия), МПа;

S_τ – прочностной запас по напряжениям касательным (от сдвига), МПа;

$[S]$ – допускаемый запас прочности, МПа.

Дальнейший расчет аналитического метода будет довольно трудоемким и недостаточно точным. В данном случае применим один из численных методов – метод конечных элементов, реализованный в расчетном модуле КОМПАС 3D [14, 15].

Получили результат расчета на прочность имитационной модели шпонки методом конечных элементов (рис. 4, 5):

Для проверки сходимости результатов и подтверждения физико-механических свойств шпонки реализовали серию механических испытаний. Так как этот элемент конструкции работает в условиях дина-

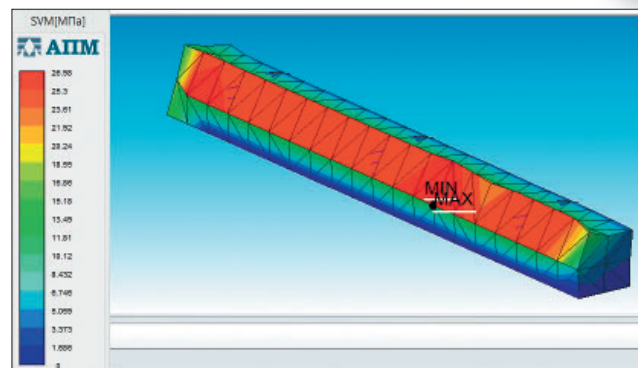


Рис. 4. Результат расчета элемента «шпонка» в условиях деформации сдвига

Fig. 4. The result of calculating the element "key" in the conditions of shear deformation

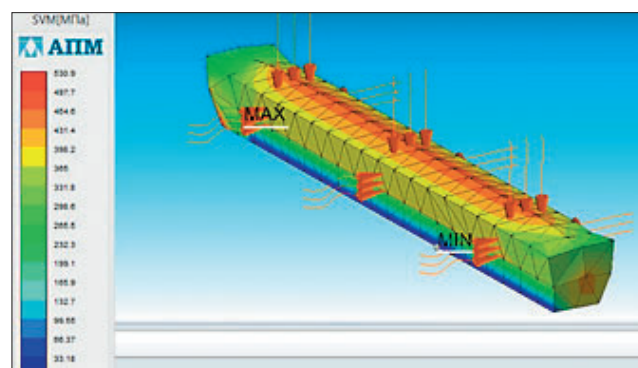


Рис. 5. Результат расчета элемента «шпонка» с учетом температурного воздействия

Fig. 5. The result of calculating the element "key" taking into account the temperature effect

мических нагрузок, то целесообразно провести механические испытания на ударную вязкость. Для этого из шпонки изготовили стандартные образцы для испытаний на маятниковом копре, определили значение ударной вязкости материала шпонки для дальнейшего сопоставления с результатами, полученными численными и аналитическим методами.

Выводы. Выявили, что шпонка – один из наиболее нагруженных элементов конструкции шнека пресс-экструдера. Максимальное расчетное напряжение от постоянной нагрузки равно 26,98 МПа. Напряжения в поперечном сечении шпонки при температурном воздействии составили 591 МПа, что превышает предел текучести для выбранного материала (360 МПа для стали 45).

Значение ударной вязкости, полученное в ходе экспериментальных исследований, соответствует стандартному значению выбранной изначально марки стали (38 кДж/м³), но не отвечает требованиям, предъявляемым к данному элементу конструкции (не менее 50 кДж/м³).

Программный численный расчет прочностных характеристик шпонки показал, что изготовление этой детали из альтернативных марок сталей (например

30ХГСА – сталь конструкционная лигированная с повышенной прочностью) позволит решить проблему с

недостаточной долговечностью этих элементов в ходе эксплуатации пресс-экструдера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцева З.А., Ермолаева Е.В. Проектирование производств по переработке пластмасс методом экструзии: учебное пособие к выполнению курсового и дипломного проектов. Владимир: Владимирский государственный университет. 2003. 96 с.
2. Новиков В.В., Коновалов Л.В., Иноземцева Д.В., Беляев В.В. Экспериментальное обоснование рациональных параметров модернизированного экструдера КМЗ-2,0У // *Нива Поволжья*. 2010. N4. С. 48-51.
3. Chen C., Kuang F., Tor O., Xiong Z., Zhang J. Static Lateral Load Capacity of Extruded Wood-plastic Composite-to-metal Single-bolt Connections, Considering. Failure at the Ends. *Bioresources*. 2019. Vol. 14. 8987-9000.
4. Фролов В.Ю. Теоретические и экспериментальные аспекты разработки технологий и технических средств, приготовления концентрированных кормов на основе соевого белка // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2010. 140 с.
5. Souto N., Thuillier S., Andrade-Campos A. Design of an indicator to characterize and classify mechanical tests for sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 101. 252-271.
6. Firestein K.L., von Treifeldt J.E., Kvashnin D.G., Fernando J.F.S., Zhang C., Kvashnin A.G., Podryabinkin E.V., Shapeev A.V., Siriwardena D.P., Sorokin P.B., Golberg D. Young's Modulus and Tensile Strength of Ti3C2 MXene Nanosheets As Revealed by In Situ TEM Probing, AFM Nanomechanical Mapping, and Theoretical Calculations. *Nano Letters*. 2020. Vol. 20. 5900-5908.
7. Степин П.А. Соппротивление материалов. СПб.: Лань. 2014. 320 с.
8. Припоров И.Е. Обоснование винтовой поверхности шне-

