

ISSN 2073-7599 (print)

ISSN 2618-6748 (online)

Сельскохозяйственные машины и технологии

AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Том 15 N 3 2021

Vol. 15 N 3 2021

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL



3 2021





Сельскохозяйственные машины и технологии

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

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

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

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

Перевод – Светлана Сорокина

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

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

© ФГБУ ФНАЦ ВИМ, 2020

Отпечатано в ФГБУ ФНАЦ ВИМ
Формат 205 x 290 мм
Подписано в печать 10.09.2021
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

Йошисукэ Кишида

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

Юрий Федорович Лачуга

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

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

Даврон Рустамович Норчаев

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

Юлия Сергеевна Ценч

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-THEORETICAL JOURNAL

The journal is registered by
Federal Agency for Supervision of
Legislation Observance of Mass
Communications Sphere and
Cultural Heritage Protection
Certificate ПИ No. 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 –
Svetlana Sorokina

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

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

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

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

The format is 205 × 290 mm
The issue was submitted 10.09.2021
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

Davron R. Norchaev

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

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. Chernovanov

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

**ЭКОЛОГИЯ**

- Ранта-Корхонен Т., Маркова М.В., Васильев Э.В.,
Оглуздин А.С., Васильева Н.С.**
Результаты исследования качества воды
в рамках международного проекта Луга-Балт-2 . . . 4

ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Добролюбов И.П., Утенков Г.Л.**
Оперативный контроль состояния рабочих
машин по параметрам двигателя внутреннего
сгорания 13
- Костомахин Н.М., Петрищев Н.А., Саяпин А.С.**
Система дистанционного контроля
технического состояния на примере коробки
перемены передач трактора «Кировец» 22
- Юфев Л.Ю.**
Энергосберегающее освещение
сельскохозяйственных помещений и расчет
его параметров 28

ТЕХНИКА ДЛЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА

- Сизов И.В., Блинов Ф.Л., Морозов П.В.**
Использование комбинированных рабочих
органов и агрегатов при возделывании
льна-долгунца 35
- Погосян В.М., Чаплыгин М.Е.**
Исследование динамических характеристик
планетарного початкоотделяющего аппарата . . 41

МОБИЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

- Споров А.П., Писарев Д.Ю., Парахнич А.С.**
Электропривод транспортного средства
сельскохозяйственного назначения 48

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Асовский В.П., Кузьменко А.С., Худоленко О.В.**
Оценка показателей работ беспилотных
мультикоптеров по внесению пестицидов и
агрохимикатов 55
- Марченко Л.А., Мызин М.В., Кузнецов И.В.,
Спиридонов А.Ю.**
Технический облик беспилотной авиационной
системы вертолетного типа для внесения
пестицидов и удобрений 63

ТЕХНИКА ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

- Довлатов И.М., Юрочка С.С.**
Современные системы микроклимата
и их техническая реализация
для животноводческих помещений 73

ECOLOGY

- Ranta-Korhonen T., Markova M.V., Vasil'ev E.V.,
Ogluzdin A.S. Vasil'eva N.S.**
Results of the water quality study within the
Luga-Balt-2 international project 4

INSTRUMENTS AND EQUIPMENT

- Dobrolyubov I.P., Utenkov G.L.**
Working machines state operational monitoring
according to the parameters of the internal
combustion engine. 13
- Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Sayapin A.S.**
A system for the remote monitoring of vehicle
technical condition: Kirovets tractor gearbox
case study 22
- Yuferev L.Yu.**
Energy-saving lighting of agricultural
premises and its parameters calculation 28

MACHINERY FOR PLANT GROWING

- Sizov I.V., Blinov F.L., Morozov P.V.**
The use of combined working bodies
and units for fiber flax cultivation 35
- Pogosyan V.M., Chaplygin M.E.**
Research into the dynamic characteristics of the
planetary cob-separating device 41

MOBILE ENERGY UNITS

- Sporov A.P., Pisarev D.Yu., Parakhnich A.S.**
Electric drive for an agricultural vehicle. 48

DIGITAL TECHNOLOGIES

- Asovskiy V.P., Kuzmenko A.S., Khudolenko O.V.**
Evaluation of unmanned multicopters'
performance indicators for pesticide and
agrochemical application. 55
- Marchenko L.A., Myzin M.V., Kuznetsov I.V.,
Spiridonov A.Yu.**
Technical configurations of a helicopter type
unmanned aerial system for pesticide
and fertilizer application 63

MACHINERY FOR ANIMAL INDUSTRY

- Dovlatov I.M., Yurochka S.S.**
Development of an energy-efficient
microclimate system for dairy herd
loose keeping. 73

Результаты исследования качества воды в рамках международного проекта Луга-Балт-2

Туйя Ранга-Корхонен¹,
магистр гуманитарных наук,
менеджер проекта «Луга-Балт-2»,
e-mail: tuija.ranta-korhonen@xamk.fi;
Марина Викторовна Маркова¹,
магистр естественных наук,
инженер-исследователь,
e-mail: marina.markova@xamk.fi;

Эдуард Вадимович Васильев²,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: sznii6@yandex.ru;
Александр Сергеевич Оглуздин²,
кандидат биологических наук,
главный специалист,
e-mail: ogluzdin-aleksand@yandex.ru;
Наталья Сергеевна Васильева²,
научный сотрудник,
e-mail: vasileva0203@yandex.ru

¹Университет прикладных наук Юго-Восточной Финляндии (ХАМК), Финляндия;

²Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Отметим трансграничный характер антропогенного воздействия на окружающую среду, в том числе на водные объекты, который необходимо исследовать в международном формате. (*Цель исследования*) Определить состояние воды реки Урполайоки в районе города Миккели в Финляндии и реки Луга в России для подготовки предложений по улучшению их состояния. (*Материалы и методы*) Качество воды определяли по 11 параметрам путем отбора проб воды и их анализа в лаборатории. Дополнительно Университет прикладных наук Юго-Восточной Финляндии осуществлял онлайн-мониторинг с помощью непрерывно действующего водного зонда YSI 6920-V2. Применяли стандартные методы обработки статистических, натурных данных. (*Результаты и обсуждение*) Выявили хорошее качество воды в реке Урполайоки, стабильное в течение всего периода мониторинга. Показали, что качество воды в реке Луга ухудшается в направлении ниже по течению, в частности из-за деятельности сельскохозяйственных и животноводческих хозяйств вблизи бассейна реки. Так, содержание азота по Кьельдалю и общего фосфора в точке выше по течению составляет 10,8 миллиграммов и 119 микрограммов на литр соответственно, а в точке вниз по течению – только 1,6 миллиграмма и 28 микрограммов соответственно. (*Выводы*) Определили, что анализируемые показатели соответствуют категории хорошего качества: уровень насыщения воды кислородом за период мониторинга колебался в пределах 88,76-117,83 процента; цветность составила 30 миллиграммов на литр по платиново-кобальтовой шкале, что означает небольшое содержание гумуса в воде; наличие твердых веществ в воде варьировалось от 1,1 до 2,4 миллиграмма на литр; общее содержание фосфора в воде – ниже 9,2 микрограмма на литр, то есть в пределах нормы. В ходе мониторинга реки Луга установили отчетливое влияние близлежащих сельхозпредприятий и населенных пунктов.

Ключевые слова: экологическая оценка, биогенная нагрузка на водные объекты, эвтрофикация водоемов, мониторинг качества воды в водоемах.

Для цитирования: Ранга-Корхонен Т., Маркова М.В., Васильев Э.В., Оглуздин А.С., Васильева Н.С. Результаты исследования качества воды в рамках международного проекта Луга-Балт-2 // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 4-12. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-4-12.

Results of the Water Quality Study Within the Luga-Balt-2 International Project

Tuija Ranta-Korhonen¹,
M.A.(Eng.), Luga-Balt-2 project manager,
e-mail: tuija.ranta-korhonen@xamk.fi;
Marina V. Markova¹,
M.Sc.(Eng.), research engineer,
e-mail: marina.markova@xamk.fi;

Eduard V. Vasilev²,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: sznii6@yandex.ru;
Aleksandr S. Ogluzdin²,
Ph.D.(Biol.), senior specialist,
e-mail: ogluzdin-aleksand@yandex.ru;
Natalia S. Vasileva²,
researcher, e-mail: vasileva0203@yandex.ru

¹South-Eastern Finland University of Applied Sciences (Xamk), Finland;

²Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The authors noted the transboundary nature of anthropogenic impact on the environment, including that on water bodies, which needs to be studied in an international format. (*Research purpose*) To determine the water state of the Urpolanjoki River in the Mikkeli area in Finland and the Luga River in Russia in order to prepare proposals for improvement. (*Materials and methods*) Water quality was specified by 11 parameters by sampling and analyzing them in the laboratory. Additionally, 1 South-Eastern Finland University of Applied Sciences carried out online monitoring using the YSI 6920-V2 continuous water probe. The authors used standard methods of processing statistical, field data. (*Results and discussion*) The authors revealed good, stable during the entire monitoring period, water quality in the Urpolanjoki River. The authors showed that the water quality in the Luga River deteriorates downstream, in particular, due to the agricultural and livestock farms' activities near the river basin. Thus, the Kjeldahl nitrogen and total phosphorus content at the upstream point is 10.8 milligrams and 119 micrograms per liter, respectively, and at the downstream point, it is only 1.6 milligrams and 28 micrograms, respectively. (*Conclusions*) It was determined that the analyzed indicators correspond to the category of good quality: the level of water oxygen saturation fluctuated within 88.76-117.83 per cent during the monitoring period; the color was 30 milligrams per liter on the platinum-cobalt scale, which means a low humus content in the water; the presence of solids in the water ranged from 1.1 to 2.4 milligrams per liter; the total phosphorus content in water is below 9.2 micrograms per liter, that is, within the normal limits. During the monitoring of the Luga River, a clear influence of nearby agricultural enterprises and settlements was detected.

Keywords: environmental assessment, nutrient load on water bodies, eutrophication of water bodies, monitoring of water quality in water bodies.

For citation: Ranta-Korhonen T., Markova M.V., Vasilev E.V., Ogluzdin A.S. Vasileva N.S. Rezul'taty issledovaniya kachestva vody v ramkakh mezhdunarodnogo proekta Luga-Balt-2 [Results of the water quality study within the Luga-Balt-2 international project]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 4-12 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-4-12.

Вопрос поддержания и улучшения состояния окружающей природной среды не имеет региональных и межгосударственных границ. Большие водные объекты, например Балтийское море, характеризуются большими водосборными территориями с множеством озер и рек. В таких условиях сложно улучшить состояние водного объекта без межгосударственного взаимодействия [1, 2]. Установлено постоянное ухудшение состояния Балтийского моря, в том числе и в результате сельскохозяйственной деятельности [3-7].

Университет прикладных наук Юго-Восточной Финляндии (ХАМК) участвует в проекте Луга-Балт-2 (Благополучная окружающая среда и чистые водные пути в голубое Балтийское море (*Safe Environment and Cleaner Waterways to Blue Baltic Sea*), включающий мониторинг состояния водных объектов на целевых территориях Миккели и Луга. Кроме Университета прикладных наук Юго-Восточной Финляндии, проект реализуется Центром природных ресурсов Финляндии (Luke), а также основным партнером с российской стороны ИАЭП – филиал ФНАЦ ВИМ и Межрегиональной общественной организацией «Общество содействия устойчивому развитию сельских территорий». Период реализации проекта Луга-Балт-2 – с 01.02.2019 по 31.12.2021. Проект финансируется программой *Cross-Border Cooperation* Юго-Восточная

Финляндия – Россия и Программой приграничного сотрудничества поддержки совместных проектов по внешним границам ЕС.

Цель исследования – определить качество воды рек Урполянйоки в районе города Миккели в Финляндии и реки Луга в России для подготовки предложений по улучшению их состояния.

Материалы и методы. Отобрали пробы воды и провели их анализ в лаборатории. В Университете прикладных наук Юго-Восточной Финляндии выполнили онлайн-мониторинг качества воды в пилотных точках проекта на реках Урполянйоки с помощью непрерывно действующего водного зонда.

Река Урполянйоки протекает через культурно-общественные и городские территории Миккели, а также через заливы Каттиланлахти и Пурсиаланлахти в пролив Паппиланселкя, часть водораздела Саймы ниже города Миккели. Бассейн реки Урполянйоки занимает площадь около 39,80 км² (рис. 1) [8-10].

По данным справочника 2016 г. *Mikkelin kantakaupungin ekosysteemipalvelut javiherrakenne* (Экосистемные услуги и структура озеленения в городе Миккели), 20-50% водосборной территории реки Урполянйоки имеют водонепроницаемую поверхность, но на большей части доля такого покрытия составляет всего 2-20% или даже менее 2% (рис. 2).

Водонепроницаемое покрытие препятствует вы-

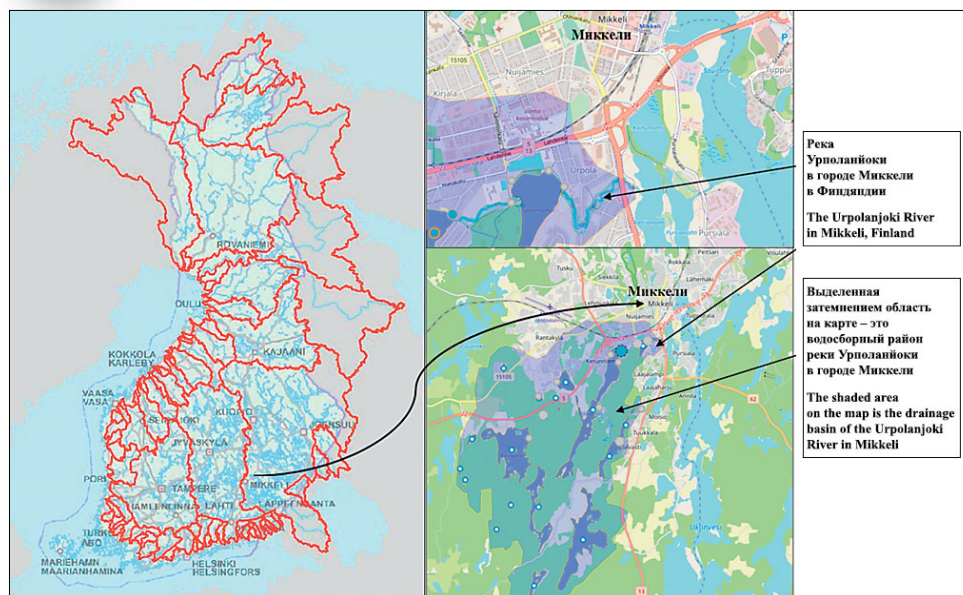


Рис. 1. Водосборный бассейн реки Урполанйоки в Миккели на карте Финляндии
Rice. 1. The drainage basin of the Urpolanjoki River in Mikkeli on the map of Finland

мыванию почвы ливневыми водами, уменьшая влияние выпадающих атмосферных осадков на качество воды в реке и биогенную нагрузку на водоем. В то же время достаточно большая территория водосборного бассейна реки Урполанйоки имеет водонепроницаемое покрытие плотностью всего 2–20% или даже менее 2%. На основании этих данных река Урполанйоки была выбрана в качестве одного из объектов исследований в рамках проекта Луга-Балт-2, так как по водным каналам ее воды через озеро Сайма в итоге попадают в Балтийское море.

Согласно классификациям директивы ЕС (*Water Framework Directive*), экологическое состояние в озере Питкяярви, самом большом в водосборе реки Урполанйоки, в основном хорошее. Однако летом периодически наблюдается цветение воды, и обнаруживаются сине-зеленые водоросли.

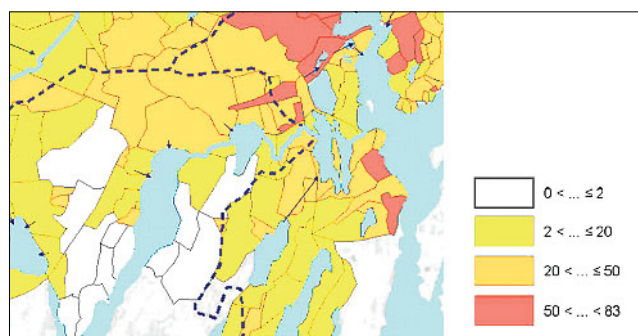


Рис. 2. Доля водонепроницаемых покрытий на водосборной территории реки Урполанйоки (ниже пунктирной линии находится территория водосборного бассейна реки Урполанйоки в Миккели), %

Fig. 2. The share of waterproof coverings in the drainage area of the Urpolanjoki River (below the dotted line is the drainage basin of the Urpolanjoki River in Mikkeli), %

В проекте Луга-Балт-2 для онлайн-мониторинга параметров воды в водоемах использовали водный зонд YSI 6920-V2, в который были установлены различные датчики для измерения параметров воды (рис. 3). Перед началом мониторинга была настроена программа выполнения измерений с требуемой периодичностью. Затем во время мониторинга получены результаты измерений в виде разнообразных пакетов данных в мобильном приложении интернет-сервиса Kolibri Cloud.

С учетом уровня развития цифровых технологий необходимо наращивать темпы использования Интернета вещей и удаленных систем мониторинга [11-13]. В рамках проекта для осуществления онлайн-мониторинга качества воды в водоемах с помощью водного зонда использовали датчики, измеряющие мутность воды (*NTU*), электрическую проводимость, кислотность, температуру, содержание растворенного в воде кислорода и уровень ее насыщения этим элементом. Интенсивность измерений – каждые полчаса, а передача данных в сервисную интернет-систему *Kolibri Cloud* осуществлялась ежесуточно. Измерения зондом на реке Урполанйоки продолжались до 1 июля 2020 г., после чего его отправили на техническое обслуживание в лабораторию.

Кроме онлайн-измерений, были взяты пробы воды – с целью периодического сопоставления результатов измерений зонда с результатами лабораторных анализов проб воды, так как водный зонд непрерывного действия находился в реке в месте проведения исследований на протяжении трех месяцев. Кроме то-



Рис. 3. Водный зонд YSI 6920 V2: а – общий вид; б – передатчик; в – измерительные датчики

Fig. 3. Water probe YSI 6920 V2: a – general view; b – transmitter; c – measuring sensors

го, пробы воды отбирались для определения дополнительных параметров воды лабораторными методами.

Образцы воды отбирали примерно каждые две недели в течение периода мониторинга на реке Урполанйоки в месте установки зонда.

ИАЭП – филиал ФНАЦ ВИМ проводил отбор проб воды на реке Луга и ее притоках. Река Луга берет начало в Новгородской области из Тесовских болот и впадает в Финский залив в Усть-Луге Ленинградской области. В водосборе реки расположены поселковые центры, рекреационные поселки, а также животноводческие и фермерские хозяйства.

Пробы речной воды отбирали в 2019 г. в восьми разных точках 23 мая, 8 июля, 28 августа, 26 сентября, 23 октября и 24 декабря. Точки отбора проб были выбраны на основе предварительных данных по территории реки Луга (рис. 4). Некоторые из них располагались в непосредственной близости от мест, вызывающих обильное загрязнение воды.

Точка № 1 располагалась выше по течению реки, а остальные находились последовательно вниз по течению.

В реке Луга исследовали пробы воды по общепринятым методикам на следующие показатели: электропроводность, pH , ионы калия, аммония и нитрата, а также общий фосфор и общий азот. Применяли стандартные методы обработки статистических, натурных данных.

Результаты и обсуждение. В 2019-2020 гг. фактически не было обычных осенних заморозков и весеннего половодья, но случались зимние заморозки и оттепели. Кроме того, значительная часть зимних осадков выпадала в виде дождя. Зимой 2019-2020 гг. уровень воды в реке значительно превысил обычную отметку, а водное течение стало интенсивнее, чем обыч-

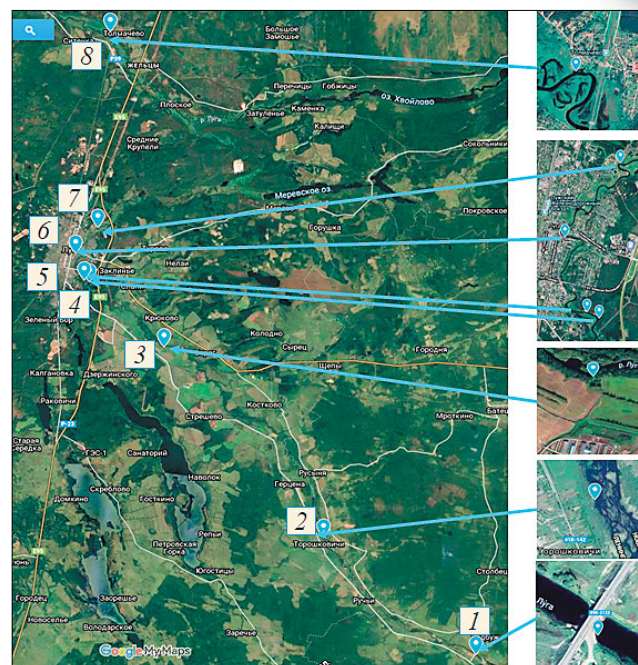


Рис. 4. Расположение точек отбора проб воды на реке Луга
Fig. 4. The location of water sampling points on the Luga river

но в это время. Кроме того, отсутствие сплошного снежного покрова и присущих данной местности морозов зимой увеличило вымывание почвы, следовательно, возросло количество биогенных веществ в водоемах.