- ка переменного шага пресс-экструдера // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017. N1(63). С. 67-70.
9. Орлик О.Л. О влиянии конусности направлятеля на продвижение смеси в пресс-экструдере // *Нива Поволжья*. 2014. N3(32). С. 73-78.
10. Соколов М.В., Клинков А.С., Ефремов О.В., Беляев П.С., Однолюк В.Г. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин. М.: Машиностроение-1. 2004. 248 с.
11. Тимофеева Д.В., Попов В.П., Антимонов С.В., Зинюхина А.Г. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014. N9. С. 220-225.
12. Davaze V., Vallino N., Feld-Payet S., Langrand B., Beson J. Mechanical reliability characterization of low carbon steel brazed joints with copper filler metal. Plastic and fracture behavior of a dual phase steel sheet under quasi-static and dynamic loadings. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020. Article number 107165.
13. Goger A. Modelling of counter rotating twin screw extrusion. A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree Master of Applied Science. Ontario: McMaster University. 2013. 124.
14. Дорохов А.С. Бесконтактный контроль качества запасных частей сельскохозяйственной техники // *Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»*. 2010. N2(41). С. 73-75
15. Семейкин В.А., Дорохов А.С. Методика моделирования оценки эффективности входного контроля качества техники. *Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»*. 2009. N8-1(39). С.30-33.

REFERENCES

1. Kudryavtseva Z.A., Ermolaeva E.V. Proektirovanie proizvodstv po pererabotke plastmass metodom ekstruzii: uchebnoe posobie k vypolneniyu kursovogo i diplomnogo proektov [Design of production facilities for the processing of plastics by extrusion: a tutorial for the implementation of course and diploma projects]. Vladimir: Vladimirskiy gosudarstvennyy universitet. 2003. 96 (In Russian).
2. Novikov V.V., Konovalov L.V., Inozemtseva D.V., Belyaev V.V. Eksperimental'noe obosnovanie ratsional'nykh parametrov modernizirovannogo ekstrudera KMZ-2,0U [Experimental substantiation of rational parameters of the modernized extruder KMZ-2.0U]. *Niva Povolzh'ya*. 2010. N4. 48-51 (In Russian).
3. Chen C., Kuang F., Tor O., Xiong Z., Zhang J. Static Lateral Load Capacity of Extruded Wood-plastic Composite-to-metal Single-bolt Connections, Considering. Failure at the Ends.

- Bioresources*. 2019. Vol. 14. 8987-9000 (In English).
4. Frolov V.Yu. Teoreticheskie i eksperimental'nye aspekty razrabotki tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv, prigotovleniya kotsentrirovannykh kormov na osnove soevogo belka [Theoretical and experimental aspects of the development of technologies and technical means, preparation of concentrated feed based on soy protein]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2010. 140 (In Russian).
5. Souto N., Thuillier S., Andrade-Campos A. Design of an indicator to characterize and classify mechanical tests for sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 101. 252-271 (In English).
6. Firestein K.L., von Treifeldt J.E., Kvashnin D.G., Fernando J.F.S., Zhang C., Kvashnin A.G., Podryabinkin E.V., Shape-

ev A.V., Siriwardena D.P., Sorokin P.B., Golberg D. Young's Modulus and Tensile Strength of Ti₃C₂ MXene Nanosheets As Revealed by In Situ TEM Probing, AFM Nanomechanical Mapping, and Theoretical Calculations. *Nano Letters*. 2020. Vol. 20. 5900-5908 (In English).

7. Stepin P.A. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Saint-Petersburg: Lan'. 2014. 320 (In Russian).

8. Priporov I.E. Obosnovanie vintovoy poverkhnosti shneka peremennogo shaga press-ekstrudera [Substantiation of the screw surface of the variable pitch screw of the press extruder]ю *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. N1(63). 67-70 (In Russian).

9. Orsik O.L. O vliyani konusnosti napravatelya na prodvizhenie smesi v press-ekstrudere [On the influence of the taper of the guide on the movement of the mixture in the press-extruder]. *Niva Povolzh'ya*. 2014. N3(32). 73-78 (In Russian).

10. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Efremov O.V., Belyaev P.S., Odnol'ko V.G. Avtomatizirovannoe proektirovanie i raschet shnekovykh mashin [Computer aided design and calculation of screw machines]. Moscow: Mashinostroenie-1. 2004. 248 (In Russian).

11. Timofeeva D.V., Popov V.P., Antimonov S.V., Zinyukhina A.G. Razrabotka konstruktssii shneka tipovogo press ekstrudera [Development of a screw design for a typical extruder press].

Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. N9. 220-225 (In Russian).

12. Davaze V., Vallino N., Feld-Payet S., Langrand B., Beson J. Mechanical reliability characterization of low carbon steel brazed joints with copper filler metal. Plastic and fracture behavior of a dual phase steel sheet under quasi-static and dynamic loadings. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020. Article number 107165 (In English).

13. Goger A. Modelling of counter rotating twin screw extrusion. A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree Master of Applied Science. Ontario: McMaster University. 2013. 124.

14. Dorokhov A.S. Beskontaktnyy kontrol' kachestva zapasnykh chastey sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Non-contact quality control of spare parts for agricultural machinery]. *Vestnik FGOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina»*. 2010. N2(41). 73-75 (In Russian).

15. Semeykin V.A., Dorokhov A.S. Metodika modelirovaniya otsenki effektivnosti vkhodnogo kontrolya kachestva tekhniki [Modeling technique for evaluating the effectiveness of incoming quality control of equipment]. *Vestnik FGOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina»*. 2009. N8-1(39). 30-33 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 29.09.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 29.09.2020

Статья принята к публикации 26.11.2020
The paper was accepted
for publication on 26.11.2020

Оценка режимов работы сельскохозяйственной техники

Михаил Николаевич Костомахин,

кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: redizdat@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Представили материал по оценке режимов работы и условий эксплуатации сельскохозяйственных машин с помощью разработанной учеными Федерального научного агроинженерного центра ВИМ системы контроля технического состояния. Показали пример применения бесконтактных датчиков на тракторе *Kioti CK22* для оценки аварийного режима работы, который в последствии может привести к преждевременному отказу. Рассмотрели возможности наиболее рационального применения алгоритма дистанционного мониторинга к диагностированию – для выявления причин возникновения неисправностей. (*Цель исследования*) Усовершенствовать существующие и разработать новые технологии дистанционной оценки текущего технического состояния машин на протяжении всей эксплуатации. (*Материалы и методы*) Подтвердили, что разработанный учеными ВИМ алгоритм дистанционной системы мониторинга позволяет обеспечить автоматизированный контроль параметров технического состояния агрегатов и узлов машин. Эксплуатацию системы проводили на основе документирования фактов работы машины в аварийных или предаварийных режимах. Обеспечили контроль параметров в допустимых для них пределах. (*Результаты и обсуждение*) Проанализировав причины отказов, установили исходную номенклатуру исследуемых процессов. Разработали алгоритм дистанционного мониторинга параметров, позволяющих оценить режимы работы машины. Проверили функциональность алгоритма на примере установки бесконтактных датчиков и бортового компьютера на трактор *Kioti CK22*. (*Выводы*) При помощи установленной бортовой системы и 8 датчиков получили информацию, которая позволила оценить текущее техническое состояние трактора *Kioti CK22* исходя из динамики 8 контролируемых параметров, характеризующих постепенное изменение функциональности машины/системы и влияющих на техническую и экологическую безопасность.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, эксплуатация машин, режим работы, наработка на отказ, техническое состояние, контролируемый параметр, дистанционный мониторинг, передача данных.

■ **Для цитирования:** Костомахин М.Н. Оценка режимов работы сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 78-83. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-78-83.

Evaluation of Agricultural Machinery Operation Modes

Mikhail N. Kostomakhin,

Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: redizdat@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The author presented material on the evaluation of agricultural machines operating modes and operating conditions using the technical condition monitoring system developed by scientists of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM. He showed an example of proximity sensors use on the *Kioti CK22* tractor to assess the emergency mode of operation, which could subsequently lead to premature failure. The author considered the possibilities of the most rational application of the remote monitoring algorithm to diagnostics – to identify the causes of malfunctions. (*Research purpose*) To improve the existing and develop new technologies for remote evaluation of the machines current technical condition throughout the entire operation. (*Materials and methods*) It was confirmed that the remote monitoring system algorithm developed by the VIM scientists made it possible to provide automated control of the units and machine assemblies technical condition parameters. The system was operated on the basis of documenting the facts of the machine's operation in emergency or pre-emergency modes. The parameters control within the acceptable limits was provided. (*Results and discussion*) After analyzing the failure reasons, the author established the initial nomenclature of the studied processes. An algorithm for remote parameters monitoring was developed, which made it possible to assess the machine operating modes. He tested the algorithm functionality using the example of installing proximity sensors and an on-board computer on a *Kioti CK22* tractor. (*Conclusions*) Using the installed on-board system and 8 sensors,

information was obtained that made it possible to assess the current technical condition of the *Kioti CK22* tractor based on the dynamics of 8 monitored parameters characterizing a gradual change in the functionality of the machine/system and affecting technical and environmental safety.

Keywords: agricultural machinery, machine operation, operating mode, time between failures, technical condition, controlled parameter, remote monitoring, data transmission.

For citation: Kostomakhin M.N. Otsenka rezhimov raboty sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Evaluation of agricultural machinery operation modes]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 78-83 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-78-83.

Срок службы сельхозтехники зависит от многих случайных факторов конструктивного, технологического и эксплуатационного характера [1]. Так, в процессе эксплуатации машин в сопряжениях, узлах и механизмах происходят потери механической энергии, что постепенно снижает функциональность, приводит к отказу, то есть к утрате их работоспособности [2, 3].

Ухудшение условий эксплуатации техники (нарушение режимов работы, несвоевременные или некачественные техническое обслуживание и ремонт) незапланированно изменяют эксплуатационные свойства машин и, как следствие, влияют на техническое состояние узлов и агрегатов.

В соответствии ГОСТ 27.002-2015, пункт 3.2.10 «Техническое состояние: Состояние объекта, характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях», об исправности и работоспособности машины судят по параметрам технического состояния. Их сочетание во временном срезе называется текущим техническим состоянием элемента машины (рис. 1).

Техническое состояние можно представить в виде точки в трехмерной системе координат K - P - D , а его изменение образует кривую (рис. 2). Значения K ,

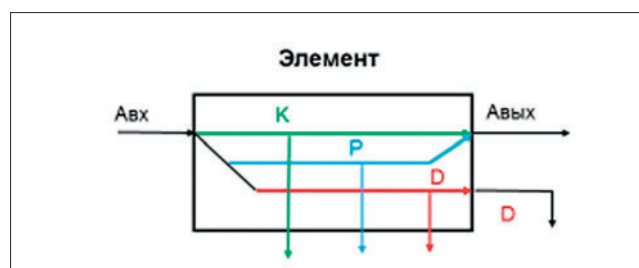


Рис. 1. Техническое состояние машины: K – кинетическая энергия деталей машин; P – потенциальная энергия деталей машин; D – диссипативная энергия; $A_{\text{вых}}$ – полезная работа на выходе; $A_{\text{вх}}$ – работа внешних сил на входе

Fig. 1. Machine technical condition: K – machine parts kinetic energy; P – machine parts potential energy; D – dissipative energy; $A_{\text{вых}}$ – useful output work; $A_{\text{вх}}$ – external forces input work

P , D имеются паспортах транспортных средств, используемых для решения конкретной задачи. Для поддержания технического состояния машин на задан-

ном уровне необходимо совершенствовать методы его оценки и проводить комплекс мер, направленных на предотвращение преждевременных отказов [4].

Штатная комплектация большинства отечествен-

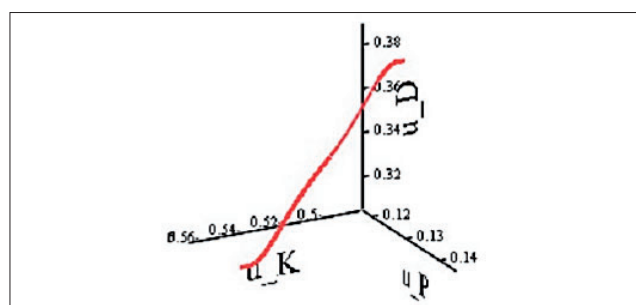


Рис. 2. Динамика технического состояния детали машин в системе координат u_K , u_P и u_D

Fig. 2. Dynamics of machine part technical state in the coordinate system u_K , u_P and u_D

ных сельхозмашин имеет информационную панель, которая не полностью отражает данные параметров работы и состояния узлов и агрегатов, а критически важные показания изменения технического состояния вообще отсутствуют [4]. Некоторые контролируемые параметры невозможно оценить дистанционно. Оператору машины приходится судить об изменении текущего технического состояния по субъективным признакам при внешнем осмотре, по шумам, вибрациям, динамике движения во время работы.

Прекращение же эксплуатации машины/системы осуществляется тогда, когда ее эксплуатационные свойства, характеризующие применение ее по назначению, ухудшаются и дальнейшая ее работа невозможна.

Если эксплуатация техники становится физически невозможной (отказ, поломка) и экономически нецелесообразной из-за больших затрат, то такое состояние машины называют предельным, а показатели, характеризующие потерю ее работоспособности, свидетельствуют о долговечности и безотказности [4]. Однако при нарушении режима эксплуатации сложно прогнозировать и предотвратить отказ.

Использование современных достижений в области компьютерных технологий, оцифровки информации, беспроводной передачи данных позволит получить новые научные и инженерные результаты, направленные на совершенствование процессов управления

техническим состоянием машин в эксплуатации [5].