Результаты мониторинга выявили хорошее качество воды в реке Урполанйоки (табл. 1). Уровень насыщения воды кислородом колебался в пределах 88,76-117,83%. Это свидетельствует об отличном качестве воды в соответствии с предельными значениями 85-110%, установленными Институтом окружающей среды Финляндии. Уровень электропроводности, а также

Таблица 1

Table 1

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБ ВОДЫ ИЗ РЕКИ УРПОЛАНЙОКИ В МИККЕЛИ (ФИНЛЯНДИЯ) ВЕСНОЙ 2020 г.
RESULTS OF LABORATORY STUDIES OF WATER SAMPLES FROM THE URPOLANJOKI RIVER IN MIKKELI (FINLAND) IN THE SPRING OF 2020

Дата отбора проб воды Water sampling date	Количество растворенного кислорода, мг/л Dissolved oxygen, mg/l	Уровень насыщения кислородом, % Oxygen saturation level, %	Электропроводность, мкСм/см Electrical conductivity, µS/cm	pH	Цвет, мг/л Pt Color, mg/l Pt	Взвешенные вещества, мг/л Suspended substances, mg/l	Общий фосфор, мкг/л Total phosphorus, µg/l
24.04.2020	11,20	89,58	90,4	6,71	30	1,1	9,200
04.05.2020	11,95	102,18	88,00	6,67	30	2,4	7,730
12.05.2020	12,74	110,78	82,50	6,86	30	1,7	5,570
27.05.2020	11,43	117,83	82,50	6,86	30	1,7	8,540
08.06.2020	9,73	101,40	81,50	6,94	30	1,6	7,660
25.06.2020	7,46	88,76	83,50	7,13	30	—	8,595
Границы значений параметров для классификации качества воды Limits of parameter values for water quality classification	4-10	85-110	50-100	6,5-6,8	20-40	1-3	<15

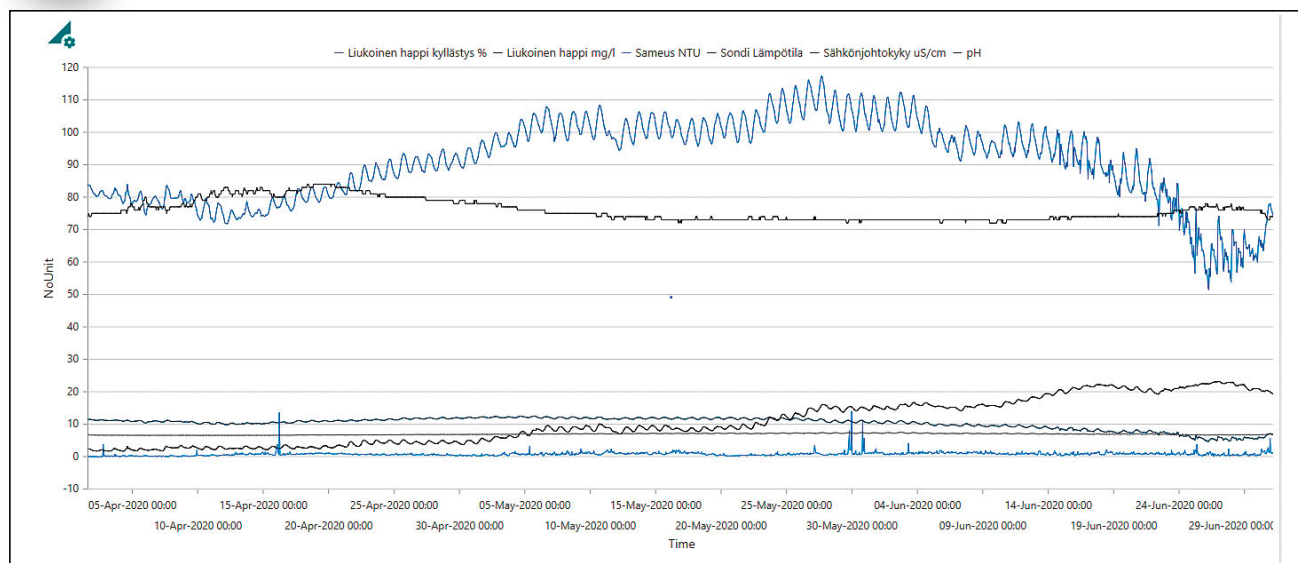


Рис. 5. Динамика показателей качества воды в реке Урполанйоки (Миккели, Финляндия) из интернет-сервиса Kolibri Cloud
Fig. 5. The dynamics of water quality indicators in the Urpolanjoki River (Mikkeli, Finland) from the Kolibri Cloud Internet service

pH были типичными для поверхностных вод Финляндии. Цветность составила 30 мг Pt/l , что означает небольшое содержание гумуса в воде. Содержание твердых веществ в воде варьировалось от 1,1 до 2,4 мг/л, что также характерно для поверхностных вод Финляндии (в пределах 1-3 мг/л). Общее содержание фосфора в воде было ниже 9,2 мкг/л, то есть незначительным (норма – менее 15 мкг/л). Результаты онлайн-мониторинга показали, что качество воды в реке Урполанйоки в течение всего периода оставалось стабильным.

По данным интернет-сервиса *Kolibri Cloud* за период мониторинга 01.04.2020 – 01.07.2020 г. составили график (рис. 5). По некоторым параметрам не отображаются их величины, что связано с искажением градуировки по оси Y из-за множества различных по размерностям данных. Однако хорошо видна их динамика. Более детальный анализ за период изме-

ний выполнен на основе базы данных путем загрузки результатов измерений из системы *Kolibri Cloud* в виде файлов в форматах *CSV* и *Excel*.

Качество воды в реке Урполанйоки оставалось стабильно хорошим в течение всего периода мониторинга. Вода достаточно насыщена кислородом, с низким содержанием гумуса, довольно прозрачная, с небольшой концентрацией общего фосфора. Результаты измерений водного зонда и лабораторных анализов проб воды совпадают в пределах допустимых погрешностей измерений. Например, на 24.04.2020 значение pH по данным зонда составляло 6,67, по результатам анализа пробы воды – 6,71, содержание кислорода – 85,70 и 89,58% соответственно.

Мониторинг качества воды в реке Луга провели по семи показателям (табл. 2). В таблице точки отбора проб расположены в порядке от верховьев реки Лу-

Таблица 2

Table 2

КАЧЕСТВО ВОДЫ РЕКИ ЛУГА В ПЕРИОД МОНИТОРИНГА 2019 г.
THE LUGA RIVER WATER QUALITY DURING THE MONITORING PERIOD OF 2019

Точки отбора проб* Sampling points*	Электропроводность, мкСм/см Electrical conductivity, $\mu S/cm$	pH	K^+ , мг/л mg/l	NH_4^+ , мг/л mg/l	NO_3^- , мг/л mg/l	Азот N (Кьельдаль), мг/л Nitrogen N (Kjeldahl), mg / l	Общий фосфор P , мкг/л Total phosphorus P , $\mu g/L$
1	270	7,5	0,18	0,06	0,6	1,5	8
2	420	7,5	0,44	0,18	1,8	1,9	29
3	1040	7,3	8,59	5,04	13,2	10,8	119
4	570	7,6	1,04	2,58	10,6	12,5	41
5	360	7,7	0,30	1,20	0,8	1,6	24
6	370	7,7	0,33	1,26	1,0	2,1	29
7	370	7,7	0,34	1,21	1,0	1,6	29
8	380	7,7	0,34	1,21	1,1	1,6	28

*Точки расположены в направлении от верховья до нижних вод

*The points are located in the direction from the headwaters to the lower waters

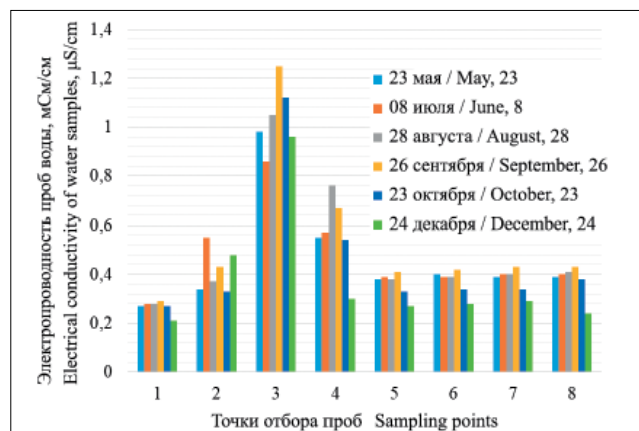


Рис. 6. Изменение электропроводности в точках отбора проб воды на реке Луга в 2019 г.

Fig. 6. Changes in electrical conductivity at the water sampling points in the Luga River in 2019

ги до нижних вод.

Точки отбора проб № 3 и 4 расположены вблизи участков, вызывающих загрязнение воды. Точка № 3 находится в конце дренажной канавы, имеющей на своем водосборе животноводческую ферму и поля, куда систематически вносят органические удобрения в больших дозах. В этой точке концентрация общего азота, ионов аммония, нитратов, общего фосфора превышает значения в остальных точках взятия проб воды. Такая же тенденция характерна и для электропроводности и ионов калия. Около ручья Стрельный, впадающего в р. Луга (точка мониторинга № 4), расположено множество частных домовладений, которые скорее всего не в достаточной мере очищают свои стоки.

Антропогенное влияние на воду в каналах, впадающих в реку Луга, отчетливо прослеживается вблизи точек отбора проб № 3 и 4 (рис. 6). Электропроводность характеризует содержание ионов биогенов в пробах воды, ее значение прямо пропорционально их содержанию. В точках отбора проб воды № 3 и 4 значение электропроводности воды в среднем в течение года составляет 1,04 и 0,57 мСм/см соответственно, что выше значений пробы воды, не подверженной воздействию со стороны деятельности человека (точка № 1 – 0,27 мСм/см) [14, 15].

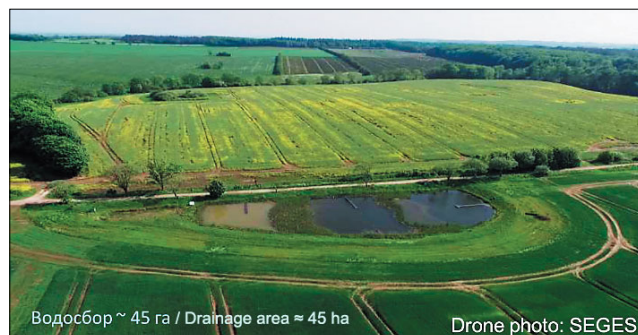


Рис. 7. Водно-болотное угодье

Fig. 7. Wetland

Анализ результатов мониторинга показал, что качество воды в реке Луга ухудшается в направлении ниже по течению, в частности из-за деятельности земледельческих и животноводческих хозяйств вблизи бассейна реки. Между точками отбора проб № 5 и 8 нет значительных изменений качества воды. Можно предположить, что концентрации биогенных элементов разбавляются при спуске вниз по течению реки водой из ее водосбора, а также в ходе внутренних процессов в водном объекте, таких как осаждение твердых веществ в донных отложениях и фильтрование в водной растительности. Так, содержание азота по Кьельдалю и общего фосфора в точке № 3 составляет 10,8 мг/л и 119 мкг/л соответственно, а в точке № 8, ниже по течению, – 1,6 мг/л и 28 мкг/л, то есть значительно меньше (табл. 2).

Снижение поступления биогенов в водные объекты может быть достигнуто с применением следующих организационно-технологических мер:

- минимизировать количество применяемых удобрений в пойме реки, в руслах водотоков, поступающих в реку Луга;
- менять русла с целью снижения скорости движения воды в дренажных каналах мелиорационных систем;
- высаживать азотопоглощающие культуры: тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), рогоз широколистный (*Typha latifolia*) и схеноплектус озерный (*Schoenoplectus lacustris*) и т.п.;
- создавать водно-болотные угодья для естественной очистки стоков (рис. 7);
- установить локальные очистные сооружения в частных домовладениях, расположенных выше по течению впадающих в реку ручьев [16-20].

Выводы. Выявили, что вода в реке Урполянйоки в Миккели (Финляндия) соответствует категории хорошего качества. Уровень насыщения воды кислородом колебался в пределах 88,76-117,83%. Это свидетельствует об отличном качестве воды в соответствии с предельными значениями 85-110%, установленными Институтом окружающей среды Финляндии. Уровень электропроводности, а также *pH* были типичными для поверхностных вод Финляндии. Цветность составила 30 мг Pt/л, что означает небольшое содержание гумуса в воде. Содержание твердых веществ в воде варьировалось от 1,1 до 2,4 мг/л, что также характерно для поверхностных вод Финляндии (в пределах 1-3 мг/л). Общее содержание фосфора в воде было ниже 9,2 мкг/л, то есть незначительным (норма – менее 15 мкг/л). Результаты онлайн-мониторинга показали, что качество воды в реке Урполянйоки в течение всего периода оставалось стабильным.

В ходе мониторинга реки Луга установлено отчетливое влияние близлежащих сельскохозяйственных предприятий (точка № 3) и населенных пунктов (точка № 4), где содержание общего фосфора в разы превышает показатель пробы, взятой в верховье: 119 и

41 мкг/л против 8 мкг/л. Можно предположить, что концентрации биогенных элементов разбавляются при спуске вниз по течению реки водой из ее водосбора, а также в ходе внутренних процессов в водном объекте, таких как осаждение твердых веществ в донных отложениях и фильтрование в водной растительности.

Для снижения количества поступающих биогенов в р. Луга предложены технологические и организационные меры:

- минимизация количества применяемых удобрений в пойме реки, в руслах водотоков, поступающих в р. Луга;

- создание водно-болотных угодий для естественной очистки стоков;
- установка в частных домовладениях локальных очистных сооружений;
- строительство водно-болотного угодья.

Результаты исследований, представленные в статье, получены при частичной финансовой поддержке международного проекта Луга-Балт-2 «Благополучная окружающая среда и чистые водные пути в голубое Балтийское море» (Safe Environment and Cleaner Waterways to Blue Baltic Sea).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Васильев Э.В., Минакова Е.А., Терехов А.В., Обломкова Н.С. Оценка сельскохозяйственной биогенной нагрузки, сформированной на речных водосборах бассейна Куйбышевского водохранилища // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. №96. С. 175-186.
2. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторов Н.В., Ершова А.А., Обломкова Н.С. К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря // *Ученые записки РГГМУ*. 2018. №51. С. 109-120.
3. Atilgan A., Yucel A., Markovic M. Determination of relationship between water level, volume and meteorological variables: study of lake Egirdir. Engineering for rural development. Proceedings of the 19th International Scientific Conference. 2020. Vol. 19. 140-146.
4. Karlson B., Andersson L.S., S Kaitala, Kronsell J., Mohlin M., Seppälä J., Willstrand Wranne A. A comparison of FerryBox data vs. monitoring data from research vessels for near surface waters of the Baltic Sea and the Kattegat. *Journal of Marine Systems*. 2016. Vol. 162. 98-111.
5. Gyraite G., Kataržytė M., Overlingė D., Vaičiūtė D., Jonikaitė E., Schernewski G. Skip the Dip – Avoid the Risk? Integrated Microbiological Water Quality Assessment in the South-Eastern Baltic Sea Coastal Waters. *Water*. 2020. 12(11). 3146.
6. Capo E., Bravo A.G., Soerensen A.L., Bertilsson S., Pinhassi J., Feng C., Andersson A.F., Buck M., Björn E. Deltaproteobacteria and Spirochaetes-Like Bacteria Are Abundant Putative Mercury Methylators in Oxygen-Deficient Water and Marine Particles in the Baltic Sea. *Frontiers in Microbiology*. 2020. N11. 574080.
7. Kalinowska D., Wielgat P., Kolerski T., Zima P. Model of Nutrient and Pesticide Outflow with Surface Water to Puck Bay (Southern Baltic Sea). *Water*. 2020. N12. 809.
8. Hovik S. Integrated Water Quality Governance and Sectoral Responsibility: The EU Water Framework Directive's Impact on Agricultural Sector Policies in Norway. *Water*. 2019. N11. 2215.
9. Hendry S. The Eu Water Framework Directive – Challenges, Gaps and Potential for the Future. *Journal for European environmental & planning law*. 2017. Vol. 14. Iss. 3-4. 249-268.
10. Wiering M., Boezeman D., Crabbé A. The Water Framework Directive and Agricultural Diffuse Pollution: Fighting a Running Battle? *Water*. 2020. N12(5). 1447.
11. Júnior A.C.D.S., Munoz R., Quezada M.D.L.Á., Neto A.V.L., Hassan M.M., Albuquerque V.H.C.D. Internet of Water Things: A Remote Raw Water Monitoring and Control System. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. 35790-35800.
12. Hattarak S., Patil A., Kulkarni S. Integrated Water Monitoring and Control System-IWMCS. IEEE. Bangalore Humanitarian Technology Conference. 2020. 1-5.
13. Siirriä S., Roiha P., Tuomi L., Purokoski T., Haavisto N., Alenius P. Applying area-locked, shallow water Argo floats in Baltic Sea monitoring. *Journal of Operational Oceanography*. 2019. Vol. 12. N1. 58-72.
14. Ageev I.M., Rybin Y.M. Features of Measuring the Electrical Conductivity of Distilled Water in Contact with Air. *Meas Tech*. 2020. N62. 923-927.
15. Zimmerman B.A., Kaleita A.L. Electrical conductivity of agricultural drainage water in Iowa. *Applied engineering in agriculture*. 2017. Vol. 33. 369-378.
16. Hoffmann C.C., Kjærgaard C. Optimeret kvælstoffjernelse i matricevådområder. *Vand & Jord*. 2017. N3. 101-105.
17. Васильев Э.В. Повышение эколого-экономической эффективности процесса использования жидкого органического удобрения путем автоматизированного выбора рациональных вариантов технологий транспортировки и внесения в условиях Северо-Западного региона // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2013. N4(12). С. 127-133.
18. Личман Г.И., Белых С.А., Марченко А.Н. Способы внесения удобрений в системе точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 4-9.
19. Pozdnyakov Sh.R., Briukhanov A.Yu., Kondrat'ev S.A., Ignat'eva N.V., Shmakova M.V., Minakova E.A., Rasulova A.M., Oblomkova N.S., Vasil'ev E.V., Terekhov A.V. Perspectives of the Reduction of Nutrient Export from River Watersheds through the Introduction of Best Available Technologies for Agricultural Production: Based on Modeling Results. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. N5. 771-784.

20. Martikainen K., Kauppinen A., Matikka V., Veijalainen A.-M., Torvinen E., Pitkänen T., Miettinen I.T., Heinonen-Tanski H. Efficiency of Private Household Sand Filters in Re-

moving Nutrients and Microbes from Wastewater in Finland. *Water*. 2018. N10. 1000.

REFERENCES

1. Bryuhanov A.Yu., Kondrat'ev S.A., Vasilev E.V., Minakova E.A., Terekhov A.V., Oblomkova N.S. Otsenka sel'skokhozyaystvennoy biogennoy nagruzki, sformirovannoy na rechnykh vodosborakh basseyna Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Assessment of agricultural nutrient load generated on the river catchment areas within the kuybyshev reservoir basin]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. N96. 175-186 (In Russian).
2. Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V., Bryuhanov A.Yu., Viktorova N.V., Ershova A.A., Oblomkova N.S. K otsenke biogenogo stoka v Finskiy zaliv Baltiyskogo moraya [To the evaluation of nutrient removal to the gulf of finland of the baltic sea]. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2018. N51. 109-120 (In Russian).
3. Atilgan A., Yucel A., Markovic M. Determination of relationship between water level, volume and meteorological variables: study of lake Egirdir. Engineering for rural development. Proceedings of the 19th International Scientific Conference. 2020. Vol. 19. 140-146 (In English).
4. Karlson B., Andersson L.S., Kaitala S., Kronsell J., Mohlin M., Seppälä J., Willstrand Wranne A. A comparison of FerryBox data vs. monitoring data from research vessels for near surface waters of the Baltic Sea and the Kattegat. *Journal of Marine Systems*. 2016. Vol. 162. 98-111 (In English).
5. Gyraite G., Kataržytė M., Overlingė D., Vaičiūtė D., Jonikaitė E., Schernewski G. Skip the Dip – Avoid the Risk? Integrated Microbiological Water Quality Assessment in the South-Eastern Baltic Sea Coastal Waters. *Water*. 2020. N12(11). 3146 (In English).
6. Capo E., Bravo A.G., Soerensen A.L., Bertilsson S., Pinhasi J., Feng C., Andersson A.F., Buck M., Björn E. Deltaproteobacteria and Spirochaetes-Like Bacteria Are Abundant Putative Mercury Methylators in Oxygen-Deficient Water and Marine Particles in the Baltic Sea. *Frontiers in Microbiology*. 2020. N11. 574080 (In English).
7. Kalinowska D., Wielgat P., Kolerski T., Zima P. Model of Nutrient and Pesticide Outflow with Surface Water to Puck Bay (Southern Baltic Sea). *Water*. 2020. N12. 809 (In English).
8. Hovik S. Integrated Water Quality Governance and Sectoral Responsibility: The EU Water Framework Directive's Impact on Agricultural Sector Policies in Norway. *Water*. 2019. N11. 2215 (In English).
9. Hendry S. The Eu Water Framework Directive – Challenges, Gaps and Potential for the Future. *Journal for European environmental & planning law*. 2017. Vol. 14. N3-4. 249-268 (In English).
10. Wiering M., Boezeman D., Crabbé A. The Water Framework Directive and Agricultural Diffuse Pollution: Fighting a Running Battle? *Water*. 2020. N12(5). 1447 (In English).
11. Júnior A.C.D.S., Munoz R., Quezada M.D.L.Á., Neto A.V.L., Hassan M.M., Albuquerque V.H.C.D. Internet of Water Things: A Remote Raw Water Monitoring and Control System. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. 35790-35800 (In English).
12. Hattaraki S., Patil A., Kulkarni S. Integrated Water Monitoring and Control System-IWMCS. IEEE. Bangalore Humanitarian Technology Conference. 2020. 1-5 (In English).
13. Siiriä S., Roiha P., Tuomi L., Purokoski T., Haavisto N., Alenius P. Applying area-locked, shallow water Argo floats in Baltic Sea monitoring. *Journal of Operational Oceanography*. 2019. Vol. 12. N1. 58-72 (In English).
14. Ageev I.M., Rybin Y.M. Features of Measuring the Electrical Conductivity of Distilled Water in Contact with Air. *Meas Tech*. 2020. N62. 923-927 (In English).
15. Zimmerman B.A., Kaleita A.L. Electrical conductivity of agricultural drainage water in Iowa. *Applied engineering in agriculture*. 2017. Vol. 33. 369-378 (In English).
16. Hoffmann C.C., Kjærgaard C. Optimeret kvælstoffjernelse i matricevådområder. *Vand & Jord*. 2017. N3. 101-105 (In Finnish).
17. Vasilev E.V. Povyshenie ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti protsessov ispol'zovaniya zhidkogo organicheskogo udobreniya putem avtomatizirovannogo vybora ratsional'nykh variantov tekhnologiy transportirovki i vneseniya v usloviyakh Severo-Zapadnogo regiona [Increasing the ecological and economic efficiency of the process of using liquid organic fertilizers by automated selection of rational options for transportation and application technologies in the North-West region]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2013. N4(12). 127-133 (In Russian).
18. Lichman G.I., Belyh S.A., Marchenko A.N. Sposoby vnesheniya udobreniy v sistemu tochnogo zemledeliya [Methods of applying fertilizers in precision agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. T. 12. N4. 4-9 (In Russian).
19. Pozdnyakov Sh.R., Briukhanov A.Yu., Kondrat'ev S.A., Ignat'eva N.V., Shmakova M.V., Minakova E.A., Rasulova A.M., Oblomkova N.S., Vasilev E.V., Terekhov A.V. Perspectives of the Reduction of Nutrient Export from River Watersheds through the Introduction of Best Available Technologies for Agricultural Production: Based on Modeling Results. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. N5. 771-784 (In English).
20. Martikainen K., Kauppinen A., Matikka V., Veijalainen A.-M., Torvinen E., Pitkänen T., Miettinen I.T., Heinonen-Tanski H. Efficiency of Private Household Sand Filters in Removing Nutrients and Microbes from Wastewater in Finland. *Water*. 2018. N10. 1000 (In English).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ранта-Корхонен Т. – проведение мониторинга качества воды в реке Урполанйоки (Миккели, Финляндия) в рамках реализации проекта «Луга-Балт-2» в Университете прикладных наук Юго-Восточной Финляндии, включая лабораторные исследования, взятие проб воды и онлайн-мониторинг с помощью водного зонда, а также написание статьи и ее редактирование, формирование общих выводов по состоянию воды в реке Урполанйоки.

Маркова М.В. – проведение мониторинга качества воды в реке Урполанйоки (Миккели, Финляндия) в рамках реализации проекта «Луга-Балт2» в Университете прикладных наук Юго-Восточной Финляндии, включая лабораторные исследования по всем показателям качества воды, взятие проб воды и онлайн-мониторинг с помощью водного зонда, анализ полученных результатов, подготовка необходимых расчетов и визуальных материалов, а также написание статьи и ее редактирование, финско-русский перевод.

Васильев Э.В. – проведение мониторинга реки Луга в Ленинградской области, анализ его результатов, подготовка заключения по реке Луга, общее форматирование статьи.

Оглуздин А.С. – отбор проб в реке Луга, их агрохимический анализ, подготовка экспертного заключения по состоянию воды.

Васильева Н.С. – обработка результатов исследования по реке Луга, общая визуализация и литературный анализ.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The coauthors' contributions:

Ranta-Korhonen T. – monitoring the water quality in the Urpolanjoki River (Mikkeli, Finland) within the Luga-Balt2 project at the South-Eastern Finland University of Applied Sciences, including laboratory studies, water sampling and online monitoring using a water probe, as well as writing and editing the article, forming general conclusions on the water state in the Urpolanjoki River.

Markova M.V. – monitoring the water quality in the Urpolanjoki River (Mikkeli, Finland) within the Luga-Balt2 project at the South-Eastern Finland University of Applied Sciences, including laboratory studies on all water quality indicators, water sampling and online monitoring using a water probe, the analysis of the results obtained, preparing necessary calculations and visual materials, as well as writing and editing the article, Finnish-Russian translation.

Vasilev E.V. – monitoring the Luga River in the Leningrad region, the analysis of monitoring results, preparing the conclusions on the Luga River, the article general formatting.

Ogluzdin A.S. – sampling in the Luga River, agrochemical analysis of the selected samples preparing an expert report on the water state

Vasileva N.S. – processing the results of the Luga River study, general visualization and literature analysis.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

11.03.2021

01.09.2021

Оперативный контроль состояния рабочих машин по параметрам двигателя внутреннего сгорания

Иван Петрович Добролюбов¹,
доктор технических наук,
профессор;

Геннадий Леонидович Утенков²,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;
e-mail: utenkov1951@mail.ru

¹Новосибирский государственный аграрный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация;

²Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий, п. Краснообск, Новосибирская область, Российская Федерация

Реферат. Показали, что несовершенство методов точного земледелия, способов передачи энергии от двигателя трактора к рабочим органам требуют разработки новых методов достоверной и точной идентификации почвы и ее свойств, а также состояния машинно-тракторных агрегатов. (*Цель исследований*) Достоверно и оперативно в эксплуатационных условиях сельскохозяйственного производства определить фактические энергетические и экономические показатели рабочей машины и агрегата по параметрам, тесно связанным с энергетическими показателями двигателя внутреннего сгорания, измерение которых не требует больших затрат. (*Материалы и методы*) Для оперативной оценки использовали 24 косвенных параметра, отражающих мощность и степень нагрузки двигателя. При этом учитывали угловые ускорения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания и ротора турбокомпрессора, в том числе вызванные работой отдельных цилиндров, рабочие процессы генератора (их средние и экстремальные значения), а также амплитудно-частотные спектры этих процессов, скоростные характеристики. Для повышения точности и достоверности оценки энергетических показателей провели селекцию процессов в частотной и фазовой областях. (*Результаты и обсуждение*) Рассмотренные методы апробировали в производственных условиях при основной обработке солонцово-черноземных комплексов Чулымского района Новосибирской области. Выявили, что применение гибкого машинно-тракторного агрегата на базе энергонасыщенного трактора улучшило качество обработки почвы: доля почвенных комков размером менее 5 сантиметров составила 73-80 процентов; производительность почвообрабатывающего агрегата увеличилась на 15-20 процентов. (*Выводы*) Доказали, что с помощью косвенно определяемых показателей мощности и степени нагрузки можно оценить фактические значения энергетических и технико-экономических показателей рабочей машины и агрегата, качество комплектования агрегата, неоднородность почвы значительно проще и дешевле, чем посредством известных силоизмерительных методов. Выявили, что применение цифровых систем автоматического управления агрегатом с использованием указанных параметров позволяет достаточно просто обеспечить задание оптимальной зоны энергетических режимов.

Ключевые слова: агрегат «двигатель внутреннего сгорания – рабочая машина», агрегат «моторно-транспортное средство – рабочая машина», энергетические режимы, оперативный контроль, автоматическое управление, параметры двигателя внутреннего сгорания, косвенные показатели мощности и нагрузки.

Для цитирования: Добролюбов И.П., Утенков Г.Л. Оперативный контроль состояния рабочих машин по параметрам двигателя внутреннего сгорания // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 13-21. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-13-21.

Working machines state operational monitoring according to the parameters of the internal combustion engine

Ivan P. Dobrolyubov¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor;

Gennady L. Utenkov²,
Ph.D.(Eng.), leading researcher;
e-mail: utenkov1951@mail.ru

¹Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russian Federation;

²Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russian Federation

Abstract. The authors showed that the imperfection of precision farming methods, methods of transferring energy from the tractor engine to the working bodies required the development of new methods for reliable and accurate identification of the soil and its

properties, as well as the state of machine-tractor units. (*Research purpose*) To determine the actual energy and economic indicators of a working machine and unit reliably and promptly in the operating conditions of agricultural production by parameters closely related to the energy indicators of an internal combustion engine, the measurement of which did not require large costs. (*Materials and methods*) 24 indirect parameters reflecting the power and degree of engine load were used for the operational assessment. In this case, the angular accelerations of the internal combustion engine and the turbocharger rotor crankshaft, including those caused by the operation of individual cylinders, the working processes of the generator (their average and extreme values), as well as the amplitude-frequency spectra of these processes, and speed characteristics were taken into account. To improve the accuracy and reliability of the assessment of energy indicators, the authors selected the processes in the frequency and phase domains. (*Results and discussion*) The considered methods were tested in production conditions during the main processing of the alkaline-chernozem complexes of the Chulym district of the Novosibirsk region. The authors found that the use of a flexible machine-tractor unit based on an energy-rich tractor improved the quality of soil cultivation: the share of soil lumps less than 5 centimeters in size was 73-80 percent; the productivity of the tillage machine increased by 15-20 percent. (*Conclusions*) The authors proved that with the help of indirectly determined indicators of power and degree of load, it was possible to estimate the actual values of the energy and technical and economic indicators of the working machine and the unit, the quality of the assembly of the unit, the heterogeneity of the soil was much easier and cheaper than using the known force-measuring methods. It was found that the use of digital systems for automatic control of the unit using the indicated indicators made it possible to provide quite simply the setting of the optimal zone of energy modes.

Keywords: unit “internal combustion engine – working machine”, unit “motor vehicle – working machine”, energy modes, operational control, automatic control, parameters of an internal combustion engine, indirect indicators of power and load.

For citation: Dobrolyubov I.P., Utenkov G.L. Operativnyy kontrol' sostoyaniya rabochikh mashin po parametram dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Working machines state operational monitoring according to the parameters of the internal combustion engine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 13-21 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-13-21.

Интенсификация производства – важное условие повышения его эффективности. В то же время независимо от уровня интенсивности технологии повышаются затраты ресурсов и энергии на получение единицы продукции [1, 2]. Полагают, что «уравнительная» система земледелия и механизация сельскохозяйственного производства с усредненными показателями в пахотном слое приводят к экспоненциальному росту затрат и нарушают экологическое равновесие [3]. Для зернового производства, преобладающего в Западной Сибири, при урожайности 1,5 т/га характерны экстенсивное ведение хозяйства, высокая энергоемкость и экологическая несбалансированность, что не соответствует ресурсному потенциалу агроландшафтов [4]. Считается, что интенсификация способствует ресурсосбережению. Однако ежегодный экологический ущерб от интенсификации аграрного сектора в России превышает 3 млрд руб. [5]. Современная техносфера не может гармонично сосуществовать с биосферой, поскольку создана не по ее законам эволюции [6]. Причем любое несоответствие технологии или ее элементов почвенно-климатическим особенностям приводит к экономическим и экологическим издержкам [7]. Так, «вредная работа», обусловленная несовершенством способа передачи энергии от двигателя трактора к рабочим органам, достигает 42-54% от общей интенсивности механического воздействия на почву (деградация почвы и загрязнение выхлопными газами окружающей среды) [8].

Даже нормальные технологии, преобладающие в сельхозпроизводстве, связаны с риском деградации

почв. Из-за действия случайных возмущений на машинно-тракторные агрегаты всего 20-30% от номинальной величины мощности, развиваемой двигателем, идет на выполнение технологических операций [10]. В условиях Сибири коэффициент использования рабочего времени смены из-за технических и технологических отказов, прежде всего у сельскохозяйственных машин, не превышает 0,45-0,55 [11]. А неудовлетворительное качество совокупности технологических операций (вспашка, культивация, боронование, посев), выполняемых в условиях нечерноземья Урала и Западной Сибири, снижает урожайность зерновых культур до 40% [12].

Именно недостаток техники – одна из главных причин, сдерживающих развитие аграрного производства в Новосибирской области. Поэтому требуется разработка математических моделей для обоснования технического оснащения [13]. Обеспеченность сельского хозяйства современной техникой остается основным лимитирующим фактором технологической модернизации земледелия [14]. Считают, что новые информационные и коммуникационные технологии способствуют повышению эффективности сельхозпроизводства: снижают транзакционные издержки, выравнивают условия конкуренции для мелких фермеров и делают сельское хозяйство «умным» [15, 16]. Так, техническое совершенство, направленное на создание бортовой системы для трактора с перспективой полной его автоматизации, позволит повысить производительность труда в 2-3 раза и снизить общие эксплуатационные расходы на 20% и более [17].

Однако используемые в технологиях точного земледелия методы дискретного и непрерывного дистанционного зондирования земли недостаточно эффективны для принятия обоснованных технологических решений и их технического обеспечения [18]. Получаемая в режимах *off-line* или *on-line* общая информация распределения элементов питания и урожайности не соответствует точному земледелию и не уменьшает риски в сельхозпроизводстве. Недоучет случайных характеристик оптических показателей и производных от их величин приводит к существенным ошибкам и серьезным методическим погрешностям при применении вегетационного индекса *NDVI*, оценивающего динамику развития сельскохозяйственных культур. В целом задача получения количественных оценок параметров состояния посевов и почвенной среды остается не решенной до настоящего времени [19]. Актуальным также считается создание научно обоснованной методики разделения реально неоднородного сельскохозяйственного поля на условно однородные (технологически гомогенные) участки, в пределах которых оправдано применение недифференцированных агротехнологий [20]. Нужны новые количественные методы и модели для конкретного случая [13, 18, 21].

Эффективность агрегатов «двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – рабочая машина (РМ)», «моторно-транспортное средство – РМ» во многом зависит от того, насколько оптимально может быть реализовано управление факторами, влияющими на их производительность и качество выполнения работ. Для этого необходимо достоверно определить фактические энергетические и экономические показатели РМ и агрегата. Повышению качества контроля может способствовать использование параметров, тесно связанных с энергетическими показателями ДВС, измерение которых не вызывает значительных затруднений [22, 23].

Цель исследований – достоверно и оперативно в производственных условиях определить фактические энергетические и экономические показатели РМ и агрегата по параметрам, тесно связанным с энергетическими показателями ДВС, измерение которых не требует больших затрат.

Материалы и методы. Производительность агрегата с приводом от ДВС равна [22, 23]:

$$W_{\phi} = \int_0^{T_p} k_{w0} \frac{N_e}{R_M} dt = \int_0^{T_p} k_{w0} N_{e \text{ ном}} \frac{\xi_{N_e}}{R_M} dt, \text{ га/ч,}$$

где $k_{w0} = \text{const}$ для конкретного агрегата;

$N_e, N_{e \text{ ном}}$ – текущее и номинальные значения мощности двигателя, кВт;

R_M – сопротивление РМ, кН;

T_p – время работы агрегата под нагрузкой (наработка), ч;

ξ_{N_e} – степень нагрузки двигателя: $\xi_{N_e} = N_e / N_{e \text{ ном}}$,

$\xi_{N_e} = k_{\xi} \Pi_{\xi}, k_{\xi} = \text{const}$ для конкретного агрегата;

Π_{ξ} – параметр степени нагрузки двигателя, кВт.

Для определения W_{ϕ} необходимо контролировать N_e (или ξ_{N_e}) и R_M . Сопротивление R_M оценивают на скоростных режимах, близких к $n = n_{\text{ном}}$ (n – частота вращения коленчатого вала), Гц:

$$R_M \approx k_R (N_{ep} - N_{ex}), \text{ кН;}$$

где $k_R = \text{const}$ для данного агрегата;

индексы p и x соответствуют рабочему (под нагрузкой) и холостому режиму агрегата.

Используя тот или иной косвенный параметр Π_N , отражающий мощность двигателя ($N_e = k_N \Pi_N, k_N = \text{const}$), или параметр Π_{ξ} степени его нагрузки, можно определить сопротивление R_M и производительность агрегата [22, 23]:

$$\Pi_{\xi} = [k_N / (k_{\xi} N_{e \text{ ном}})] \Pi_N,$$

$$R_M \approx k_R k_N (\Pi_{np} - \Pi_{Nx}) = k_R k_{\xi} N_{e \text{ ном}} (\Pi_{\xi p} - \Pi_{\xi x}); \quad (1)$$

$$W_{\phi} = k_{wN} \int_0^{T_p} \frac{\Pi_N}{\Pi_{Np} - \Pi_{Nx}} dt = k_{w\xi} \int_0^{T_p} \frac{\Pi_{N\xi}}{\Pi_{\xi p} - \Pi_{\xi x}} dt, \quad (2)$$

где $k_{wN} = k_{w0} / k_R$; $k_{w\xi} = k_{wN} k_N / k_{\xi}$.

Аналогично для наработки агрегата:

$$T_n = k_{hN} \int_0^{T_p} \Pi_N dt = k_{h\xi} \int_0^{T_p} \Pi_{\xi} dt, \quad (3)$$

где $k_{hN} = 1 / \Pi_{N \text{ ном}}$;

$$k_{h\xi} = 1 / \Pi_{\xi \text{ ном}};$$

$\Pi_{N \text{ ном}}$ и $\Pi_{\xi \text{ ном}}$ – соответственно, суммарные значения параметров Π_N и Π_{ξ} при $N_e = N_{e \text{ ном}}$ за 1 ч работы агрегата.

В переходных и установившихся режимах угловое ускорение коленчатого вала ДВС определяется зависимостью [22, 23]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Sigma} &= \frac{1}{J_{\text{д}}} \left(M_i - \omega^2 \frac{dJ_{\text{д}}}{d\phi} - M_{\text{вп}} - M_{\text{нар}} \right) = \\ &= \frac{1}{J_{\text{д}}} (M_i^{\text{к}} + M_i^{\text{г}} - M_{\text{ин}} - M_{\text{вп}} - M_{\text{нар}}), \text{ рад/с}^2, \end{aligned}$$

где $J_{\text{д}}$ – приведенный момент инерции ДВС и нагрузочных масс (при моменте нагрузки $M_{\text{нар}} = 0$ это собственный приведенный к коленчатому валу момент инерции ДВС), кг/м²;

ω – угловая скорость коленчатого вала, рад/с (ча

стота вращения $\dot{\varphi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega d\phi, 1/\text{с}$;

ϕ – угол поворота коленчатого вала (ПКВ), рад;

$M_i = M_i^{\text{к}} + M_i^{\text{г}}$ – индикаторный момент двигателя,

Н·м: $M_i^{\text{к}} = \sum_{k=1}^{i_{\text{ц}}} M_{i1(k)}^{\text{к}}$ и $M_i^{\text{г}} = \sum_{k=1}^{i_{\text{ц}}} M_{i1(k)}^{\text{г}}$ – компрессионная и газовая составляющие индикаторного момента;

$M_{i1}^{\text{к}}$ и $M_{i1}^{\text{г}}$ – компрессионная и газовая составляющие одного цилиндра;

$i_{\text{ц}}$ – число цилиндров;

$M_{ин} = M_{ин}^{рег}(\varphi - \zeta_m) + M_{ин}^{ост} = \omega^2 \frac{dJ_d}{d\varphi}$ – инерционная составляющая крутящего момента, содержащая регулярную составляющую, вызванную неуравновешенными инерционными силами (например, у двигателя компоновки 4-Р это вторая гармоника частоты вращения) и остаточную составляющую случайного характера, присущую всем двигателям;

$M_{вп}$ – момент внутренних потерь (преимущественно трения), Н·м.

Ускорение ε_Σ можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\Sigma &= \varepsilon_k + \varepsilon_g - \varepsilon_{ин} - \varepsilon_m - \varepsilon_{н2} = \\ &= \sum_{m=1}^{i_\Sigma} \varepsilon_{k1}(\varphi - \zeta_m) + \sum_{m=1}^{i_\Sigma} \varepsilon_{g1}(\varphi - \zeta_m) + \\ &+ \sum_{m=1}^{i_\Sigma} \varepsilon_{ин1}(\varphi - \vartheta_m) - \varepsilon_{ин ост} - \varepsilon_m - \varepsilon_{н2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varepsilon_k, \varepsilon_g, \varepsilon_{ин}, \varepsilon_m, \varepsilon_{н2}$ – составляющие углового ускорения коленчатого вала: компрессионная, газовая, инерционная, внутренних потерь (трения) и нагрузки;

ζ_m – сдвиг по углу ПКВ, определяемый диаграммой распределения всплесков по цилиндрам;

ϑ_m – сдвиг по углу ПКВ, определяемый конструктивным расположением цилиндров;

$\varepsilon_{k1}, \varepsilon_{g1}, \varepsilon_{ин1}$ – составляющие углового ускорения коленчатого вала, вызванные работой одного цилиндра:

$$\varepsilon_{k1} = V_{ц} p_{сж} K(\varphi) / J_d; \quad \varepsilon_{g1} = V_{ц} p_{ми} S(\varphi) / J_d;$$

$$\varepsilon_{ин1} = (\omega^2 / J_d) (dJ_{дрег} / d\varphi);$$

$\varepsilon_{иност}$ – остаточная инерционная составляющая ускорения, зависящая от конструктивного несовершенства ДВС и присоединительных элементов (разброса масс и размеров), $\varepsilon_{ин ост} = (\omega^2 / J_d) (dJ_{д ост} / d\varphi)$;

$V_{ц}$ – объем цилиндра, л;

$p_{сж}$ – давление сжатия, кПа;

$K(\varphi)$ и $S(\varphi)$ – безразмерные компрессионная и газовая силовые функции, которые хорошо аппроксимируются линейно-экспоненциальными импульсами вида:

$$|K(\varphi)| = a_k \varphi [\exp(-b_k \varphi)];$$

$$S(\varphi) = a_s \varphi [\exp(-b_s \varphi)];$$

$|K(\varphi)|$ – положительная ветвь функции $K(\varphi)$;

a_k, a_s, b_k, b_s – константы [24];

$J_d, J_{дрег}, J_{д ост}$ – среднее значение, регулярная и остаточная составляющие момента инерции ДВС, кг/м²;

$p_{ми}$ – среднее индикаторное давление, кПа.

С ростом $p_{ми}$ увеличивается размах составляющей ε_r . Следовательно, определив среднее значение суммы переменных $\bar{\varepsilon}_k + \bar{\varepsilon}_g$, в переходном режиме разгона (в установившемся режиме – средневывпрямленное значение $|\bar{\varepsilon}_k + \bar{\varepsilon}_g|$) можно оценить полную индикаторную мощность двигателя:

$$\begin{aligned} N_i &= M_i n = \frac{k_{тд}}{2T_0} n \int_0^{2T_0} (\varepsilon_k + \varepsilon_g) dt = \\ &= \frac{k_{тд}}{4\pi} n \int_0^{4\pi} (\varepsilon_k + \varepsilon_g) d\varphi = k_{тд} n (\bar{\varepsilon}_k + \bar{\varepsilon}_g), \text{ кВт}, \end{aligned}$$

где $k_{тд}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от марки ДВС (числа цилиндров, момента инерции, степени сжатия);

T_0 – время поворота коленчатого вала на 360°, с.

Вместо средних значений можно использовать также экстремальные (амплитудные) значения:

$$(\varepsilon_k + \varepsilon_g)_{max} = \frac{1}{i_{ц}} \sum_{m=1}^{i_{ц}} [(\varepsilon_{k1} + \varepsilon_{g1})_{max}]_m, \text{ рад/с}^2;$$

$$N_i = k_{тд} n \frac{1}{i_{ц}} \sum_{m=1}^{i_{ц}} [(\varepsilon_{k1} + \varepsilon_{g1})_{max}]_m, \text{ кВт},$$

где $k_{тд}$ имеет тот же смысл, что и $k_{тд}$ (они не равны между собой).

При этом достаточно использовать только положительные экстремумы, так как составляющая ε_r определяется положительной функцией $S(\varphi)$. Кроме того, это повышает чувствительность сигнала к изменению активных сил двигателя благодаря тому, что в установившемся режиме $(\varepsilon_k + \varepsilon_g)$ смещается относительно нуля так, чтобы среднее значение ускорения равнялось нулю. В результате значительно уменьшается влияние составляющей ε_k , которая определяется функцией $K(\varphi)$, симметричной относительно нуля.