Цель исследования – усовершенствовать существующие и разработать новые технологии дистанционной оценки текущего технического состояния машин на протяжении всей эксплуатации.

Материалы и методы. Контроль режимов эксплуатации отечественных самоходных сельскохозяйственных машин ведется ограниченно. В основном учитывают параметры, которые обуславливают функционирование всех связанных систем, узлов и агрегатов машины для выполнения заданной функции [6, 7]. Невозможно предотвратить наступление аварийного режима, поскольку данные о правильности функционирования отдельных систем весьма скудны. При этом информация о значениях контролируемых параметров (коды ошибок) хранится в электронном блоке управления машины. В результате при эксплуатации контролируются значения некоторых обобщенных диагностируемых параметров.

Многие компании внедряют различные системы оценки качества эксплуатации, например системы контроля качества вождения [8]. В частности, «мозгом» такой системы вместо GPS служит телематический комплекс – устройство беспроводной передачи данных с SIM-картой, которое подключается к диагностическому разъему или к устройству связи с датчиками. Например, приемник радиосигналов считывает и передает беспроводные сигналы через интерфейс связи RS 485. Он может выполнять широкий диапазон функций:

- GPS-навигацию и мониторинг;
- оповещение о попытке угона;
- фиксацию места и времени ДТП;
- диагностику систем автомобиля;
- оценку качества вождения;
- дистанционный контроль наработки двигателя.

Благодаря более бережному вождению узлы и системы машин служат дольше, снижается нагрузка на наиболее нагруженные узлы и агрегаты, обеспечивается сохранность грузов.

Применение новых технологий к оценке технического состояния сельхозмашин при работе повышает ее оперативность и точность, с учетом бережной эксплуатации при различных режимах работы (например, момент сопротивления повороту) [9, 3]. Это позволит сократить издержки на эксплуатацию, а также наиболее полно использовать ресурс заменяемых деталей и повысить вероятность безотказной работы техники (рис. 3). Важно принимать во внимание приоритетность процессов, приводящих к возникновению отказов деталей и сопряжений [10].

Машина работоспособна, если работа внешних сил на входе после преобразования ее в кинетическую и потенциальную энергии внутри нее совершает полезную работу на ее выходе, которая не меньше потерь Ed :

$$Ed < A_{\text{вых}} < A_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где Ed – потери механической энергии, Дж;

$A_{\text{вых}}$ – полезная работа на выходе, Дж;

$A_{\text{вх}}$ – работа внешних сил на входе, Дж.

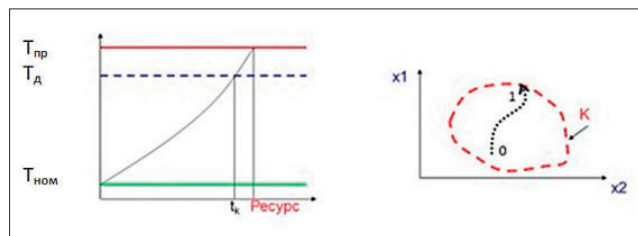


Рис. 3. Исправность детали: $T_{\text{пр}}$ – предельное значение наработки на отказ; $T_{\text{д}}$ – допускаемое значение наработки на отказ; $T_{\text{ном}}$ – номинальное значение наработки на отказ; K – контур предельных значений параметра $T_{\text{пр}}$; t_k – отказ

Fig. 3. Serviceability of the part: $T_{\text{пр}}$ – limit value value time between failures; $T_{\text{д}}$ – permissible value time between failures; $T_{\text{ном}}$ – the nominal value time between failures; K – contour of limiting values of the parameter $T_{\text{пр}}$; t_k – failure

На основании проведенного анализа и экспертной оценки ученые ВИМ на примере трактора Kioti CK22 с помощью бесконтактных датчиков ДУ-Р2У определили перечень основных параметров для оценки качества вождения (рис. 4).

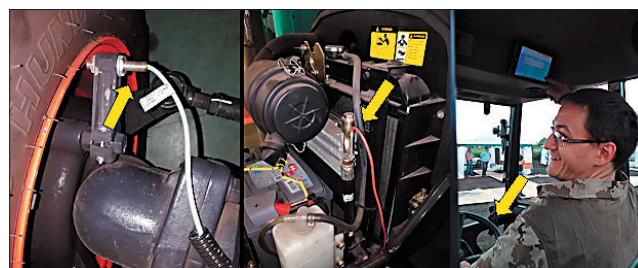


Рис. 4. Установленные бесконтактные датчики ДУ-Р2У в тракторе Kioti CK22

Fig. 4. Installed contactless sensors DU-P2U in the Kioti CK22 tractor

При дистанционной настройке задействовали USB-радиопрограмматор и программу-конфигуратор ASconfig. Датчик имеет пломбируемое крепление, исключающее несанкционированное вмешательство в его работу. Он отслеживает основные параметры вождения, влияющие на безопасность и срок службы техники.