Результаты и обсуждение. Для уравновешенных двигателей ($\varepsilon_{ин} \rightarrow 0$) с низким уровнем переменной составляющей потерь ($\varepsilon_r \rightarrow 0$) имеем:

$$\begin{aligned} \Pi_{N1} &= |\bar{\varepsilon}_\Sigma| = |\bar{\varepsilon}_k| + |\bar{\varepsilon}_g| = \\ &= \frac{1}{2T_0} \int_0^{2T_0} |\bar{\varepsilon}_\Sigma| dt = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} |\bar{\varepsilon}_\Sigma| d\varphi; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{N2} &= |\bar{\varepsilon}_\Sigma|_{max} \approx |\bar{\varepsilon}_k + \bar{\varepsilon}_g|_{max} = \\ &= \frac{1}{i_{ц}} \sum_{m=1}^{i_{ц}} [(\varepsilon_{k1} + \varepsilon_{g1})_{max}]_m. \end{aligned} \quad (6)$$

При замене в (5) средневывпрямленных $|\bar{\varepsilon}_k| + |\bar{\varepsilon}_g|$ на средние квадратические значения ускорений получим $\Pi_{N3} = (\bar{\varepsilon}_\Sigma^2)^{1/2} \approx [(\bar{\varepsilon}_k + \bar{\varepsilon}_g)^2]^{1/2}$.

Для повышения чувствительности параметра Π_N (особенно в применении к многоцилиндровым ДВС) целесообразно при прокрутке двигателя без нагрузки измерить с привязкой по углу $\Pi_{кв}$ мгновенные значения ускорения коленчатого вала ($\varepsilon_{\Sigma х} = \varepsilon_k - \varepsilon_{ин} - \varepsilon_{тх}$, где $\varepsilon_{тх}$ – значение ε_r при холостом ходе) и вычесть их из ε_Σ (4) в фазе.

Кроме того, точность и достоверность оценки энергетических показателей можно повысить благодаря селекции сигнала в частотной (фильтрация) и фазовой (по углу $\Pi_{кв}$) областях. Амплитудно-частотный спектр переменной составляющей процесса нагружения (сопротивления РМ) двигателя всегда содержит более низкие частоты, чем спектр процессов, вызванных активными движущими силами двигателя. Активная часть спектра ускорений сил трения и инерционных сил различных присоединительных элемен-

тов, кинематически связанных с коленчатым валом, располагается выше указанного спектра. Селекция по углу Π_{KV} позволяет избавиться от взаимно перекрывающихся участков рабочих процессов (на срезе импульсов ε_{r1}), возникающих у многоцилиндровых двигателей.

В качестве параметра Π_N можно также использовать составляющие амплитудно-частотного спектра ускорения коленчатого вала. Из анализа функций $K(\varphi)$ и $S(\varphi)$, максимумы которых достигаются при $\varphi = 22...30^\circ$, следует, что наибольшая доля энергии спектра $\varepsilon_{td}(t) = \varepsilon_k(t) + \varepsilon_r(t)$ приходится на составляющие, кратные 3...4-й гармоникам частоты вращения.

При замене в (5) средневыпрямленных значений ускорений $|\bar{\varepsilon}_k|$ и $|\bar{\varepsilon}_r|$ на составляющие ускорения, кратные 3...4-й гармоникам частоты вращения, а именно на среднее выпрямленное $|\bar{\varepsilon}_{34}|$, на среднее квадратическое $(\varepsilon_{34})^{1/2}$ и максимальные значения ускорения указанных гармоник ε_{34max} в интервале $t \in [t_1, t_2]$ ($[t_1, t_2]$ интервал времени, соответствующий активной части индикаторной силовой функции) получим $\Pi_{N4} = |\bar{\varepsilon}_{34}|$, $\Pi_{N5} = (\varepsilon_{34})^{1/2}$ и $\Pi_{N6} = (\varepsilon_{34})_{max} = A_{34}$.

При оценке энергетических показателей агрегата с двигателями, оборудованными газотурбонаддувом, в качестве критерия Π_N могут использоваться показатели работы турбокомпрессора [22]:

$$\left. \begin{aligned} Ne &= k_{TH} p_k \omega \\ \tilde{p}_k &= (\tilde{\omega}_T - \theta_B \tilde{\omega}) / k_B \\ p_k &= \pi_k p_{k\text{BK}} = \pi_k (p_0 - \Delta p_p) = \pi_k p_0 (1 - \delta_{p\text{BK}}) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где k_{TH} – постоянная величина, определяемая параметрами топливной и воздушной магистралей ДВС;

p_k – давление наддува, кПа;

ω_T – угловая скорость ротора турбокомпрессора, рад/с;

$$\tilde{p}_k = \Delta p_k / p_{k\text{НОМ}}, \quad \tilde{\omega}_T = \Delta \omega_T / \omega_{T\text{НОМ}},$$

$$\tilde{\omega} = \Delta \omega / \omega_{\text{НОМ}};$$

θ_B, k_B, π_k – относительные отклонения величин, постоянные для данного турбокомпрессора;

$p_{k\text{BK}}$ – давление воздуха перед компрессором, кПа;

p_0 – атмосферное давление, кПа;

Δp_p – разрежение воздуха на входе в компрессор, кПа;

$\delta_{p\text{BK}} = \Delta p_p / p_0$ – степень разрежения воздуха на входе в компрессор.

С учетом (7) имеем:

$\Pi_{N7} = p_k$; $\Pi_{N8} = \omega_T$; $\Pi_{N9} = p_{k\text{BK}}$; $\Pi_{N10} = \Delta p_p$ (последние два параметра более чувствительны к изменению сопротивления РМ).

Неравномерность индикаторного момента ДВС в стационарном режиме приводит к колебаниям давления и температуры потока выхлопных газов, что становится причиной колебаний угловой скорости вала турбокомпрессора. Поскольку колебание параметров потока выхлопных газов определяется изменением

индикаторного момента двигателя, то активная часть изменения давления и температуры может быть также аппроксимирована отрезком синусоиды, кратной 3...4-й гармоникам частоты вращения коленчатого вала, усредненных по всем цилиндрам.

Заменяя в (5) и (6) средневыпрямленные значения $|\bar{\varepsilon}_k|$ и $|\bar{\varepsilon}_r|$ на гармоники давлений $p_k, p_{k\text{BK}}, \Delta p_p$ и ускорения ротора ε_T турбокомпрессора, кратные 3...4-й гармоникам частоты вращения коленчатого вала, на их средние, максимальные и средние квадратические значения по всем цилиндрам в интервале $t \in [t_1, t_2]$, получим косвенный параметр Π_N , отражающий мощность двигателя:

$$\Pi_{N11} = |\bar{p}_{k34}|; \Pi_{N12} = |\bar{p}_{k\text{BK}34}|;$$

$$\Pi_{N13} = |\bar{\Delta p}_{p34}|; \Pi_{N14} = |\bar{\varepsilon}_{T34}|;$$

$$\Pi_{N15} = (p_{k34})_{\text{max}} = A_{k34};$$

$$\Pi_{N16} = (p_{k\text{BK}34})_{\text{max}} = A_{k\text{BK}34};$$

$$\Pi_{N17} = (\Delta p_{p34})_{\text{max}} = A_{p34};$$

$$\Pi_{N18} = (\varepsilon_{T34})_{\text{max}} = A_{\varepsilon_{T34}}.$$

При нахождении поршня в ВМТ составляющие ε_k , ε_r и $\varepsilon_{\text{ин}}$ равны нулю, а составляющую ε_r внутренних потерь при определенном скоростном режиме можно считать постоянной. К тому же ее значение существенно ниже уровня остальных составляющих. Поэтому с ростом сил сопротивления (нагрузки) происходит смещение суммарного ускорения ε_{Σ} относительно мгновенного значения ускорения коленчатого вала $\varepsilon_{\text{ВМТ}}$ при нахождении поршня в ВМТ (нулевой линии). Такое смещение одновременно приводит к появлению сдвига $\varphi_{\text{ВМТ}}$ по углу ПКВ или интервала времени $t_{\text{ВМТ}}$, соответствующего этому углу между верхней мертвой точкой (ВМТ) и моментом перехода мгновенного значения ускорения через ноль (рис. 1). Поэтому в формулах (1)-(4) можно использовать более чувствительные к нагрузке параметры [22]: $\Pi_{N19} = |\varepsilon_{\text{ВМТ}}|$; $\Pi_{N20} = \varphi_{\text{ВМТ}}$; $\Pi_{N21} = t_{\text{ВМТ}}$. В качестве параметра Π_N могут применяться также процессы генераторов.

Внешняя характеристика генератора постоянного тока отражает зависимость напряжения от силы тока нагрузки $U_r = f_1(I_{\text{нр}})$ при постоянном сопротивлении цепи возбуждения и частоте вращения якоря $n_{\text{я}} = \text{const}$ (рис. 2а). Частота вращения якоря тесно связана с частотой вращения коленчатого вала двигателя, что также позволяет использовать параметры генератора для оценки Π_N . Токоскоростная характеристика $I_{\text{нр}} = f_2(n_{\text{я}})$ генератора постоянного тока с параллельным возбуждением также тесно связана с частотой вращения коленчатого вала двигателя (рис. 2б).

Подобные параметры, тесно связанные со скоростной характеристикой двигателя, имеют генераторы любого типа, устанавливаемые на агрегатах (генераторы постоянного тока с независимым возбуждением, вентильные и др.). Тогда получим:

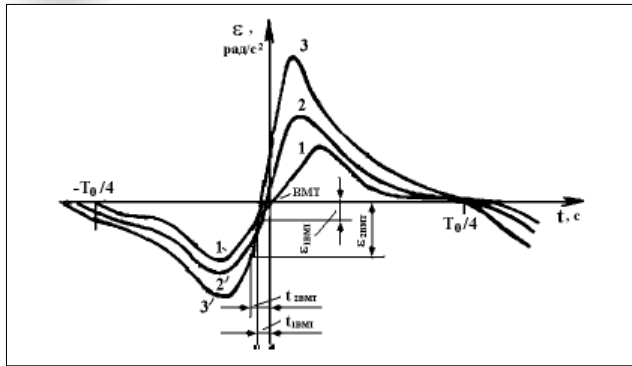


Рис. 1. Связь значений углового ускорения коленчатого вала в верхней мертвой точке и смещения этого ускорения по времени (углу поворота коленчатого вала) со степенью нагрузки двигателя: 1 – при $\zeta_{Ne1}=0$; 2 – при $\zeta_{Ne2}>0$; 3 – при $\zeta_{Ne3}>\zeta_{Ne2}$

Fig. 1. Relationship between the values of the angular acceleration of the crankshaft at top dead point and the displacement of this acceleration in time (angle of rotation of the crankshaft) with the degree of engine load: 1 – if $\zeta_{Ne1}=0$; 2 – if $\zeta_{Ne2}>0$; 3 – if $\zeta_{Ne3}>\zeta_{Ne2}$

$$P_{N22} = I_r A;$$

$$P_{N23} = U_r^* I_r;$$

где $I_r = I_{нг}$; $U_r^* = U_r$ или $U_r^* = U_d$ (U_d – выпрямленное напряжение вентильного генератора), В.

Параметры P_N могут быть использованы для оценки качества комплектования агрегата. Момент сопротивления агрегата (например, моторно-транспортных агрегатов сельскохозяйственного, дорожного и карьерного назначения) определяется по формуле [22]:

$$M_{сА} = \bar{J}_d (\bar{\varepsilon}_d^p - |\bar{\varepsilon}_d^B|) \{ [|\bar{\varepsilon}_A^B| / (|\bar{\varepsilon}_A^B - \bar{\varepsilon}_A^p|)] - [|\bar{\varepsilon}_T^B| / (|\bar{\varepsilon}_T^B - \bar{\varepsilon}_T^p|)] \} =$$

$$= \bar{J}_d (P_{N23} - |P_{N\partial}|) \{ [P_{N\partial} / (|P_{N\partial} - P_{NA}|)] - [P_{NT} / (|P_{NT} - P_{NT}|)] \}, H \cdot м, \quad (8)$$

где $\bar{J}_d$ – среднее значение момента инерции ДВС;

$\bar{\varepsilon}_d^p, \bar{\varepsilon}_d^B$ – средние значения ускорения коленчатого вала в режимах разгона и выбега двигателя без нагрузки (отключены коробка передач и вал отбора мощности);

$\bar{\varepsilon}_T^p, \bar{\varepsilon}_T^B$ – средние значения ускорения коленчатого вала в режимах разгона и выбега транспортного средства (например, трактора) при холостом проходе агрегата;

$\bar{\varepsilon}_A^p, \bar{\varepsilon}_A^B$ – средние значения ускорения агрегата в режимах разгона и выбега. Ускорения получают путем скользящего усреднения за цикл ДВС при достижении номинальной или иной частоты вращения коленчатого вала;

$$P_{N24} = \bar{\varepsilon}_d^p; \quad P_{N\partial} = \bar{\varepsilon}_d^B;$$

$$P_{NA} = \bar{\varepsilon}_A^p; \quad P_{N\partial A} = \bar{\varepsilon}_A^B;$$

$$P_{NT} = \bar{\varepsilon}_T^p; \quad P_{N\partial T} = \bar{\varepsilon}_T^B.$$

Динамическая мощность ДВС в режиме свободного разгона равна:

$$\bar{N}_e \approx \bar{J}_d \bar{\varepsilon}_d^p \bar{\omega},$$

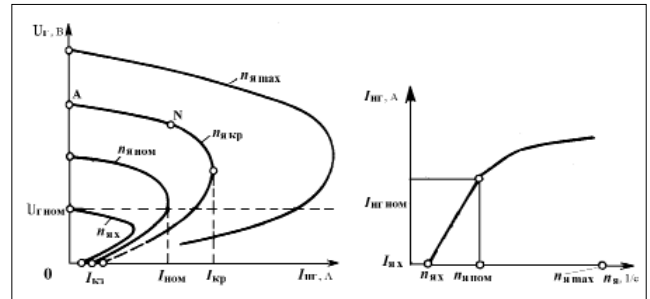


Рис. 2. Внешняя (а) и токоскоростная (б) характеристики генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (индексы «ном», «кр», «х», «кз» определяют значения величин: номинальное, критическое, холостое и короткого замыкания; $n_y = k_{перд}$; $k_{пер}$ – передаточное отношение привода, n_d – частота вращения коленчатого вала двигателя)

Fig. 2. External (a) and current-speed (b) characteristics of a direct current generator with parallel excitation (indices «ном», «кр», «х», «кз» determine the quantities values: nominal, critical, open circuit and short circuit; $n_y = k_{перд}$; $k_{пер}$ – gear ratio of the drive, n_d – engine crankshaft speed)

а мощность потерь в режиме свободного выбега составляет:

$$\bar{N}_{пд} \approx \bar{J}_d \bar{\varepsilon}_d^B \bar{\omega}.$$

Тогда ускорения $\bar{\varepsilon}_d^p$ и $\bar{\varepsilon}_d^B$ могут использоваться в качестве параметров P_{N24} и $P_{N\partial}$. Аналогично ускорения $\bar{\varepsilon}_T^p, \bar{\varepsilon}_T^B$ и $\bar{\varepsilon}_A^p, \bar{\varepsilon}_A^B$ можно применять в качестве параметров оценки мощностей моторно-транспортного средства (трактора) и агрегата и их мощностей потерь. Следовательно, выражение (8) пригодно для оценки качества комплектования агрегата. Есть немало примеров практического применения выражения (8) в сельскохозяйственном производстве [22, 23].

Установлено, что сопротивление R_M почвообрабатывающего и дорожно-строительного агрегатов линейно связано с твердостью (плотностью) почвы:

$$R_M = F_k + abmL_{ср},$$

где F_k – сила перекачивания, кН;

a и b – глубина и ширина обрабатываемого грунта (почвы), м;

m – эмпирический коэффициент (для почвообрабатывающего агрегата $m=0,014$ при работе корпусов рабочих органов без залипания; $m = 0,030-0,032$ при залипании почвы на корпусах рабочих органов;

$L_{ср}$ – средняя твердость почвы по глубине, кПа.

Используя косвенный показатель $P_{N1} \dots P_{N24}$, с учетом (1) можно определить твердость (плотность) почвы [23]:

$$L_{ср} = (\beta/abm)(P_{Np} - P_{Nx}), \quad (9)$$

где $\beta = k_R k_N$;

P_{Np} и P_{Nx} – параметры мощности рабочего и холостого ходов двигателя; размерность P_{Np} и P_{Nx} отражается в соответствующих коэффициентах $P_{N1} \dots P_{N24}$.

При применении системы автоматического управления режимами работы агрегата для задания границ оптимальной зоны энергетических (нагрузочного и скоростного) режимов на скоростной характеристи-



ке двигателя можно использовать тот или иной показатель $P_{N1} \dots P_{N24}$ [14-16].

Для задания границ оптимальной зоны энергетических (нагрузочного и скоростного) режимов в производственных условиях применялись наиболее существенно влияющие параметры P_N [22, 23]. Дальнейшие лабораторно-полевые исследования показали, что для этих целей можно применить ряд параметров P_N . Они сравнительно новые, могут быть проще измерены и рекомендованы для внедрения в производство.

Рассмотренные методы апробированы при основной обработке солонцово-черноземных комплексов Чулымского района Новосибирской области. Применение гибкого машинно-тракторного агрегата на базе энергонасыщенного трактора улучшило качество обработки почвы: доля почвенных комков размером

менее 5 сантиметров составила 73-80%; производительность почвообрабатывающего агрегата увеличилась на 15-20%.

Выводы. Анализ уравнений динамики ДВС и его компонентов показал, что с помощью косвенно определяемых показателей мощности и степени нагрузки можно оценить значительно проще и дешевле, в сравнении с известными силоизмерительными методами, фактические значения энергетических и технико-экономических показателей рабочей машины и агрегата, качество комплектования агрегата, неоднородность почвы, оцениваемую по ее твердости. Применение системы автоматического управления энергетическими режимами работы агрегата с использованием указанных показателей позволяет достаточно просто обеспечить задание оптимальной зоны режимов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лачуга Ю.Ф. Сельскохозяйственному производству – новые знания // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N3. С. 3-8.
2. Алтухов А.И. Развитие производства зерна в стране: мифы и реальность // *Экономика сельского хозяйства России*. 2017. N3. С. 31-38.
3. Измайлов А.Ю., Артюшин А.А., Личман Г.И., Смирнов И.Г., Марченко А.Н. Цифровые технологии химизации сельского хозяйства: теория и практика. М.: ВИМ. 2020. 180 с.
4. Федоренко В.Ф., Сапожников С.Н., Петухов Д.А. и др. Научные основы производства высококачественного зерна пшеницы. М.: Росинформагротех. 2018. 396 с.
5. Полушкина Т.М. Органическое сельское хозяйство в мире // *АПК: экономика, управление*. 2017. N3. С. 81-88.
6. Шварцев С.Л. Есть ли будущее у аддитивных технологий? // *Вестник РАН*. 2017. Т. 87. N6. С. 538-547.
7. Кирюшин В.И. Технологическая модернизация земледелия – неотложная задача // *Экономика сельского хозяйства России*. 2009. N2. С. 17-25.
8. Гуреев И.И. Экологическая эффективность комплекса почвообрабатывающих машин для механизации перспективных агротехнологий // *Вестник Курской ГСХА*. 2015. N4. С. 71-73.
9. Кирюшин В.И., Кирюшин С.В. Агротехнологии. М.: Лань. 2015. 464 с.
10. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Гончаров Н.Т., Лонин С.Э., Алексеев И.С. Универсальная автоматизированная система управления машинно-тракторными агрегатами // *Вестник РАСХН*. 2018. N3. С.10-14.
11. Редреев Г.В., Качурин В.В. Потенциал современных посевных комплексов на севе // *Вестник Омского ГАУ*. 2017. N4 (28). С. 239-244.
12. Плаксин А.М., Гриценко А.В. Энергетика машинно-тракторных агрегатов: Монография. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ. 2015. 307 с.
13. Стадник А.Т., Кабаков В.М., Кабакова О.Г. Техническая оснащенность сельскохозяйственного производства и пути ее совершенствования // *Вестник НГАУ*. 2018. N1(46). С. 166-173.
14. Кирюшин В.И. Технологическая модернизация земледелия России: предпосылки и условия // *Земледелие*. 2015. N6. С. 6-10.
15. Deichmann U., Goyal A., Mishra D. Will digital technologies transform agriculture in developing countries? *Agricultural Economics*. 2016. Vol. 47. N1. 21-33.
16. Walter A., Finger R., Huber R., Buchmann N. Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. Vol. 114. N24. 6148-6150.
17. Henry C., Azimi S.M., Merkle N. Road Segmentation in SAR Satellite Images with Deep Fully-Convolution Neural Networks. *Cornell University Library*. 2018. February. 1867-1871.
18. Матвеев Д.А., Воропаев В.В., Якушев В.В., Блохин С.Ю., Митрофанов Е.П., Петрушин А.Ф. Состояние и перспективы создания новых методов количественной оценки внутрипочвенной изменчивости в точном земледелии // *Агрофизика*. 2020. N1. С. 59-70.
19. Михайленко И.М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2017. 252 с.
20. Якушев, В.В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: АФИ. 2016. 364 с.
21. Баденко В.Л., Топаж А.Г., Якушев В.В., Миршель В., Нендель К. Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. N3. С.437-445.
22. Утенков Г.Л., Добролюбов И.П. Автоматизированные технологические комплексы почвообработки. Новосибирск: СибИМЭ. 2006. 380 с.
23. Утенков Г.Л., Добролюбов И.П. Моделирование рабочих процессов гибких автоматизированных технологических комплексов почвообработки. Новосибирск: НГАУ. 2018. 204 с.
24. Вейц В.П., Кловский М.З., Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. М.: Наука. 1984. 352 с.

REFERENCES

1. Lachuga Yu.F. Sel'skokhozyaystvennomu proizvodstvu – novye znaniya [Agricultural production – new knowledge]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2011. N3. 3-8 (In Russian).
2. Altukhov A.I. Razvitie proizvodstva zerna v strane: mify i real'nost' [Development of grain production in the country: myths and reality]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii*. 2017. N3. 31-38 (In Russian).
3. Izmaylov A.Yu., Artyushin A.A., Lichman G.I., Smirnov I.G., Marchenko A.N. Tsifrovye tekhnologii khimizatsii sel'skogo khozyaystva: teoriya i praktika [Digital technologies for chemicalization of agriculture: theory and practice]. Moscow: VIM. 2020. 180 (In Russian).
4. Fedorenko V.F., Sapozhnikov S.N., Petukhov D.A., et al. Nauchnye osnovy proizvodstva vysokokachestvennogo zerna pshenitsy [Scientific basis for the production of high-quality wheat grain]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2018. 396 (In Russian).
5. Polushkina T.M. Organicheskoe sel'skoe khozyaystvo v mire [Organic agriculture in the world]. *APK: ekonomika, upravlenie*. 2017. N3. 81-88 (In Russian).
6. Shvartsev S.L. Est' li budushchee u additivnykh tekhnologiy? [Does additive technology have a future?]. *Vestnik RAN*. 2017. Vol. 87. N6. 538-547 (In Russian).
7. Kiryushin V.I. Tekhnologicheskaya modernizatsiya zemledeliya – neotlozhnaya zadacha [Technological modernization of agriculture is an urgent task]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii*. 2009. N2. 17-25 (In Russian).
8. Gureev I.I. Ekologicheskaya effektivnost' kompleksa pochovoobrabatyvayushchikh mashin dlya mekhanizatsii perspektivnykh agrotekhnologiy [Environmental efficiency of a complex of tillage machines for the mechanization of promising agricultural technologies]. *Vestnik Kurskoy GSKhA*. 2015. N4. 71-73 (In Russian).
9. Kiryushin V.I., Kiryushin S.V. Agrotekhnologii [Agrotechnologies]. Moscow: Lan'. 2015. 464 (In Russian).
10. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Khoroshenkov V.K., Goncharov N.T., Lonin S.E., Alekseev I.S. Universal'naya avtomatizirovannaya sistema upravleniya mashinno-traktornymi agregatami [Universal automated control system for machine-tractor units]. *Vestnik RASKhN*. 2018. N3.10-14 (In Russian).
11. Redreev G.V., Kachurin V.V. Potentsial sovremennykh posevnykh kompleksov na seve [The potential of modern seeding complexes in the sowing]. *Vestnik Omskogo GAU*. 2017. N4(28). 239-244 (In Russian).
12. Plaksin A.M., Gritsenko A.V. Energetika mashinno-traktornykh agregatov: Monografiya [Power engineering of machine-tractor units: Monograph]. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skiy GAU. 2015. 307 (In Russian).
13. Stadnik A.T., Kabakov V.M., Kabakova O.G. Tekhnicheskaya osnashchennost' sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva i puti ee sovershenstvovaniya [Technical equipment of agricultural production and ways of its improvement]. *Vestnik NGAU*. 2018. N1(46). 166-173 (In Russian).
14. Kiryushin V.I. Tekhnologicheskaya modernizatsiya zemledeliya Rossii: predposylki i usloviya [Technological modernization of agriculture in Russia: prerequisites and conditions]. *Zemledelie*. 2015. N6. 6-10 (In Russian).
15. Deichmann U., Goyal A., Mishra D. Will digital technologies transform agriculture in developing countries? *Agricultural Economics*. 2016. Vol. 47. N1. 21-33.
16. Walter A., Finger R., Huber R., Buchmann N. Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. Vol. 114. N24. 6148-6150.
17. Henry C., Azimi S.M., Merkle N. Road Segmentation in SAR Satellite Images with Deep Fully-Convolution Neural Networks. *Cornell University Library*. 2018. February. 1867-1871.
18. Matveenko D.A., Voropaev V.V., Yakushev V.V., Blokhin S.Yu., Mitrofanov E.P., Petrushin A.F. Sostoyanie i perspektivy sozdaniya novykh metodov kolichestvennoy otsenki vnutripochvennoy izmenchivosti v tochnom zemledelii [State and prospects for the creation of new methods for the quantitative assessment of subsurface variability in precision farming]. *Agrofizika*. 2020. N1. 59-70 (In Russian).
19. Mikhaylenko I.M. Teoreticheskie osnovy i tekhnicheskaya realizatsiya upravleniya agrotekhnologiyami [Theoretical foundations and technical implementation of agricultural technology management]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta. 2017. 252 (In Russian).
20. Yakushev V.V. Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika [Precision farming: theory and practice]. Saint Petersburg: AFI. 2016. 364 (In Russian).
21. Badenko V.L., Topazh A.G., Yakushev V.V., Mirshel' V., Nendel' K. Imitatsionnaya model' agroekosistemy kak instrument teoreticheskikh issledovaniy [Simulation model of agroecosystem as a tool for theoretical research]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. 2017. Vol. 52. N3. 437-445 (In Russian).
22. Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P. Avtomatizirovannye tekhnologicheskies komplekisy pochovoobrabotki [Automated technological complexes of soil cultivation]. Novosibirsk: SibIME. 2006. 380 (In Russian).
23. Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P. Modelirovanie rabochikh protsessov gibkikh avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksov pochovoobrabotki. [Modeling of working processes of flexible automated technological complexes of tillage]. Novosibirsk: NGAU. 2018. 204 (In Russian).
24. Veyts V.P., Klovskiy M.Z., Kochura A.E. Dinamika upravlyaemykh mashinnykh agregatov [Dynamics of controlled machine units]. Moscow: Nauka. 1984. 352.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Добролюбов И.П. – техническое предложение по оперативному контролю состояния рабочих машин гибкого технологического комплекса для основной обработки почвы по параметрам двигателя внутреннего сгорания, обработка результатов исследований, формирование общих выводов – 40%.

Утенков Г.Л. – формулировка идеи оперативного контроля состояния рабочих машин гибкого технологического комплекса для основной обработки почвы по параметрам двигателя внутреннего сгорания, доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ – 60%.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution of the authors:

Dobrolyubov I.P. – a technical proposal for the operational control of the state of working machines of a flexible technological complex for basic soil cultivation according to the parameters of an internal combustion engine, processing of research results, the formation of general conclusions – 40%.

Utenkov G.L. – formulation of the idea of operational monitoring of the state of working machines of a flexible technological complex for the main tillage according to the parameters of an internal combustion engine, revision of the text, formation of general conclusions and literary analysis – 60%.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

10.03.2021
06.08.2021

Система дистанционного контроля технического состояния на примере коробки перемены передач трактора «Кировец»

Михаил Николаевич Костомахин,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: redizdat@mail.ru;

Николай Алексеевич Петрищев,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: gosniti14@mail.ru;
Александр Сергеевич Саяпин,
младший научный сотрудник,
e-mail: comaconcrsas@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что для повышения технической готовности энергонасыщенной техники, снижения затрат на ее эксплуатацию и полного использования ресурса необходимо оперативно оценивать текущее техническое состояние. Создали опытные образцы счетчиков-индикаторов для высокоточного контроля технического состояния коробки перемены передач. (*Цель исследования*) Разработать предложения для формирования системы дистанционного контроля технического состояния узлов коробки перемены передач тракторов семейства «Кировец». (*Материалы и методы*) Для повышения уровня контролепригодности и определения технического состояния предложили систему диагностических средств на основе разработанных счетчиков-индикаторов, которые учитывают конструктивные особенности при определении диагностических параметров. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что для оценки технического состояния коробки передач следует применять дополнительные системы контроля, получать информацию для расчета остаточного ресурса при проведении прямых измерений и возможности непрерывного наблюдения за фактическим изменением диагностических параметров узлов коробки перемены передач. Изучили варианты использования счетчиков-индикаторов для минимизации отказов II и III группы в процессе эксплуатации. (*Выводы*) Определили, что для повышения уровня эксплуатационной надежности коробки передач необходимо внедрить систему счетчиков-индикаторов. Выявили возможность контроля технического состояния отдельных узлов по соответствию с регламентированными показателями, а также в целях недопущения эксплуатации на аварийных (аномальных) режимах работы.

Ключевые слова: энергонасыщенная техника, контроль технического состояния, счетчики-индикаторы, коробка перемены передач, тракторы «Кировец».

Для цитирования: Костомахин Н.М., Петрищев Н.А., Саяпин А.С. Система дистанционного контроля технического состояния на примере коробки перемены передач трактора «Кировец» // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 22-27. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-22-27.

A System for the Remote Monitoring of Vehicle Technical Condition: Kirovets Tractor Gearbox Case Study

Mikhail N. Kostomakhin,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: redizdat@mail.ru;

Nikolay A. Petrishchev,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: gosniti14@mail.ru;
Aleksandr S. Sayapin,
junior researcher, e-mail: comaconcrsas@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors noted that in order to increase the energy-saturated equipment technical readiness, reduce its operation costs and ensure full use of the resource, it is necessary to quickly assess the current technical condition. The authors have created a counter-indicator prototype for high-precision control of gearbox technical condition. (*Research purpose*) To formulate a proposal for developing a system for the remote monitoring of gearbox technical condition applicable to the Kirovets tractor family. (*Materials and methods*) To increase the precision level of traceability and technical condition detection, a system of diagnostic tools was proposed based on the developed counters-indicators, which take into account design features when determining

diagnostic parameters. (*Results and discussion*) It was shown that to assess the gearbox technical condition, it is necessary to use additional monitoring systems, obtain information for calculating the residual life, when using direct measurements and having a possibility of the ongoing monitoring over the actual change in the gearbox units diagnostic parameters. The authors studied the options for using meter-indicators to minimize group II and III failures during operation. (*Conclusions*) It was identified that in order to increase the level of gearbox operational reliability, it is necessary to introduce a system of counters-indicators. The authors revealed the possibility of monitoring the individual unit technical condition in accordance with the specified indicators, as well as in order to prevent operation in emergency (abnormal) modes.

Keywords: energy-saturated equipment, technical condition monitoring, meters-indicators, gearbox, Kirovets tractors.

For citation: Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Sayapin A.S. Sistema dstantsionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya na primere korobki peremeny peredach traktora “Kirovets” [A system for the remote monitoring of vehicle technical condition: Kirovets tractor gearbox case study]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 22-27 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-22-27.

Для повышения технической готовности энергонасыщенной техники, снижения затрат на ее эксплуатацию и полного использования ресурса необходимо оперативно оценивать текущее техническое состояние. Важно также минимизировать риски и издержки, связанные с ошибками эксплуатации, в том числе под влиянием человеческого фактора, участвующего в системе «человек – машина – среда» [1-4].

Энергонасыщенная техника конструктивно сложна и дорого стоит. Для поддержания ее в работоспособном состоянии требуется оперативная информационная поддержка (особенно в период полевых работ), предназначенная минимизировать затраты и издержки вследствие уменьшения простоев при возникших отказах. Среди причин отказов и неисправностей узлов ведущего вала коробок перемены передач наиболее распространены нарушение правил эксплуатации, низкая приспособленность к диагностированию, слабая контролепригодность узлов трансмиссии для оценки технической готовности. Это повышает риски появления отказов II и III групп в гарантийный и постгарантийный периоды эксплуатации, увеличивает издержки при проведении регламентных сервисных работ, в том числе техники, находящейся в лизинге.

Цель исследования – разработать предложения для создания системы дистанционного контроля технического состояния узлов коробки перемены передач тракторов семейства «Кировец».

Материалы и методы. Как показал анализ российского парка тракторов 3-6 тягового класса (большинство из которых представлены продукцией АО «ПТЗ»), даже при сроке эксплуатации 15-20 лет техника хорошо зарекомендовала себя, в том числе благодаря преимущественности конструктивных элементов, наличию запасных частей, ремонтной и технической документации.

Исследования в ФНАЦ ВИМ по обоснованию и контролю технического состояния при эксплуатации и капитальном ремонте тракторов выявили, что для

поддержания энергонасыщенных тракторов с высокими коэффициентами готовности необходима узкоспециализированная централизованная система технического обслуживания и ремонта [4-6].

Результаты и обсуждение. Для контроля буксования по соответствию передаточным отношениям коробки перемены передач (КПП) в качестве прототипа устройств в ФНАЦ ВИМ разработан имитационный модуль, оснащенный вентиляторами с электронными регуляторами оборотов (рис. 1). Путем регулирования скорости вращения вентиляторов имитируется работа:

- ведущего вала КПП;
- раздаточного вала КПП переднего моста;
- раздаточного вала заднего моста.

Для идентификации отклонений передаточных чисел запрограммированы 24 интервала, соответствующие передаточным числам реальных скоростей и режимов КПП трактора К-744 в пределах допустимых буксований фрикционных дисков ведущего вала (не более 3%). Соответствующее отношение скоростей рассчитывается как отношение скоростей вращения первого и второго вентилятора имитатора КПП.

Для контроля своевременности включения оператором заднего моста разработанное устройство вычисляет разность скоростей раздаточных валов КПП, измеряемую как разность скоростей вращения второго и третьего вентилятора имитатора. При этом срабатывание индикатора 1 свидетельствует о буксовании фрикционных дисков передач КПП, а индикатор 2 сигнализирует о буксовании колес переднего моста трактора (при отключенном заднем мосте) относительно колес заднего моста более чем на 16%. Зеленые светодиоды показывают, что буксование отсутствует. Датчики ДУ-Р2У 3 запрограммированы на измерение угла положения рычага КПП.

При анализе эксплуатационной документации на трактор К-701 выявлено, что в процессе эксплуатации на панели оператора контролируются только рабочее давление в системе управления, с помощью датчика в механизме перемены передач, и аварийный перепад

давления в линейном фильтре. При этом уровень рабочей жидкости определяется визуально. Отсутствует возможность контроля степени изнашивания фрикционных дисков, что не позволяет оператору вовремя выявить выход этих параметров за предельные величины и увеличивает риск возникновения отказов техники.

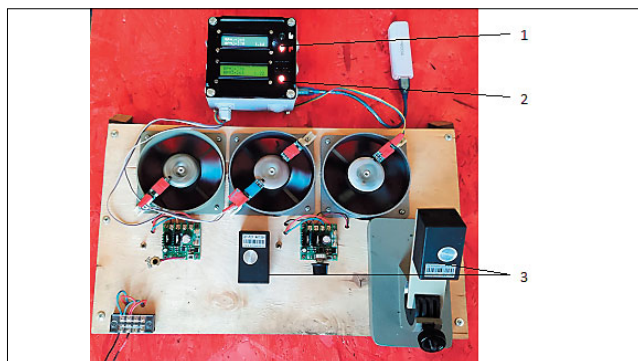


Рис. 1. Имитационный модуль контроля передаточных отношений трансмиссии и ходовой части: 1 – индикатор аварийного буксования фрикционных дисков КПП; 2 – индикатор необходимости подключения заднего моста; 3 – датчики ДУ-Р2У угла положения

Fig. 1. Simulation module for monitoring the transmission and chassis gear ratios: 1 – indicator of the gearbox friction discs emergency slipping; 2 – indicator of the rear axle connection; 3 – DU-R2U position angle sensors

В качестве контролируемого параметра технического состояния фрикционных узлов ведущего вала КПП выбрали величину линейного перемещения (более 15 мм) нажимного диска бустера 1 передачи при включении, которая, в свою очередь, характеризует износ, коробление фрикционных дисков. Ее значение измеряют при помощи индукционных датчиков 2. Эти же датчики позволяют одновременно оценить и величины радиального биения подшипника, превышающие 0,25 мм (рис. 2, 3) [7-11].

Для передачи данных на телеметрический терминал в прототипе использовали индукционные датчи-

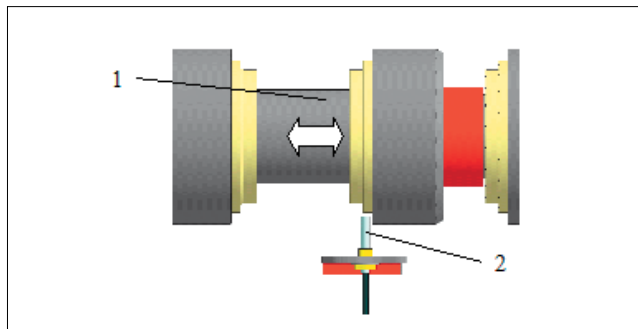


Рис. 2. Схема процесса контроля износа фрикционных дисков КПП: 1 – нажимной диск бустера; 2 – индукционный датчик
Fig. 2. Diagram of the process of monitoring the gearbox friction discs' wear: 1 – booster pressure disk; 2 – induction sensor

ки, которые работают в режиме ключа. При максимальном линейном перемещении, характеризующем предельный износ, датчик подает сигнал на панель индикаторов (рис. 3) и на терминал Galileosky 7х.

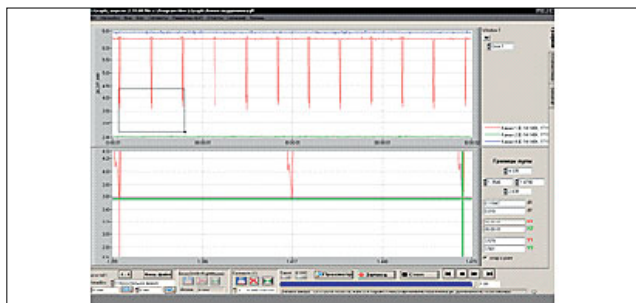


Рис. 3. Визуализация процесса контроля износа подшипников ведущего вала КПП

Fig. 3. Visualization of the process of monitoring the gearbox drive shaft bearings' wear

Применяя индукционные датчики, можно вести подсчет в энергонезависимой памяти количества включений передач (гарантированный ресурс от производителя – не менее 20000) и объективно выявлять заявленные параметры работы ресурсопределяющих элементов ведущего вала в режиме on-line (рис. 4) [4].

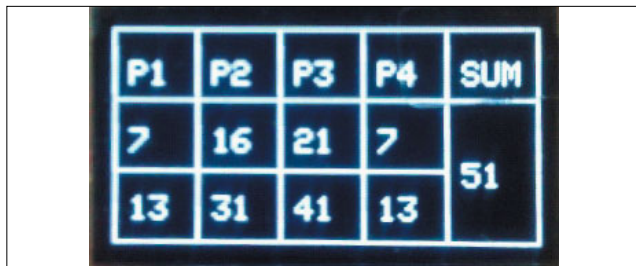


Рис. 4. Прототип счетчика количества включения передач для КПП трактора К-701

Fig. 4. A prototype of a gear number counter for K-701 tractor gearbox

При дальнейшем совершенствовании конструкции КПП необходимо провести адаптацию агрегатов и систем отображения параметров работы на панели оператора для повышения контролепригодности и приспособленности при проведении входного контроля качества ремонта и диагностирования в ходе технического обслуживания в условиях рядовой эксплуатации. Все это повысит эксплуатационную надежность трактора в целом [12-14].

В частности, в рамках реализации проекта подготовлены предложения, направленные на совершенствование конструкции поддона механической КПП с гидравлическим управлением энергонасыщенных тракторов (рис. 5).

Модернизированный поддон позволяет:

- предварительно прогревать рабочую жидкость;
- более полно удалять ее из системы КПП;

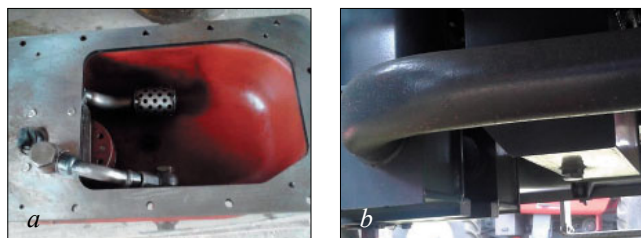


Рис. 5. Общий вид поддонов КП тракторов «Кировец» разных поколений: а – К-701; б – К-744

Fig. 5. General view of the gearbox pallets in Kirovets tractors of different generations: a – K-701; b – K-744

- осуществлять циркуляционную промывку полостей или параллельную фильтрацию рабочей жидкости с применением внешних устройств (например, КИ-28286.50 или др.) для продления срока службы и защиты штатных фильтрующих элементов от продуктов износа;

- проводить работы для предварительной оценки технического состояния гидросистемы управления с использованием дополнительного оборудования (например, гидростанции производительностью 15 л/мин, при давлении 1,2 МПа);

- устанавливать дополнительный теплоизолирующий кожух при эксплуатации трактора в условиях значительных отрицательных температур (ниже минус 25°C);

- сигнализировать оператору о низком уровне рабочей жидкости в КПП.

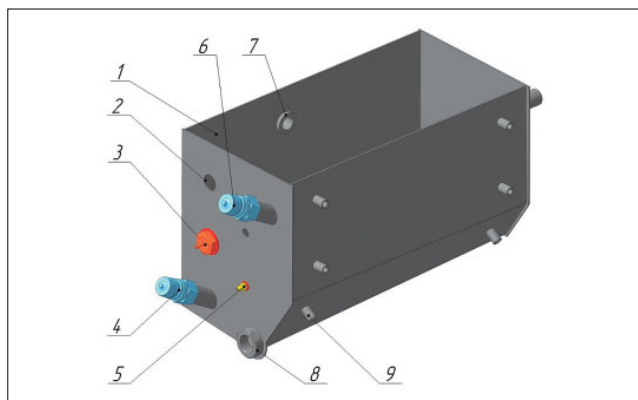


Рис. 6. Модернизированный поддон КПП: 1 – корпус; 2 – датчик уровня масла; 3 – подогреватель масла; 4 – выводное быстроразъемное соединение; 5 – датчик температуры масла; 6 – входное быстроразъемное соединение; 7 – выпускное отверстие всасывающего патрубка гидронасоса; 8 – сливная пробка; 9 – элементы для крепежа теплоизолирующего кожуха

Fig. 6. Upgraded gearbox pallet: 1 – case; 2 – oil level sensor; 3 – oil heater; 4 – outlet quick connector; 5 – oil temperature sensor; 6 – input quick connector; 7 – hydraulic pump suction outlet; 8 – drain plug; 9 – elements for fastening the heat-insulating casing

При подготовке к реализации проекта необходимо предварительно согласовать с производителем ха-

рактеристики контроллера, позволяющего проводить измерение и вычисление предложенных параметров. Кроме того, предстоит реализовать контроллер в виде отдельного функционально обособленного узла для обмена информацией с имеющейся бортовой системой на основе промышленно используемых интерфейсов и протоколов (CAN-bus, I2C, RS485, RS232, Modbus), а также с системами выходного контроля готовых изделий (КПП) на производстве для определения эталонных, допускаемых, аварийных характеристик изделия.

Таким образом, с учетом предложений для контроля технического состояния силовых передач энергонасыщенной техники необходима проработка вопроса с отечественными предприятиями-изготовителями, работающими по программе Правительства РФ № 1432 – для опытного и возможного серийного внедрения современных цифровых систем контроля с целью улучшения показателей безотказности и долговечности [4, 5].

При обсуждении представленных исследований со специалистами АО «ПТЗ» на выставке «Агросалон 2020» завод-производитель выразил интерес в дальнейшей проработке возможного внедрения системы дистанционного контроля технического состояния и правил эксплуатации техники.

Выводы

1. Низкая контролепригодность и приспособленность к диагностированию требует внедрения системы дополнительных счетчиков-индикаторов с целью повышения эксплуатационной надежности, корректировки времени сервисного обслуживания для предупреждения отказов.

2. Выпускаемая и эксплуатируемая техника должна сопровождаться современными средствами и методиками технического состояния ресурсопределяющих узлов, агрегатов для получения объективной картины технического состояния. Это даст возможность производителю (конструкторам, технологам, сервисной и логистической службе) получать данные, основанные на объективной информации, оперативно проводить изменения, направленные на совершенствование выпускаемой продукции.