Бесконтактные датчики ДУ-Р2У позволяют оценить следующие события:

- наработку двигателя;
- попадание транспортного средства в ямы;
- резкое ускорение при разгоне;
- резкое замедление при торможении;
- резкий поворот;
- опрокидывание;
- температуру;
- буксование.

Для всех событий задаются индивидуальные пороги срабатывания датчиков. Качество оценки эксплуатации машин оценивают точностью измерения контролируемых параметров и вероятностью правильного диагностирования [10].

На основании проведенного инженерного анализа и экспертной оценки ученые ВИМ определили перечень основных параметров регистрации контролируемых параметров технического состояния машин с помощью бесконтактного датчика ДУ-Р2У (таблица).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Проанализировав причины отказов, которые обусловили выход из строя или потерю работоспособности составной части машины, узла, агрегата вследствие наступления аварийного режима или неправильной эксплуатации, установила ис-

ходную номенклатуру исследуемых процессов, таких как буксование, резкое ускорение и замедление, крен, температура, счетчик моточасов. Полученную совокупность процессов подвергли сравнительной оценке. Для машин, находящихся в эксплуатации, использовался критерий максимального количества отказов [12, 13]. С учетом заведомо нелинейных и неоднозначных связей между структурными и контролируемыми параметрами в сопряжении, узле или агрегате, отсечены малозначимые (малоинформативные) параметры, характеризующие исследуемые процессы. Для решения поставленной цели сотрудники ВИМ разработали алгоритм дистанционного мониторинга параметров, позволяющих оценить режимы работы машины (рис. 5). Его основу составляет бортовой компью-

Таблица				Table
ПАРАМЕТРЫ ДАТЧИКА ДУ-Р2У КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ / DU-R2U SENSOR PARAMETERS FOR MONITORING OPERATING MODES				
Назначение датчика Sensor purpose	Измеряемый параметр Measured parameter	Диапазон измерения Measurement range	Примечание Note	
Датчик температуры Temperature sensor	абсолютное значение температуры алюминиевой контактной площадки датчика (или окружающей среды) the absolute temperature value of the aluminum contact sensor pad (or the environment)	–50...+100°C	–	
Двухканальный датчик угла наклона с радиометкой Two-channel tilt sensor with radio tag	угол наклона с радиометкой с логическими уровнями* tilt angle with radio tag with logical levels	0...180°	определяет угол наклона относительно вектора, направленного к центру Земли; имеет выходной логический сигнал с заданием диапазона срабатывания It determines the inclination angle relative to the vector directed to the Earth center; It has a logical output signal with setting the operating range	
Радиометка для идентификации быстро перемещающихся объектов** Radio tag for identifying fast moving objects	идентификация объекта object identification	дальность определения объекта – до 200 м на открытой местности object detection range – up to 200 m in open areas	имеет автоматический радиосчитыватель It has an automatic radio reader	
Двухканальный датчик работы трактора с радиометкой Two-channel tractor operation sensor with radio tag	интенсивность (цикличность) изменений угла наклона датчика, на основании которой фиксируется факт работы (с радиометкой) the intensity (cyclicality) of changes in the sensor inclination angle, on the basis of which the fact of operation is recorded (with a radio tag)	±180°	определяет угол наклона относительно вектора, направленного к центру Земли; имеет выходной логический сигнал с заданием диапазона срабатывания It determines the inclination angle relative to the vector directed to the Earth center; It has a logical output signal with setting the operating range	
Датчик контроля выгрузки сельхозпродукции Agricultural products unloading control sensor	фиксация события при достижении заданного угла наклона (в градусах) с интервалом минимум 10 мин fixing an event upon reaching a specified tilt angle (in degrees) with an interval of at least 10 minutes	0...180°	определяет угол наклона относительно вектора, направленного к центру Земли It defines the inclination angle relative to the vector directed towards the Earth center	
Счетчик мото-часов Moto hours counter	амплитудно-частотная характеристика вибрации, возникающей при работе двигателя amplitude-frequency vibration response generated during engine operation	0...1 000 000	определяет факт работы в моточасах It determines the fact of work in moto hours	
Датчик контроля качества вождения Driving quality control sensor	ускорение/замедление/поворот/попадание в ямы, опрокидывание, буксование acceleration / deceleration / turning / hitting holes, rollover, slipping	0...180° по крену и тангажу, отправная точка 90° 0...180 ° roll and pitch, starting point 90 °	проводит качественную оценку при заданном индивидуальном пороге It conducts a qualitative assessment at a given individual threshold	
* По двум диапазонам угла наклона; ** Радиометку используют для идентификации машин, прицепов и полуприцепов, навесных орудий и инструментов, прочих заменяемых устройств и механизмов				