3. Комплексный контроль текущего технического состояния с применением счетчиков-индикаторов исключит аварийные (аномальные) режимы работы, что неизбежно повысит эксплуатационную надежность имеющегося парка и снизит затраты на владение техникой. Так, вследствие расширения объективности оценки можно выявлять причинно-следственные связи и минимизировать риски появления отказов.

4. Для эффективного внедрения системы необходимо уже на стадии изготовления или ремонта техники предусмотреть места для установки счетчиков-индикаторов. Повысить достоверность и объективность данных по коэффициенту готовности тех-

ники к полевым работам важно как непосредственно владельцу техники, так и сервисному подразделению дилера, лизинговой компании при удаленном мониторинге.

5. Постоянный автоматизированный контроль по-

зволяет оперативно реагировать на зарождающиеся отклонения в техническом состоянии и не доводить ситуацию до аварийной. Исходя из динамики изменения состояния контролируемых элементов можно прогнозировать остаточный ресурс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черноиванов В.И., Ежевский А.А., Краснощекоев Н.В., Федоренко В.Ф., Жалнин Э.В., Буклагин Д.С., Фрибус В.К., Гольяпин В.Я., Кузьмин В.К., Измайлов А.Ю., Жилкибаев М.Ш., Хлепотько М.Н. Мониторинг технического уровня и надежности основных видов сельскохозяйственной техники. М.: Росинформагротех. 2009. 108 с.
2. Краснощекоев Н.В., Кирюшин В.И., Липкович Э.И. и др. Инновации в машиноиспользовании в АПК России. М.: Росинформагротех. 2008. 435 с.
3. Дорохов А.С. Совершенствование входного контроля качества сельскохозяйственной техники на дилерских предприятиях // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина*. 2009. N2. С. 73-75.
4. Петрищев Н.А., Костомахин М.Н., Саяпин А.С., Ивлева И.Б. Совершенствование мониторинга системы «Человек-машина-среда» и правил эксплуатации для повышения эксплуатационной надежности тракторов // *Технический сервис машин*. 2020. N3(140). С. 12-20.
5. Макаркин И.М., Дунаев А.В., Галимов Т.М. Приемы диагностирования редукторов ведущих мостов перспективных автомобилей КАМАЗ // *Автомобильная промышленность*. 2016. N6. С. 27-30.
6. Измайлов А.Ю., Кряжков В.М., Антышев Н.М. и др. Концепция модернизации парка сельскохозяйственных тракторов России на период до 2020 года. М.: ВИМ. 2013. 88 с.
7. Дорохов А.С. Эффективность оценки качества сельскохозяйственной техники и запасных частей // *Вестник Фе-*

дерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. 2015. N1(65). С. 31-35.

8. Дорохов А.С., Корнеев В.М., Катаев Ю.В. Технический сервис в системе инженерно-технического обеспечения АПК // *Сельский механизатор*. 2020. N9. С. 12-18.

9. Дорохов А.С. Качество машиностроительной продукции: реальность и перспективы // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2005. N8. С. 2-4.

10. Дорохов А.С., Семейкин В.А. Входной контроль качества продукции машиностроения // *Сельский механизатор*. 2013. N11. С. 22-23.

11. Abdazimov A.D., Omonov N.N., Radjabov S.S. Automation of agrotechnical assessment of cotton harvesting machines. *Journal of physic: conference series*. 2019. 032001.

12. Macpherson J., De Wardt J., Laing M., Zenero N. Data ownership for drilling automation – managing the impact. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Fort Worth. Texas, USA. March 2016. Paper Number: SPE-178787-MS.

13. Aksenov A.G., Izmailov A.Yu., Dorokhov A.S., Sibirev A.V. Onion bulbs orientation during aligned planting of seed-onion using vibration-pneumatic planting device. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 55. N2. 63-70.

14. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Dorokhov A.S. Results of laboratory investigations of soil screening ability of a chain digger with asymmetric vibrator arrangement. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57. N1. 9-18.

REFERENCES

1. Chernoiivanov V.I., Ezhevskiy A.A., Krasnoshchekov N.V., Fedorenko V.F., Zhalnin E.V., Buklagin D.S., Fribus V.K., Gol'tyapin V.Ya., Kuz'min V.K., Izmaylov A.Yu., Zhilkibaev M.Sh., Hlepit'ko M.N. Monitoring tekhnicheskogo urovnya i nadezhnosti osnovnykh vidov sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Monitoring of the technical level and reliability of the main types of agricultural machinery]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2009. 108 (In Russian).
2. Krasnoshchekov N.V., Kiryushin V.I., Lipkovich E.I.O., et al. Innovatsii v mashinoispol'zovanii v APK Rossii [Machine use innovations in the agro-industrial complex of Russia]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2008. 435 (In Russian).
3. Dorokhov A.S. Sovershenstvovanie vkhodnogo kontrolya kachestva sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na dilerskikh predpriyatiyakh [Perfection of entrance quality assurance of agricultural machinery at the dealer enterprises]. *Vestnik Feder-*

al'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina. 2009. N2. 73-75 (In Russian).

4. Petrishchev N.A., Kostomahhin M.N., Sayapin A.S., Ivleva I.B. Sovershenstvovanie monitoringa sistemy «Chelovek-mashina-sreda» i pravil ekspluatatsii dlya povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti traktorov [Improving the human-machine-environment monitoring system and operation rules for increasing operational tractor reliability]. *Tekhnicheskiiy servis mashin*. 2020. N3(140). 12-20 (In Russian).

5. Makarkin I.M., Dunaev A.V., Galimov T.M. Priemy diagnostirovaniya reduktorov vedushchikh mostov perspektivnykh avtomobiley KAMAZ [Some methods of diagnostics of gear-boxes axles perspective of KAMAZ vehicles]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2016. N6. 27-30 (In Russian).

6. Izmaylov A.Yu., Kryazhkov V.M., Antyshev N.M., et al. *Konceptsiya modernizatsii parka sel'skokhozyaystvennykh traktorov Rossii na period do 2020 goda* [The concept of agricultural tractor fleet modernization in Russia for the period up to 2020]. Moscow: VIM. 2013. 88 (In Russian).

7. Dorokhov A.S. *Effektivnost' otsenki kachestva sel'skokhozyaystvennoy tekhniki i zapasnykh chastey* [Efficiency of assessing the quality of agricultural machinery and spare parts]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina*. 2015. N1(65). 31-35 (In Russian).

8. Dorokhov A.S., Korneev V.M., Kataev Yu.V. *Tekhnicheskii servis v sisteme inzhenerno-tekhnicheskogo obespecheniya APK* [Technical service in the system engineering and technical support of agroindustrial complex]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2020. N9. 12-18 (In Russian).

9. Dorokhov A.S. *Kachestvo mashinostroitel'noy produktsii: real'nost' i perspektivy* [The quality of engineering products: reality and prospects]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2005. N8. 2-4 (In Russian).

10. Dorokhov A.S., Semeykin V.A. *Vkhodnoy kontrol' kachestva produktsii mashinostroeniya* [Incoming quality control of mechanical engineering production]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2013. N11. 22-23 (In Russian).

11. Abdazimov A.D., Omonov N.N., Radjabov S.S. *Automation of agrotechnical assessment of cotton harvesting machines*. *Journal of physic: conference series*. 2019. 032001 (In English).

12. Macpherson J., De Wardt J., Laing M., Zenero N. *Data ownership for drilling automation – managing the impact*. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA. March 2016. Paper Number: SPE-178787-MS (In English).

13. Aksenov A.G., Izmailov A.Yu., Dorokhov A.S., Sibirev A.V. *Onion bulbs orientation during aligned planting of seed-onion using vibration-pneumatic planting device*. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 55. N2. 63-70 (In English).

14. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Dorokhov A.S. *Results of laboratory investigations of soil screening ability of a chain digger with asymmetric vibrator arrangement*. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57. N1. 9-18 (In English).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Костомахин М.Н. – научное руководство, разработка алгоритмов работы.

Петрищев Н.А. – анализ литературных данных, обоснование технических требований к прототипам.

Саяпин А.С. – разработка прототипов счетчиков-индикаторов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kostomakhin M.N. – scientific supervision, development of work algorithms.

Petrishchev N.A. – literature analysis, substantiation of technical requirements for the prototypes.

Sayapin A.S. – development of counter-indicator prototypes.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

23.08.2021

02.09.2021

Энергосберегающее освещение сельскохозяйственных помещений и расчет его параметров

Леонид Юрьевич Юферов,

доктор технических наук, e-mail: leouf@ya.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что правильно подобранное освещение животноводческих ферм обеспечивает оптимальную производительность животных и птицы и приносит прибыль предприятию. (*Цель исследования*) Обосновать параметры энергосберегающего освещения сельскохозяйственных помещений и разработать методики его расчета. (*Материалы и методы*) Показали, что в тепличных хозяйствах для освещения чаще всего используют натриевые лампы высокого и низкого давления, однако их спектр лишь частично заменяет естественный спектр. Предположили, что расширение спектра и приближение его к солнечному позволит повысить качество продукции и урожайность. Констатировали, что для освещения животноводческих и птицеводческих помещений традиционно применяются лампы накаливания и люминесцентные лампы, но они не имеют возможности создать систему освещения с функцией «рассвет – закат», а их спектр не соответствует полному диапазону, воспринимаемому животными и птицей. Отметим, что работа светодиодных источников света имеет особенности, из-за которых нельзя применять стандартные методики расчета. Разработали формулы для вычисления освещенности и потока фотонов. (*Результаты и обсуждение*) Привели примеры реализации разработанных нами энергосберегающих систем освещения в птичниках с напольным содержанием, коровниках с привязным содержанием и в экспериментальной фитолaborатории для выращивания рассады. Выявили, что после замены системы освещения на основе ламп ДРЛ-125 на новую, с 36 светодиодными светильниками мощностью по 9 ватт, потребляемая мощность снизилась с 2250 до 336 ватт, средний уровень освещенности увеличился и составил 90 люкс, при этом улучшилась равномерность освещения и цветопередача. Разработали резонансную систему питания светодиодов для создания систем освещения с функцией «рассвет – закат». (*Выводы*) Показали возможность и привели примеры внедрения разработанных нами энергосберегающих регулируемых систем освещения на основе светодиодных источников света.

Ключевые слова: энергосбережение, освещение в сельском хозяйстве, светодиоды, ультрафиолет.

Для цитирования: Юферов Л.Ю. Энергосберегающее освещение сельскохозяйственных помещений и расчет его параметров // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 28-34. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-28-34.

Energy-Saving Lighting of Agricultural Premises and its Parameters Calculation

Leonid Yu. Yuferev,

Dr.Sc.(Eng.), e-mail: leouf@ya.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The properly selected lighting for livestock farms is noted to ensure the optimal productivity of bred animals and poultry and to generate profit for the enterprise. (*Research purpose*) The research purpose is to substantiate the parameters of energy-saving lighting for agricultural premises and to develop methods for its calculation. (*Materials and methods*) It has been shown that greenhouse farms most often use high and low pressure sodium lamps for lighting, but their spectrum only partially substitutes the natural one. It has been assumed that expanding the spectrum and approximating it to the solar one could improve product quality and yield. It has been stated that incandescent and fluorescent lamps are traditionally used to illuminate livestock and poultry premises, but they cannot create a lighting system with a «dawn - sunset» function, and their spectrum does not correspond to the full range perceived by animals and birds. It has been noted that the LED light sources' functioning has such features that make the application of standard calculation methods impossible. We obtained formulas for calculating the light level and flux of photons. (*Results and discussion*) We provided examples of applying the energy-saving lighting systems developed by us in poultry houses with floor housing system, in cowsheds with tethered housing system and in an experimental phyto-laboratory for

growing seedlings. It has been found that after replacing the lighting system based on DRL-125 lamps with a new one, with 36 nine-watt LED lamps, the power consumption decreased from 2,250 to 336 watts, the average light level increased and amounted to 90 lux, while the illumination uniformity and color rendition improved. We have developed a resonant power supply system for LEDs to create lighting systems with a «sunrise - sunset» function. (*Conclusions*) We have shown the possibility and provided examples of using the developed by us energy-saving controlled lighting systems based on LED light sources.

Keywords: energy saving, lighting in agriculture, LEDs, ultraviolet light, vision system

For citation: Yuferev L.Yu. Energosberegayushchee osveshchenie sel'skokhozyaystvennykh pomeshcheniy i raschet ego parametrov [Energy-saving lighting of agricultural premises and its parameters calculation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 28-34 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-28-34.

Качественное освещение помещений при выращивании сельскохозяйственных животных и растений – важное условие успешного развития агропромышленного комплекса. Потребление электроэнергии в сельхозпроизводстве России составляет 13-16 млрд кВт·ч в год [1]. Значительная часть затрат приходится на освещение. Так, в нашей стране в растениеводстве защищенного грунта установлено более 400 000 ламп и облучателей, которые потребляют около 1 млрд кВт·ч [2].

Известно, что хорошее освещение, включая оптимальное управление светом, имитацию рассвета и заката, может повысить уровень производства на 8-15% [3]. Для содержания коров рекомендуют использовать интенсивность света около 150-300 Лк в течение 16-часового дневного периода. При выращивании птицы обращают внимание не только на уровень и продолжительность освещенности, но и на спектр световых волн [4, 5].

В тепличных хозяйствах изменение спектрального состава, расширение спектра искусственных источников света в область УФ-излучения повышает урожайность и улучшает качественные характеристики продукции. В процессе природного фотосинтеза используется только часть спектра видимого солнечного излучения – волны длиной 380-700 нм. Скорость роста и развития тепличных растений зависит в первую очередь от интенсивности облучения [6, 7], то есть от величины световой энергии, приходящейся на единицу облучаемой поверхности, а следовательно, и от количества и мощности используемых тепличных светильников. Наиболее близки к солнечному свету по спектральному составу металлогалогенные лампы высокого давления, содержащие ртуть, но они имеют фиксированный спектр и не очень большой срок службы.

Для искусственного освещения растений широкое распространение получили следующие лампы: ДРЛФ 400 с КПД в области ФАР, равным 12%, ДРФ 1000 – 18-20%, ДНАТ 400 – 25-26%, ДРИ 1000-6 и ДРИ 2000-6 – 27-28%, ДКСТЛ 10000 – 10-12%. При этом на желто-зеленую часть спектра у таких ламп приходится 45-62% от общего светового излучения. Примерно 35% от потребляемой мощности составляет излуче-

ние в ИК-диапазоне 700-1200 нм, которое вызывает повышенный расход воды [8-10].

Для освещения животноводческих и птицеводческих помещений применяют лампы накаливания и люминесцентные лампы, имеющие и светоотдачу 8-16 лм/Вт и срок службы до 1000 ч, а также ртутные лампы высокого и низкого давления со светоотдачей 40-60 лм/Вт и сроком службы до 12000 ч. Внедрение системы плавного включения люминесцентных ламп (диммирования) удорожает систему освещения [11].

Применение последних научных достижений повышает эффективность сельскохозяйственной светотехники. Наиболее экономичным и эффективным источником света для животноводческих и птицеводческих помещений могут стать светодиодные светильники [12, 13]. По светоотдаче они в 10 раз превышают лампы накаливания и в 3 раза – люминесцентные. Спектр излучения светодиодов не зависит от уровня освещенности, а стоимость не превышает 0,1 руб. за 1 лм. Это позволяет создавать энергоэкономичное освещение с небольшим сроком окупаемости.

Цель исследования – обосновать параметры энергосберегающего освещения сельскохозяйственных помещений и разработать методику его расчета.

Материалы и методы. Для создания систем освещения применяли светодиоды мощностью 0,5-100 Вт. Их сравнивали с лампами ДРЛ мощностью 125 Вт, ЛБ, ЛД мощностью 30 Вт и лампами ДНАЗ мощностью 400 Вт.

Современные светодиоды перекрывают весь видимый диапазон оптического спектра – от красного до фиолетового цвета. Диапазон длин волн излучения светодиодов в красной области спектра составляет 620-680 нм, в оранжевой – 610-620 нм, в желтой – 585-595 нм, в зеленой – 520-535 нм, в голубой – 465-475 нм, в синей – 450-465 нм и в ультрафиолетовой 370-400 нм (Айзенберг Ю.Ф., 2006). Изменяя ток для разных светодиодов, можно получать различные по составу и интенсивности спектры излучения и таким образом подбирать спектр светильника в зависимости от конкретного этапа развития растения [14-16].

Требования растений к оптимальному сочетанию спектральных и энергетических характеристик светового режима специфичны. Например, наилучшее

содержание синего, зеленого и красного для томата составляет 15, 17 и 68%, для огурца – 17, 40 и 43%, для салата – 45, 20 и 35%, для редиса – 34, 33 и 33%, для пшеницы – 25% синего и 75% красного, для большинства остальных сельскохозяйственных растений 25-30% в синей области, 20% в зеленой и 50% в красной [17].

В условиях защищенного грунта для нормально-го развития растений необходим определенный диапазон значений интенсивности светового потока. Минимальный для роста растений уровень интенсивности светового потока фотосинтетически активной радиации – 2-8 Вт/м² ФАР (500-2000 лк). Минимальные среднедневные уровни интенсивности светового потока, при которых растения могут нормально развиваться, цвести и плодоносить, – 20 Вт/м² ФАР (5000 лк). При выгонке рассады – 50-60 Вт/м² ФАР. Для формирования хозяйственно полезного урожая – 100-200 Вт/м² ФАР. При мощности выше 200 Вт/м² происходит насыщение, растения желтеют и отмирают.

Согласно разработкам Института Гипронисель-пром, оптимальная норма облученности в теплице для выращивания рассады овощей – 20 Вт/м² ФАР с фотопериодом 14 ч, для выращивания на продукцию – 100 Вт/м² с фотопериодом 16 ч. Для светокультуры растений необходима освещенность 12-20 клк, или 30-50 Вт/м² ФАР.

Для оценки интенсивности светового потока наибольшее распространение получил метод измерения освещенности люксметром с пересчетом поправочными коэффициентами в интенсивность ФАР. Из литературных источников известны следующие переводные коэффициенты: 10 клк для прямого солнечного света равны 38,8-40,2 Вт/м² ФАР, для рассеянного излучения – 46 Вт/м² ФАР. В металлогалогенных лампах 10 клк = 30,5 Вт/м² ФАР, в натриевых ламп высокого давления (в том числе ДнаЗ) – 24,5 Вт/м² ФАР; 1 Вт ФАР имеет средний поток фотонов 4,6 мкмоль/м²/с [2].

Количественно ФАР оценивают по 2 показателям: плотности потока (интенсивности) радиации – потоку лучистой энергии ФАР, проходящему в единицу времени и единицу поверхности, Вт/м² или мкмоль/м²/с, и дозе радиации, поступающей за время действия облучения, Дж/см² [18].

Для расчета потока фотонов от светодиодных облучателей мы разработали формулу [19]:

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{F_i \cdot \lambda_i \cdot P_{сд_i}}{h \cdot c \cdot V_i \cdot N_a}, \quad (1)$$

где N – поток фотонов, моль/с;

$I = 1 \dots n$ – светодиод с определенной длиной волны;

F_i – светоотдача светодиода, лм/Вт;

λ_i – длина волны светодиода, нм;

$P_{сд}$ – мощность светодиода, Вт;

h – постоянная Планка ($6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с);

c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с);

V – коэффициент пересчета, $V = 250,3 + 336 \times \cos(5,17 - 8,19 \cdot \lambda) - 92,99 \cdot \sin(0,0585 + 306 \cdot \lambda)$;

N_a – число Авогадро, $N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Для общего и местного освещения помещений следует использовать светодиоды с цветовой температурой 2400-6800 К. Интенсивность ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 320-400 нм не должна превышать 0,03 Вт/м². Наличие в спектре излучения длин волн менее 320 нм не допускается. В то же время для освещения животноводческих и птицеводческих помещений спектральный состав источников света может быть другим. Так, у птицы четырехцветная система зрения, и в источниках света для комфортного восприятия пищи необходимо добавлять ультрафиолетовое излучение диапазона УФА (рис. 1) [20]. У коров дихроматическая система зрения, в которой присутствуют пигменты только 445 и 508, поэтому можно применять источники света холодного спектра с низким содержанием красного [21].

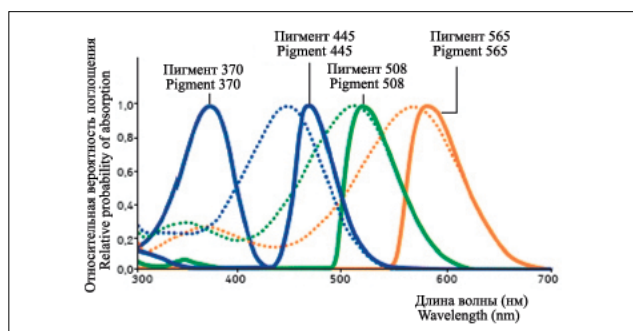


Рис. 1. Спектральная чувствительность системы зрения птицы и человека (пунктирно)

Fig. 1. Spectral sensitivity of the bird and human vision systems (dotted line)

При проектировании систем освещения основным параметром служит нормированная освещенность E_H . Ее определяют в зависимости от размеров объектов помещения, контраста объекта и фона, характеристики фона и других условий. В России главным документом, устанавливающим параметры освещения, считаются Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95. Кроме этих норм, существуют Санитарные правила и нормы СанПиН 2.21/2.1.1.1278-03, Московские городские строительные нормы МГСН 2.06-99 и множество отраслевых норм, например СНиП 11-4-79 (таблица).