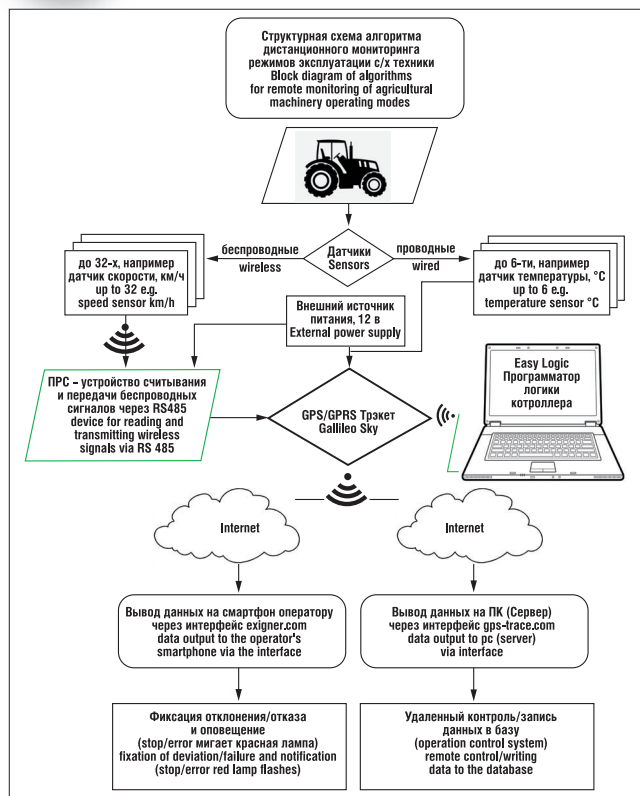


Рис. 5. Блок-схема алгоритма дистанционного мониторинга параметров при работе машины

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for remote monitoring of parameters during machine operation

тер включающий в себя передачу данных с SIM-картой и GPS-трекер *Gallileo Sky* (рис. 6). Все полученные диагностические данные передаются с помощью беспроводного GSM/GPRS модуля (*SIM800L*) в сети интернет мобильной связи и отображаются на сайте в браузере компьютера или телефона в режиме *on-line* (рис. 7). Усовершенствованную систему сбора информации можно интегрировать в общую систему мониторинга технического состояния сельхозмашин, разработанную учеными ВИМ (рис. 8).

Выводы. Усовершенствованная системы сбора информации, такая как *Gallileo Sky*, ее интеграция в общую систему мониторинга технического состояния сельхозмашин, оценка режимов работы техники с помощью цифровых систем сбора информации позволяют наиболее полно контролировать техническое состояние некоторых узлов и агрегатов в ходе мониторинга контролируемых параметров в эксплуатационных условиях. При этом техника может использоваться по назначению, совершая полезную работу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kamke E. Handbook of ordinary differential equations. Moscow: Nauka. 1971. 576.
2. Соломашкин А.А. Механизм возникновения отказа в деталях машин // *Технический сервис машин*. 2018. Т. 131. С. 99-104.
3. Stativka N., Lialina N. Formation of the organizational-eco-



Рис. 6. Расположение бортового компьютера в тракторе Kioti CK22

Fig. 6. Location of the on-board computer in the Kioti CK22 tractor



Рис. 7. Скриншот интерфейса отображения контролируемых параметров

Fig. 7. Screenshot of the monitored parameters display interface



Рис. 8. Блок-схема системы мониторинга состояния узлов трактора

Fig. 8. Block diagram of the system for monitoring tractor units state

Собранные статистические данные и их анализ помогают конкретизировать закон распределения ресурса и рассчитать такие количественные показатели надежности, как вероятность безотказной работы в допустимых пределах в течение времени, средний прогнозируемый ресурс деталей, а также частота отказов. Это позволяет оценивать текущее техническое состояние машин по динамике контролируемых параметров, характеризующих постепенное снижение функциональности машины/системы, влияющих на техническую и экологическую безопасность.

economic mechanism of agricultural enterprises energy efficiency. *Agricultural And Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2017. Vol. 3. N2. 56-64.

4. Дунаев А.В. Перспективы оптимизации периодичности обслуживания машин, оснащенных бортовыми системами

контроля // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2016. N2. С. 15-20.

5. Петрищев Н.А. Анализ и перспективы использование цифровых технологий для контроля качества эксплуатации силовых передач и ходовой части МТП // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2018. N8. С. 10-15.

6. Partko S.A., Sirotenko A.N. Self-oscillation in agricultural mobile machine units. *Journal of Physics: Conference Series: Metrological support of innovative technologies*. 2020. 42-84.

7. Северный А.Э. Руководство по техническому диагностированию при техническом обслуживании и ремонте тракторов и сельскохозяйственных машин. М.: Росинформагротех. 2001. 252 с.

8. Костенко С.И. Эксплуатация электронных средств технического диагностирования сельскохозяйственной техники. Рекомендации по организации и технология диагностирования тракторов с помощью установки КИ-13940. М.: ГОСНИТИ. 1985. 35 с.