Для расчета освещенности под светодиодным светильником нельзя использовать традиционные методики из-за погрешности, поскольку они обычно имеют направленную кривую светораспределения. Мы разработали формулу для расчета освещенности под светодиодным светильником, дающим определенную длину светящейся линии, расположенным на опреде-

Нормируемые значения освещенности STANDARDIZED ILLUMINATION VALUES			
Помещение, участок, оборудование Premises, plot, equipment	Освещенность, лк / Illumination, lx		Биологически необходимая освещенность, лк Biologically required lighting, lux
	при газоразрядной лампе with gas discharge lamp	при лампе накаливания with incandescent lamp	
Помещения для содержания животных и молодняка (коров, лошадей, свиней, овец, кур) Premises for keeping animals and young animals (cows, horses, pigs, sheep, chickens)	75	35	75
Коровники с доением в стойлах Cowsheds with milking in stalls	100	100	75
Доильный зал / Milking parlor	200	150	150
Родильное отделение / Maternity ward	200	150	150
Телятники / Calves	100	50	100
Помещение для стрижки овец / Sheep shearing room	200	150	150
Участок для обработки и смешивания кормов Area for feed processing and mixing	150	100	50
Участок клеточного содержания кур Chicken cage area	100	50	30
Проходы и соединительные коридоры теплиц Greenhouse passages and connecting corridors	75	30	30
Участок проращивания семян / Seed germination area	75	30	1000
Камеры хранения картофеля и фруктов Storage rooms for potatoes and fruits	75	20	20
Классные комнаты, аудитории и лаборатории Classrooms, auditoriums and laboratories	300	–	500 (на доске) (on the desk)
Кабинеты технического черчения / Technical drawing rooms	500	–	–
Диспетчерская / Control room	100	50	–
Мастерская / Workshop	150	100	–
Гаражи / Garages	100	50	–
Жилые комнаты / Living rooms	–	100	–
Улицы сельских населенных пунктов / Rural settlements Streets	4	–	–

ленной высоте, при смещении от проекции с учетом телесного угла светильника в точке A (рис. 2) [2]:

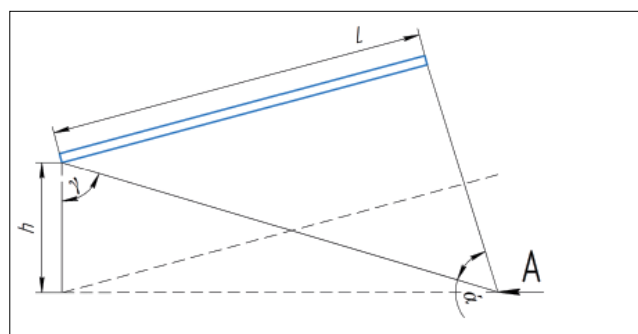


Рис. 2. Расположение освещаемой точки под светодиодным светильником: A – точка наблюдения; L – длина светильника; h – высота подвеса; α – угол наблюдения светильника; γ – угол смещения по горизонтали

Fig. 2. The location of the illuminated point under the LED lamp: A – observation point; L – lamp length; h – suspension height; α – light observation angle; γ – horizontal displacement angle

$$E_A = \frac{\Phi \cdot \pi \cdot [1 - \cos(\Omega/2)]}{L \cdot 2 \cdot h} \times \left(\sin \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \cdot \left[\cos \left(\gamma \cdot \frac{\Omega}{120} \right) \right], \quad (2)$$

где E_A – освещенность, лк;
 Ω – телесный угол свечения источника света, град.;
 L – длина светящейся линии светильника, м;
 h – высота подвеса, м;
 α – угол наблюдения светильника, град.;
 γ – угол смещения по горизонтали, град.;
 Φ – световой поток светильника, лм.

Результаты и обсуждение. Разработанные нами энергосберегающие системы освещения реализованы в птичниках с напольным содержанием, коровниках с привязным содержанием животных и в экспериментальной фитолaborатории для выращивания рассады.

В частности, для освещения коровника на 200 гол. и телятника на 150 гол. установили светодиодные све-

тильники мощностью по 9 Вт, со световым потоком 890 лм и цветовой температурой 6500 К, а в спектре большое содержание синего и зеленого спектра. Высота установки светильников – 2,6 м (рис. 3).

В телятнике размером 45×21 м после замены системы освещения на основе ламп ДРЛ-125 на новую, с 36 светодиодными светильниками мощностью по 9 Вт, потребляемая мощность снизилась с 2250 до 336 Вт, средний уровень освещенности увеличился и составил 90 лк, при этом улучшилась равномерность освещения и цветопередача.



Рис. 3. Сравнение систем освещения коровника на основе ламп ДРЛ-125 общей мощностью 2250 Вт и со светодиодными светильниками общей мощностью 336 Вт

Fig. 3. The comparison of cowshed lighting systems based on DRL-125 lamps with the total power of 2250 W and with LED lamps with the total power of 336 W

Для освещения рассады мы изготовили светильники на основе широкополосных светодиодов мощностью 100 Вт (рис. 4). При сравнении разработанных светильников мощностью по 300 Вт с традиционными тепличными лампами ДНАЗ мощностью 400 Вт отметили, что рассада выглядела более плотной и менее вытянутой (рис. 5).

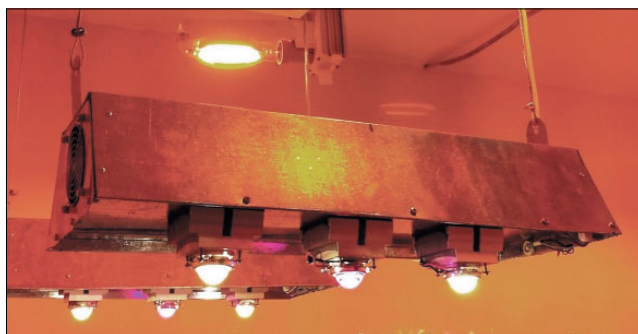


Рис. 4. Внешний вид светодиодных облучателей мощностью по 300 Вт

Fig. 4. The appearance of 300 W LED illuminators

При конструировании систем освещения животноводческих и птицеводческих помещений на основе светодиодов для электробезопасности по всей длине здания (75-300 м) проходят линии постоянного тока напряжением 24 В и линии управления освещенностью. Для уменьшения потерь напряжения приходится применять кабели с большим сечением – до



Рис. 5. Рассада, выращенная под натриевыми лампами (слева) и под новыми облучателями (справа)

Fig. 5. Seedlings grown under sodium lamps (left) and under new irradiators (right)

25 мм². Эксплуатация данных систем показывает, что, несмотря на все усилия, принимаемые проектировщиками, имеется существенное отличие в светоотдаче первых и наиболее удаленных от источника питания светильников [23]. Решением проблемы стала установка источников питания (драйверов) через каждые 5-15 м, в каждом светильнике, или прокладка проводов большого сечения [24]. В связи с этим возникает необходимость поиска другой системы питания с возможностью плавного регулирования освещения. Мы разработали резонансную систему питания светодиодных светильников (рис. 6) [9].

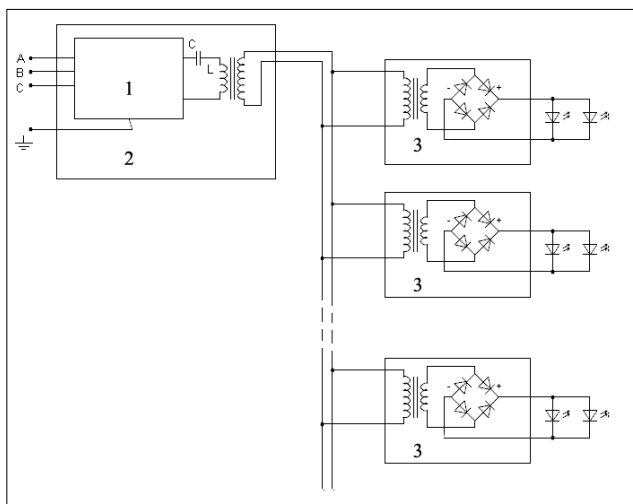


Рис. 6. Резонансная система электропитания светодиодных светильников: 1 – преобразователь частоты; 2 – передающий преобразователь; 3 – приемный преобразователь

Fig. 6. Resonant power supply system for LED lamps: 1 – frequency converter; 2 – transmitting converter; 3 – receiving converter

В данной схеме на все помещение необходимо будет установить только один передающий преобразователь напряжения [24]. В самих светильниках потребуется установка только приемного преобразователя, состоящего из малогабаритного высокочастотного трансформатора и выпрямителя. Это существенно снизит их стоимость и повысит надежность. Электропитание светодиодных светильников от резонансной системы электроснабжения позволяет упростить систему управления уровнем освещения. Для этого

нужно будет только плавно регулировать частоту преобразователя. Таким образом можно реализовать функцию освещения «рассвет – закат».

Электробезопасность как для животных, так и для обслуживающего персонала улучшается, поскольку в схеме задействованы разделительные трансформаторы и напряжение в проводах имеет повышенную частоту.

Выводы. Показали возможность внедрения разработанных нами энергосберегающих регулируемых

систем освещения на основе светодиодных источников света.

Новые системы освещения растений имеют спектр, максимально приближенный к естественному солнечному свету, а также соответствуют цветовому восприятию животных и птицы.

Разработанная нами резонансная система питания светодиодных источников света позволяет реализовать функцию освещения «рассвет – закат».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Переверзев И.А., Султанов Г.А. Характеристика основных объектов электропотребления в сельскохозяйственном производстве // *Новые технологии*. 2013. №3. С. 78-85.
2. Юферев Л.Ю., Алферова Л.К. Светотехника в сельском хозяйстве. М.: ВИМ. 2016. 156 с.
3. Филатов Д.А., Терентьев П.В., Авдеева Е.А., Плаксин М.А. Энергоэффективное освещение в молочном скотоводстве // *Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. №4 (20). С. 50-57.
4. Пильщикова Ю.А., Коваленко О.Ю., Овчукова С.А. Влияние комбинированного излучения на молодняк птицы // *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ*. 2012. №2. С. 29-31.
5. Шувалова Л.А., Широбокова Т.А., Кудрин М.Р., Иксанов И.И. Влияние видимого спектра искусственного излучения на продуктивность дойных коров // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2017. Т. 54. №2. С. 111-116.
6. Тертышная Ю.В., Левина Н.С. Влияние спектрального состава света на развитие сельскохозяйственных культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. Т. 10. №5. С. 24-29.
7. Кондратьева Н.П., Филатов Д.А., Терентьев П.В., Аль-Хелю А.С. Сравнительная оценка основных характеристик натриевых и светодиодных тепличных облучателей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №1. С. 50-54.
8. Вассерман А.Л., Квашин Г.Н., Малышев В.В. Об оценке эффективности действия источников излучения на растения // *Светотехника*. 1986. №7. С. 14-16.
9. Lee M.J., Seo H.S., Min S.Y., et al. Effects of supplemental lighting with high-pressure sodium or plasma lamps on quality and yield of cut roses. *Horticultural Science and Technology*. 2021. N39(1). 49-61.
10. Wan Y., Wu Y., Zhang M., Hong A., Liu Y. Effects of photoperiod extension via red-blue light-emitting diodes and high-pressure sodium lamps on the growth and photosynthetic characteristics in *Paeonia lactiflora*. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2020. N42(12). 174.
11. Кавтарашвили А.Ш., Новоторов Е.Н., Гладин Д., Колокольникова Т.Н. Светодиодное освещение при содержании родительского стада // *Птицеводство*. 2012. №5. С. 15-17.
12. Светодиоды и их применение для освещения. Под общ. ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Знак. 2012. 280 с.
13. Кавтарашвили А.Ш., Новоторов Е. Новый способ светодиодного освещения // *Животноводство России*. 2011. №7. С. 15-16.
14. Сарычев Г. Светодиоды и интенсивная светокультура растений // *Полупроводниковая светотехника*. 2018. №4 (54). С. 45-47.
15. Proshkin Y., Semenova N., Smirnov A., Chilingaryan N. The LED phyto lighting for improving the environmental friendliness of growing and productivity of lettuce varieties with red and green leaves. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. N578(1). 012013.
16. Kowalczyk K., Olewnicki D., Mirgos M., Gajc-Wolska J. Comparison of selected costs in greenhouse cucumber production with LED and HPS supplemental assimilation lighting. *Agronomy*. 2020. N10(9). 10091342.
17. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы. Новосибирск: Изд. Сиб. отд. РАН. 2000. 213 с.
18. Yuferev L., Sokolov A. Energy-Efficient Lighting System for Greenhouse Plants. Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. 2018. 204-229.
19. Соколов А.В., Юферев Л.Ю. Универсальная широкополосная система освещения с варьлируемым спектром для теплиц // *Инновации в сельском хозяйстве*. N1(1). 2012. С. 10-14.
20. Юферев Л.Ю., Алферова Л.К. Ультрафиолетовые светодиоды для стимулирования продуктивности животных и птицы // *Техника в сельском хозяйстве*. 2009. №4. С. 15-16.
21. Тихонова Г.Н., Феоктистова Н.Ю. Кто как видит: зрительный анализатор: от одноклеточных до человека. М.: Чистые пруды. 2006. 32 с.
22. Стребков Д.С., Юферев Л.Ю., Александров Д.В., Соколов А.В. Повышение эффективности систем освещения и облучения // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2014. №1. С. 13-16.
23. Юферев Л.Ю., Стребков Д.С., Рошин О.А. Экспериментальные модели резонансных систем электрической энергии. М.: ВИЭСХ. 2010. 218 с.

REFERENCES

1. Pereverzev I.A., Sultanov G.A. Kharakteristika osnovnykh obektov elektropotrebleniya v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Characteristics of main objects of electricity consumption in agricultural production]. *Novye tekhnologii*. 2013. N3. 78-85 (In Russian).
2. Yuferev L.Yu., Alferova L.K. Svetotekhnika v sel'skom khozyaystve [Lighting technology in agriculture]. Moscow: VIM. 2016. 156 (In Russian).
3. Filatov D.A., Terent'ev P.V., Avdeeva E.A., Plaksin M.A. Energoeffektivnoe osveshchenie v molochnom skotovodstve [Energy efficient lighting in dairy farming]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2018. N4(20). 50-57 (In Russian).
4. Pil'shchikova Yu.A., Kovalenko O.Yu., Ovchukova S.A. Vliyaniye kombinirovannogo izlucheniya na molodnyak ptitsy [Effect of the combined radiation on young birds]. *Vestnik FGOU VPO MGAU*. 2012. N2. 29-31 (In Russian).
5. Shuvalova L.A., Shirobokova T.A., Kudrin M.R., Iksanov I.I. Vliyaniye vidimogo spektra iskusstvennogo izlucheniya na produktivnost' doynykh korov [The influence of the visible spectrum in artificial radiation on dairy cows' productivity]. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. Vol. 54. N2. 111-116 (In Russian).
6. Tertyshnaya Yu.V., Levina N.S. Vliyaniye spektral'nogo sostava sveta na razvitie sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Effect of light spectrum on crops growth]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016. Vol. 10. N5. 24-29 (In Russian).
7. Kondrat'eva N.P., Filatov D.A., Terent'ev P.V., Al'-Helyu A.S. Sravnitel'naya otsenka osnovnykh kharakteristik natrievykh i svetodiodnykh teplichnykh obluchateley [Comparative assessment of sodium and led greenhouse irradiators main characteristics]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 50-54 (In Russian).
8. Vasserman A.L., Kvashin G.N., Malyshev V.V. Ob otsenke effektivnosti deystviya istochnikov izlucheniya na rasteniya [On the assessment of the radiation source action effectiveness for plants]. *Svetotekhnika*. 1986. N7. 14-16 (In Russian).
9. Lee M.J., Seo H.S., Min S.Y., et al. Effects of supplemental lighting with high-pressure sodium or plasma lamps on quality and yield of cut roses. *Horticultural Science and Technology*. 2021. N39(1). 49-61 (In English).
10. Wan Y., Wu Y., Zhang M., Hong A., Liu Y. Effects of photoperiod extension via red-blue light-emitting diodes and high-pressure sodium lamps on the growth and photosynthetic characteristics in *Paeonia lactiflora*. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2020. N42(12). 174 (In English).
11. Kavtarashvili A.Sh., Novotorov E.N., Gladin D., Kolokol'nikova T.N. Svetodiodnoe osveshchenie pri soderzhanii roditel'skogo stada [Led lighting for parental stock in chicken]. *Ptitsevodstvo*. 2012. N5. 15-17 (In Russian).
12. Svetodiody i ikh primeneniye dlya osveshcheniya [LEDs and their application for lighting]. Pod obshch. red. Yu.B. Ayzemberga. Moscow: Znack. 2012. 280 (In Russian).
13. Kavtarashvili A.Sh., Novotorov E. Novyy sposob svetodiodnogo osveshcheniya [New type of LED illumination]. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2011. N7. 15-16 (In Russian).
14. Sarychev G. Svetodiody i intensivnaya svetokul'tura rasteniy [LEDs and intensive photoculture of plants]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2018. N4(54). 45-47 (In Russian).
15. Proshkin Y., Semenova N., Smirnov A., Chilingaryan N. The LED phyto lighting for improving the environmental friendliness of growing and productivity of lettuce varieties with red and green leaves. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. N578(1). 012013 (In English).
16. Kowalczyk K., Olewnicki D., Mirgos M., Gajc-Wolska J. Comparison of selected costs in greenhouse cucumber production with LED and HPS supplemental assimilation lighting. *Agronomy*. 2020. N10(9). 10091342 (In English).
17. Tikhomirov A.A., Sharupich V.P., Lisovskiy G.M. Svetokul'tura rasteniy: biofizicheskie i biotekhnologicheskie osnovy [Plant photoculture: biophysical and biotechnological foundations]. Novosibirsk: Izd. Sib. otd. RAN. 2000. 213 (In Russian).
18. Yuferev L., Sokolov A. Energy-Efficient Lighting System for Greenhouse Plants. Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. 2018. 204-229 (In English).
19. Sokolov A.V., Yuferev L.Yu. Universal'naya shirokopolosnaya sistema osveshcheniya s var'iruемым спектром dlya teplits [Versatile broadband variable spectrum lighting system for greenhouses]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. N1(1). 2012. 10-14 (In Russian).
20. Yuferev L.Yu., Alferova L.K. Ul'trafiol'tovye svetodiody dlya stimulirovaniya produktivnosti zhivotnykh i ptitsy [Ultraviolet LEDs for stimulating the productivity of animals and poultry]. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 2009. N4. 15-16 (In Russian).
21. Tikhonova G.N., Feoktistova N.Yu. Kto kak vidit: zritel'nyy analizator: ot odnokletochnykh do cheloveka [The way they see: the visual analyzer: from unicellular organisms to human]. Moscow: Chistye prudy. 2006. 32 (In Russian).
22. Strebkov D.S., Yuferev L.Yu., Aleksandrov D.V., Sokolov A.V. Povysheniye effektivnosti sistem osveshcheniya i oblucheniya [Improving the efficiency of lighting and irradiation systems]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2014. N1. 13-16 (In Russian).
23. Yuferev L.Yu., Strebkov D.S., Roshchin O.A. Eksperimental'nye modeli rezonansnykh sistem elektricheskoy energii [Experimental models of resonant power supply systems]. Moscow: VIESH. 2010. 218 (In Russian).

Конфликт интересов.

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

Conflict of interest.

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

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

05.04.2021
22.09.2021

Использование комбинированных рабочих органов и агрегатов при возделывании льна-долгунца

Иван Валентинович Сизов,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: isizov@tvgscha.ru;

Филипп Леонидович Блинов,
аспирант, fblinov@tvgscha.ru;
Павел Вячеславович Морозов,
аспирант, e-mail: pasha.morozow-rzew@yandex.ru

Тверская государственная сельскохозяйственная академия, г. Тверь, Российская Федерация

Реферат. Рассмотрели технологические аспекты возделывания льна-долгунца в различных условиях. При избыточной влажности и нарушении аэрации в пахотном слое предложили использовать кротование. Показали, что эту операцию можно выполнять одновременно со вспашкой при использовании приспособления к плугам общего назначения. Обосновали целесообразность использования комбинированных рабочих органов и агрегатов для качественного выполнения работ. (*Цель исследования*) Оценить качество работы комбинированных рабочих органов и агрегатов, выполняющих за один проход несколько операций. (*Материалы и методы*) Изучили процессы и технические средства для возделывания льна. Использовали такие документы, как ГОСТ 20915-2011 и ГОСТ 33687-2015. (*Результаты и обсуждение*) При испытании игольчатого рабочего органа на почвенном канале выявили различия в размерах отпечатков игл при изменении скорости диска. Отметили, что ширина отпечатков практически не менялась, в отличие от их длины. Выявили, что расстояние между соседними отпечатками игл в почве значительно снижалось при повышении скорости от 0,4 до 2,8 метра в секунду. Заключение, что более интенсивное воздействие на почву возможно при достижении скорости 2,8-3,0 метра в секунду. В ходе полевых испытаний игольчатой бороны выявили зависимость показателей качества работы от скоростных характеристик. Установили, что с увеличением рабочей скорости агротехнические показатели заметно улучшаются. При скорости агрегата 3,0-3,5 метра в секунду получили допустимые показатели: гребнистость – менее 15 миллиметров, крошение почвы – около 95 процентов. (*Выводы*) Установили, что при возделывании льна-долгунца эффективны игольчатые бороны бесприводного типа, их использование позволяет выполнять операцию на повышенных скоростях.

Ключевые слова: лен-долгунец, возделывание льна-долгунца, обработка почвы, кротование, игольчатая бороны.

■ Для цитирования: Сизов И.В., Блинов Ф.Л., Морозов П.В. Использование комбинированных рабочих органов и агрегатов при возделывании льна-долгунца // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 35-40. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-35-40.

The Use of Combined Working Bodies and Units for Fiber Flax Cultivation

Ivan V. Sizov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: isizov@tvgscha.ru;

Filipp L. Blinov,
Ph.D. student (Eng.), e-mail: fblinov@tvgscha.ru;
Pavel V. Morozov,
Ph.D. student (Eng.),
e-mail: pasha.morozow-rzew@yandex.ru

Tver State Agricultural Academy, Tver, Russian Federation

Abstract. The technological aspects of fiber flax cultivation under various conditions were considered. The use of mole ploughing was proposed to solve a serious problem of excessive humidity and violation of the arable layer aeration. This operation can be performed simultaneously with plowing when using a device for general-purpose plows. The authors substantiated the expediency of using combined working bodies and units for high-quality performance. (*Research purpose*) To analyse the work of combined working bodies and units that perform several operations in one pass. (*Materials and methods*) The processes and technology for flax cultivation were studied. The following documents were used: GOST standard 20915-2011 and GOST standard 33687-2015. (*Results and discussion*) Testing a needle working body on a soil bin revealed differences in the needle print sizes depending on the change in the disk speed. It was noted that the width of the prints hardly changed, in contrast to their length. It was found that the distance between adjacent needle prints in the soil decreased significantly when the speed increased from 0.4 to 2.8 meters

per second. The authors concluded that a stronger impact on the soil is possible when the speed of 2.8-3.0 meters per second is reached. The field tests of the needle harrow revealed the performance indicator dependence on the speed characteristics. It was found that agrotechnical indicators improve markedly with an increase in the speed of the unit. At the unit speed of 3.0-3.5 meters per second, the following permissible indicators were obtained: ridging – less than 15 millimeters, soil crumbling – about 95 percent. (*Conclusions*) It was found out that for fiber flax cultivation, non-power needle harrows are effective, they facilitates the performance at higher speeds.

Keywords: fiber flax, fiber flax cultivation, tillage, mole ploughing, needle harrow.

For citation: Sizov I.V., Blinov F.L.; Morozov P.V. Ispol'zovanie kombinirovannykh rabochikh organov i agregatov pri vozdeleyvanii l'na-dolguntsa [The use of combined working bodies and units for fiber flax cultivation]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 35-40 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-35-40.