9. Коновалов Д.Н. Анализ методов улучшения тягово-сцепных качеств и снижения буксования колесных движителей мобильных сельскохозяйственных агрегатов // *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2017. Т. 39. С. 1461-1465.

10. Федоренко В.Ф. Применение инерциальной навигации для определения буксования сельскохозяйственных тракторов // *Вестник Мордовского университета*. 2018. Т. 28. N1. С. 8-23.

11. Колпаков В.Е. Диагностика автотракторных двигателей с использованием инфракрасной термографии // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2012. N26. С. 369-372.

12. Скибневский К.Ю. Принципы оптимизации номенклатуры структурных параметров и диагностической информации // *Труды ГОСНИТИ*. 1985. Т. 75. С. 90-103.

13. Abdazimov A.D. Automation of agrotechnical assessment of cotton harvesting machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 032001.

REFERENCES

1. Kamke E. Handbook of ordinary differential equations. Moscow: Nauka. 1971. 576.

2. Solomashkin A.A. Mekhanizm vozniknoveniya otказа v detalyakh mashin [Mechanism of failure in machine parts]. *Tekhnicheskiiy servis mashin*. 2018. Vol. 131. 99-104 (In Russian).

3. Stativka N., Lialina N. Formation of the organizational-economic mechanism of agricultural enterprises energy efficiency. *Agricultural And Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2017. Vol. 3. N2. 56-64 (In English).

4. Dunaev A.V. Perspektivy optimizatsii periodichnosti obsluzhivaniya mashin, osnashchennykh bortovymi sistemami kontrolya [Prospects for optimizing the frequency of maintenance of machines equipped with on-Board control systems]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2016. N2. 15-20 (In Russian).

5. Petrishchev N.A. Analiz i perspektivy ispol'zovanie tsifrovyykh tekhnologiy dlya kontrolya kachestva ekspluatatsii silovykh pere-dach i khodovoy chasti MTP [Analysis and prospects of using digital technologies to control the quality of operation of power transmission and running gear MTP]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2018. N8. 10-15 (In Russian)..

6. Partko S.A., Sirotenko A.N. Self-oscillation in agricultural mobile machine units. *Journal of Physics: Conference Series: Metrological support of innovative technologies*. 2020. 42-84 (In English).

7. Severnyy A.E. Rukovodstvo po tekhnicheskomu diagnostirovaniyu pri tekhnicheskoy obsluzhivani i remonte traktorov i sel'skokhozyaystvennykh mashin [Guide to technical diagnostics during maintenance and repair of tractors and agricultural machines]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2001. 252 (In Russian).

8. Kostenko S.I. Ekspluatatsiya elektronnykh sredstv tekhnicheskogo diagnostirovaniya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Operation of electronic means of technical diagnostics of agricultural machinery]. Rekomendatsii po organizatsii i tekhnologiya diagnostirovaniya traktorov s pomoshch'yu ustanovki KI-13940. Moscow: GOSNITI. 1985. 35 (In Russian).

9. Konovalov D.N. Analiz metodov uluchsheniya tyagovo-stsepnnykh kachestv i snizheniya buksovaniya kolesnykh dvizhiteley mobil'nykh sel'skokhozyaystvennykh agregatov [Analysis of methods for improving traction qualities and reducing slipping of wheel movers of mobile agricultural units]. *Nauchno-metodicheskiiy elektronnyy zhurnal «Konsept»*. 2017. Vol. 39. 1461-1465 (In Russian).

10. Fedorenko V.F. Primenenie inertsiyal'noy navigatsii dlya opredeleniya buksovaniya sel'skokhozyaystvennykh traktorov [Application of inertial navigation to determine the skidding of agricultural tractors]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2018. Vol. 28. N1. 8-23 (In Russian).

11. Kolpakov V.E. Diagnostika avtotraktornykh dvigateley s ispol'zovaniem infrakrasnoy termografii [Diagnostics of automotive engines using infrared thermography]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012. N26. 369-372 (In Russian).

12. Skibnevskiy K.Yu. Printsipy optimizatsii nomenklatury strukturnykh parametrov i diagnosticheskoy informatsii [Principles of optimization of the nomenclature of structural parameters and diagnostic information]. *Trudy GOSNITI*. 1985. Vol. 75. 90-103 (In Russian).

13. Abdazimov A.D. Automation of agrotechnical assessment of cotton harvesting machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 032001 (In English).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02.11.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 02.11.2020

Статья принята к публикации 01.12.2020
The paper was accepted
for publication on 01.12.2020

ПОДПИСКА 2021

КАК
подписаться
на журнал?



ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Подписку на второе полугодие 2021 г. можно оформить
до 20 июня включительно
в почтовых отделениях связи
по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ», индекс 35825,
а также в редакции журнала

ЖУРНАЛ
«СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ»
ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК

Редакция журнала:

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01

www.vimsmi.com

e-mail: smit@vim.ru