Возделывание льна-долгунца должно способствовать повышению плодородия почвы, накоплению и сохранению влаги и питательных веществ в пахотном слое. При этом важно выбрать перечень необходимых мероприятий для качественного и эффективного проведения полевых работ. Число операций должно быть минимизировано, чтобы избежать чрезмерного воздействия на почву и сделать рабочий процесс экономически целесообразным.

Основной обработке после зерновых культур должно предшествовать лущение стерни на глубину до 6 см. Его проводят не позднее чем за 2-3 недели до пахотных работ. Почвы, засоренные такими сорняками, как пырей ползучий, обрабатываются лущильниками на глубину до 12 см. Семена пырея, попадая в измельченную и перемешанную почву, быстро прорастают. В дальнейшем при вспашке сорняки глубоко заделываются в почву и погибают.

Одной из проблем при подготовке почвы под лен и другие мелкосеменные культуры считается избыточная влажность и нарушение аэрации в пахотном слое [1-3]. Особенно это характерно для тяжелых почв. Для ее решения применяют кротование – образование горизонтальных дрен-кротовин для отвода избыточной воды в подпахотный слой [4, 5].

Расстояние между кротовинами в зависимости от характера почвы составляет 0,90-1,75 м, их диаметр – 5,5-6,0 см [6]. Как показывают опыты, кротование тяжелых и средних избыточно увлажненных почв в Нечерноземной зоне повышает урожай на 20-30% по сравнению с участками без кротования. При зяблевой вспашке эта операция признана полезной, способствующей регулированию водного и воздушного режима почв.

Кротование можно выполнять одновременно со вспашкой при использовании приспособления к плугам общего назначения. Рабочий орган представляет собой нож с дренажом, имеющим форму цилиндра (рис. 1). Для крепления ножа к корпусу плуга служат планки. На каждой из них имеются отверстия – для крепления планок к корпусу и для фиксации ножа между ними.

Крепление кротователя проводится при транспортном положении плуга. С корпуса плуга снимают полевую доску и вместо нее ставят одну из планок. Другую планку подводят с правой внутренней стороны стойки корпуса. Затем планки скрепляют болтами. Нож с дренажом устанавливают между этими планками и укрепляют болтом. Фиксация ножа в рабочем положении обеспечивается предохранительной шпилькой. Если нож при выполнении операции наезжает на препятствие, то шпилька срезается, нож поворачивается и выглубляется на поверхность.

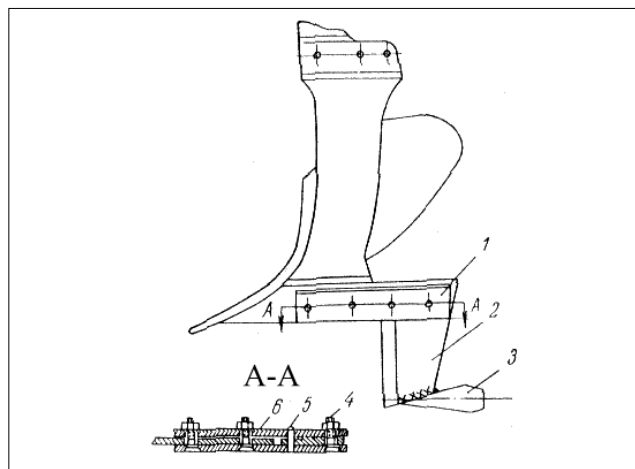


Рис. 1. Кротователь, соединенный с корпусом плуга: 1 – полевая доска; 2 – нож; 3 – дренаж; 4 – болты; 5 – предохранительная шпилька; 6 – планка

Fig. 1. A mole plough connected to the plow body: 1 – field board; 2 – knife; 3 – mole blade; 4 – bolts; 5 – safety pin; 6 – bar

Предпосевную обработку под лен-долгунец следует проводить в максимально сжатые сроки, как только почва станет спелой, то есть она не мажется и не распыляется, не образует глыб, а хорошо распадается на мелкие структурные комочки.

Один из важных критериев выбора машин и орудий – их экономическая целесообразность. Большое распространение получили комбинированные агрегаты, способные за один проход выполнять несколько операций. В период предпосевной обработки они

могут быть востребованы для проведения таких процессов, как рыхление, прикатывание, выравнивание поверхности поля, уничтожение почвенной корки. Соответственно, комбинированный агрегат может иметь набор различных рабочих органов.

К орудиям, показавшим свою эффективность при обработке почвы под мелкосеменные культуры, следует отнести игольчатые бороны бесприводного типа. Их использование позволяет избежать излишнего распыления почвы, а также выполнять операцию на повышенных скоростях. Эти достоинства положительно влияют на качество и энергоёмкость рабочего процесса [7-9].

В процессе научной работы создан макетный образец игольчатой бороны.

Цель исследования – оценить качество работы комбинированных рабочих органов и агрегатов, выполняющих за один проход несколько операций.

Материалы и методы. Объектом исследования выступали процессы и технические средства для предпосевной обработки почвы при возделывании льна. Для определения условий испытаний и агротехнических показателей при полевых опытах использовали ГОСТ 20915-2011 – Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний, ГОСТ 33687-2015 – Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний.

Лабораторно-полевые исследования проведены на опытном поле Тверской ГСХА. Тип почвы – легко- и среднесуглинистая. Влажность почвы – 19,1-22,9%. Засоренность камнями – 3,2%, сорняками – 3,82%.

Рабочие органы бороны монтируются на раме и опираются на два опорных колеса (рис. 2). Машина содержит две установленные друг за другом батареи игольчатых дисков, связанные цепной передачей [10, 11].

Конструкция каждой батареи представляет собой ось с установленными на ней игольчатыми дисками, закрепленными на одинаковом расстоянии друг от друга. Батареи, соединенные цепной передачей, расположены со смещением, то есть диски находятся в шахматном порядке. Оси с дисками могут вращаться с различными угловыми скоростями в зависимости от передаточного отношения. Для более интенсивного рыхления почвы передаточное отношение цепной передачи изменяют путем смены звездочек.

Данное техническое средство включает также выравнивающий брус, смонтированный в задней части. По этой причине его можно считать комбинированным агрегатом, выполняющим два процесса – боронование и прикатывание. Рабочие органы приводятся во вращение при соприкосновении с почвой в процессе движения машины.

Для исследования процесса взаимодействия иглы бороны с почвой разработано приспособление, смонтированное на почвенном канале (рис. 3).



Рис. 2. Макетный образец игольчатой бороны (агротехнопарк Тверской ГСХА)

Fig. 2. A prototype of a needle harrow (the Agrotechnical Park of Tver State Agricultural Academy)

Приспособление включает игольчатый диск, жестко закрепленный на оси с опорами, установленными на кронштейнах. Они связаны с передвижной рамкой, способной перемещаться в направляющих, закрепленных на корпусе почвенного канала.

Приводная система почвенного канала состоит из электродвигателя, редуктора и системы тяговых тросов. Для проведения исследований корпус заполняют почвой.

Лабораторная установка предназначена для опытов с целью выявления особенностей работы игольчатого диска. Макетный образец использовали для определения оптимальных показателей качества при различных режимах работы.

Результаты и обсуждение. Испытания на почвен-

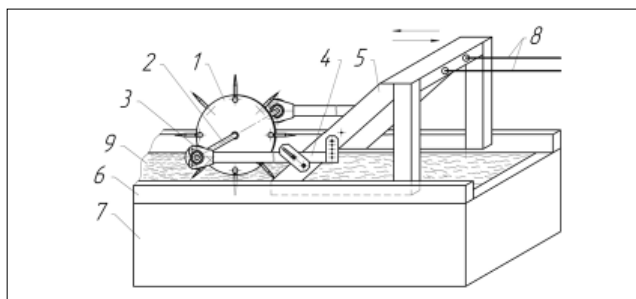


Рис. 3. Схема приспособления для исследования процесса взаимодействия иглы бороны с почвой: 1 – игольчатый диск; 2 – ось; 3 – опоры; 4 – кронштейн; 5 – передвижная рамка; 6 – направляющие; 7 – корпус канала; 8 – система тросов; 9 – почва

Fig. 3. The diagram of the device for studying the process of interaction of the harrow needle with the soil: 1 – needle disc; 2 – axis; 3 – supports; 4 – bracket; 5 – movable frame; 6 – guides; 7 – soil bin body; 8 – cable system; 9 – soil

ном канале выявили изменение размеров отпечатков игл при повышении скорости диска (таблица). Ширина отпечатков практически не менялась, в отличие от их длины. Среднее значение ширины находилось

Таблица									Table	
ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ ОТПЕЧАТКОВ ИГЛ В ПОЧВЕ ОТ СКОРОСТИ ДИСКА THE DEPENDENCE OF THE NEEDLE PRINTS SIZE ON THE DISC SPEED										
Скорость диска, м/с Disk speed, m / s	Размеры соседних отпечатков игл при движении диска (нумерация отпечатков), см The sizes of adjacent needle prints when the disk moves (print number), cm								Среднее значение Mean value	
	№1		№2		№3		№4			
	Д*	Ш*	Д	Ш	Д	Ш	Д	Ш	Д	Ш
0,4	6,0	4,5	7,0	3,5	7,5	4,5	6,0	3,5	6,6	4,0
0,9	7,5	4,5	6,5	4,0	7,5	3,5	7,0	4,0	7,1	4,0
1,7	8,0	4,5	7,5	4,0	9,0	5,0	8,0	4,0	8,1	4,4
2,8	8,5	4,5	7,5	5,0	9,5	5,0	8,5	4,5	8,5	4,8
*Д – длина (length); Ш – ширина (width)										

*Д – длина (length); Ш – ширина (width)

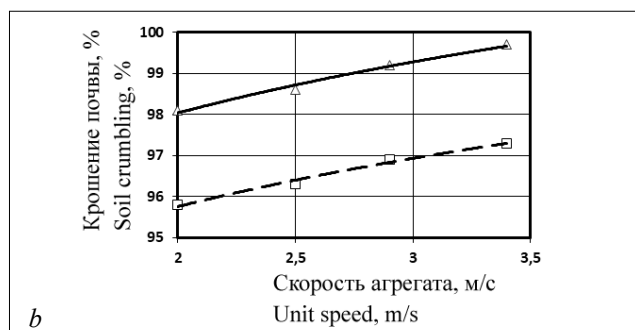
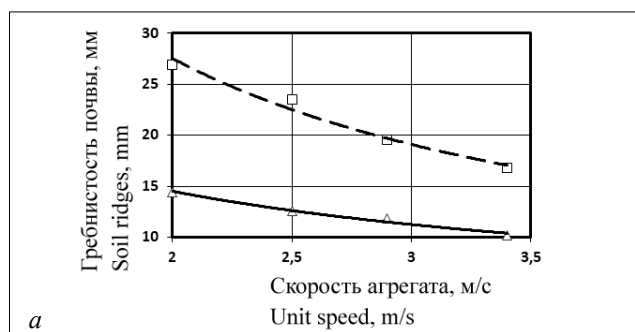


Рис. 4. Влияние скорости агрегата и передаточного числа цепной передачи U на качество обработки почвы: а – гребнистость; б – крошение

— — — — $U = 1,4$; — — — — $U = 2,0$

Fig. 4. The influence of the unit speed and the U chain transmission ratio on the soil cultivation quality: а – ridging; б – crumbling

— — — — $U = 1,4$; — — — — $U = 2,0$

в пределах – 4,0-4,8 см, длины – 6,6-8,5 см. По этой причине более интенсивное воздействие на почву возможно при повышении скорости дисков, а следовательно и машины, до 2,8-3,0 м/с [12].

Полевые испытания игольчатой бороны должны были выявить зависимость показателей качества ра-

боты как от скорости агрегата, так и от соотношения угловых скоростей при вращении батарей [13-15].

Как говорилось ранее, соотношение угловых скоростей при вращении батарей определяется передаточным числом цепной передачи U (рис. 4).

Агротехнические показатели (гребнистость и крошение почвы) заметно улучшаются при увеличении скорости агрегата и числа U . Допустимые показатели (гребнистость – менее 15 мм, крошение почвы – около 95%) были получены при $U = 2$ и скорости агрегата 3,0-3,5 м/с.

С увеличением скорости агрегата возрастает интенсивность воздействия игл на почву, что улучшает ее структуру. Такие закономерности изменения показателей характерны и для работы игольчатой бороны с выравнивающим брусом, когда разрушается еще больше комков.

Выводы

1. Крошение можно выполнять одновременно со вспашкой при использовании приспособления к плугам общего назначения.

2. К эффективным орудиям при обработке почвы под мелкосеменные культуры следует отнести игольчатые бороны бесприводного типа. Их использование позволяет выполнять операцию на повышенных скоростях – до 3,5 м/с.

3. Лабораторные и полевые опыты игольчатых рабочих органов показали максимальную эффективность их работы на повышенных скоростях. Оптимальные показатели (гребнистость – менее 15 мм и крошение почвы – около 95%) получены при значении передаточного числа цепной передачи $U = 2$ и скорости агрегата 3,0-3,5 м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coyle C., Creamer R.E., Schulte R.P.O., et al. A functional land management conceptual framework under soil drainage and land use scenarios. *Environmental Science & Policy*. 2016. Vol. 56. 39-48.
2. Spoor G. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use and Management*. 2006. Vol. 22. N2. 113-122.
3. Rainbow R., Derpsch R. Advances in no-till farming tech-

nologies and soil compaction management in rainfed farming systems. In book: Rainfed farming systems. Springer. 2011. 991-1014.

4. Стариков Х.Н., Шамин А.Е., Смирнов Р.А., Смирнов Н.А. Культуртехнические работы: Монография. Нижний Новгород: НГИЭУ. 2015. 368 с.

5. Шевченко В.А. Эффективность и нерешенные проблемы мелиорации в Нечерноземье // *Сельский механизатор*. 2020. N9. С. 2-4.

6. Абрамов И.Л., Сизов И.В. К вопросу о теоретических основах воздействия игл игольчатой бороны на почву // *АгроЭкоИнфо*. 2018. N3. С. 17-24.

7. Данатаров А. Агротехнические требования рыхлителя-кратователя // *Молодой ученый*. 2010. N8. С. 59-61.

8. Кондрашов В.А., Ковалев М.М., Перов Г.А. Исследование работы игольчатой бороны при движении по почве // *Агротехника и энергообеспечение*. 2018. N3. С. 107-110.

9. Хайлис Г.А., Ковалев М.М., Талах Л.А., Шевчук В.В. О прокалывании почвы иглами игольчатой бороны // *Достижения науки и техники в АПК*. 2014. N1. С. 60-62.

10. Ковалев М.М., Кондрашов В.А. Определение зависи-

мости движущей силы игольчатой бороны от сопротивления почвы проколу и числа одновременно заглубляющихся игл // *Техника и оборудование для села*. 2017. N6. С. 22-29.

11. Хайлис Г.А., Ковалев М.М., Толстущко Н.Н., Шевчук В.В. Анализ работы игл игольчатой бороны при их качении по почве // *Тракторы и сельхозмашины*. 2014. N5. С. 25-29.

12. Ковалев М.М., Прокофьев С.В., Фадеев В.Г., Кондрашов В.А. Теоретические основы воздействия игл игольчатой бороны на почву // *Техника и оборудование для села*. 2017. N1. С. 12-18.

13. Ковалев М.М., Перов Г.А., Сизов И.В., Кондрашов В.А. Исследование работы игольчатой бороны с радиально установленными иглами на дисках // *Техника и оборудование для села*. 2019. N10. С. 15-20.

14. Сизов И.В. Оптимизация параметров и режимов работы игольчатой бороны при возделывании льна-долгунца // *Агротехника и энергообеспечение*. 2018. N3. С. 84-86.

15. Сизов И.В., Кондрашов В.А. Анализ качества обработки почвы под лен-долгунец при использовании игольчатых борон // *Агротехника и энергообеспечение*. 2019. N2. С. 8-14.

REFERENCES

1. Coyle C., Creamer R.E., Schulte R.P.O., et al. A functional land management conceptual framework under soil drainage and land use scenarios. *Environmental Science & Policy*. 2016. Vol. 56. 39-48 (In English).

2. Spoor G. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use and Management*. 2006. Vol. 22. N2. 113-122 (In English).

3. Rainbow R., Derpsch R. Advances in no-till farming technologies and soil compaction management in rainfed farming systems. In book: Rainfed farming systems. Springer. 2011. 991-1014 (In English).

4. Starikov H.N., Shamin A.E., Smirnov R.A., Smirnov N.A. Kul'turtekhnicheskie raboty: Monografiya [Land clearance operations: Monography]. Nizhniy Novgorod: NGIEU. 2015. 368 (In Russian).

5. Shevchenko V.A. Effektivnost' i nereshennye problemy melioratsii v Nечернозем'e [Efficiency and unsolved problems of land reclamation in the non-black earth region]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2020. N9. 2-4 (In Russian).

6. Abramov I.L., Sizov I.V. K voprosu o teoreticheskikh osnovakh vozdeystviya igl igol'chatoy borony na pochvu [On the question of the theoretical foundations of the needle harrow impact on soil]. *AgroEkoInfo*. 2018. N3. 17-24 (In Russian).

7. Danatarov A. Agrotekhnicheskie trebovaniya rykhlyatelya-krotovatelya [Agrotechnical requirements for a ripper-mole plough]. *Molodoy uchenyy*. 2010. N8. 59-61 (In Russian).

8. Kondrashov V.A., Kovalev M.M., Perov G.A. Issledovanie raboty igol'chatoy borony pri dvizhenii po pochve [Investigation of the operation of a needle harrow when driving on soil]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2018. N3. 107-110 (In Russian).

9. Khaylis G.A., Kovalev M.M., Talakh L.A., Shevchuk V.V. O prokalyvaniy pochvy iglami igol'chatoy borony [About the soil puncturing with the needles of a needle harrow]. *Dostizheniya nauki i tekhniki v APK*. 2014. N1. 60-62 (In Russian).

10. Kovalev M.M., Kondrashov V.A. Opredelenie zavisimosti dvizhushchey sily igol'chatoy borony ot soprotivleniya pochvy prokolu i chisla odnovremenno zaglublyayushchikhsya igl [Dependence determination of soil spiker driving force on soil resistance to puncturing and the number of simultaneously penetrated needles]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2017. N6. 22-29 (In Russian).

11. Khaylis G.A., Kovalev M.M., Tolstushko N.N., Shevchuk V.V. Analiz raboty igl igol'chatoy borony pri ikh kachenii po pochve [Operation analysis of soil spiker needles during their rolling on soil]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2014. N5. 25-29 (In Russian).

12. Kovalev M.M., Prokof'ev S.V., Fadeev V.G., Kondrashov V.A. Teoreticheskie osnovy vozdeystviya igl igol'chatoy borony na pochvu [Theoretical foundations of the needle harrow impact on soil]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2017. N1. 12-18 (In Russian).

13. Kovalev M.M., Perov G.A., Sizov I.V., Kondrashov V.A. Issledovanie raboty igol'chatoy borony s radial'no ustanovlennymi iglami na diskakh [Study of the operation of a soil spiker with radially mounted spikes on the discs]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2019. N10. 15-20 (In Russian).

14. Sizov I.V. Optimizatsiya parametrov i rezhimov raboty igol'chatoy borony pri vozdel'yvaniy l'na-dolguntsa [Optimization of parameters and operating modes of the needle harrow at flax growing]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2018. N3. 84-86 (In Russian).

15. Sizov I.V., Kondrashov V.A. Analiz kachestva obrabotki

pochvy pod len-dolgunets pri ispol'zovanii igol'chatykh boron
[Analysis of the quality of soil processing under the fiber flax

when using needle harrows]. Agrotekhnika i energoobespechenie. 2019. N2. 8-14 (In Russian).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Сизов И.В. – научное руководство, формулирование направлений исследований, разработка методик экспериментальных исследований, формирование общих выводов и литературный анализ, визуализация.

Блинов Ф.Л. – анализ существующих технологических процессов.

Морозов П.А. – разработка методик экспериментальных исследований.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Sizov I.V – scientific guidance, formulation of research directions, development of experimental research methods, formation of general conclusions and literary analysis, visualization.

Blinov F.L – analysis of existing technological processes.

Morozov P.A – development of experimental research methods.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

20.05.2021

28.09.2021

Исследование динамических характеристик планетарного початкоотделяющего аппарата

Владимир Макичевич Погосян¹,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: pogosyn@gmail.com;

Михаил Евгеньевич Чаплыгин²,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: misha2728@yandex.ru

¹Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Предложили методический подход, применяемый для расчета планетарного початкоотделяющего аппарата, используемого в кукурузоуборочных комбайнах и специализированных жатках. Исследовали динамические характеристики работы планетарного початкоотделяющего аппарата. Выявили, что задачи исследования динамики машин весьма разнообразны из-за сложности происходящих в них динамических процессов. Особое значение приобретают теоретические методы исследования, позволяющие установить закономерности движения машинного агрегата еще в процессе проектирования. (*Цель исследования*) Предложить методику определения основных кинематических и динамических параметров работы вертикального початкоотделяющего аппарата. (*Материалы и методы*) Изучили методические подходы и применяемые математические аппараты для определения основных кинематических и динамических параметров работы вертикального початкоотделяющего аппарата, рассмотрели схему однобарабанного планетарного початкоотделяющего аппарата кукурузоуборочного комбайна и составили дифференциальное уравнение движения. (*Результаты и обсуждение*) После поэтапного математического расчета с применением предложенного методического подхода для исследования динамических характеристик, происходящих в процессе работы планетарного початкоотделяющего аппарата, получили уравнения: запуска аппарата на холостом ходу; запуска аппарата с нагрузкой; подачи стеблей после запуска аппарата; внезапного прекращения подачи. В ходе лабораторных исследований определили, что початкоотделяющий аппарат показал наибольший эффект при угловой скорости барабана в пределах 52,1-62,2 радиана в секунду. (*Выводы*) Рассмотрели четыре режима работы початкоотделяющего аппарата кукурузоуборочного комбайна и получили их уравнения. Построили схему вертикального початкоотделяющего аппарата. Предложили методический подход и алгоритм расчета основных динамических и кинематических показателей работы вертикального початкоотделяющего аппарата.

Ключевые слова: уборка кукурузы на зерно, отделение початков, кукурузоуборочный комбайн, планетарный початкоотделяющий аппарат, методика расчета параметров, динамические характеристики.

Для цитирования: Погосян В.М., Чаплыгин М.Е. Исследование динамических характеристик планетарного початкоотделяющего аппарата // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 41-47. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-41-47.

Research into the Dynamic Characteristics of the Planetary Cob-Separating Device

Vladimir M. Pogosyan¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: pogosyn@gmail.com;

Mikhail E. Chaplygin²,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: misha2728@yandex.ru

¹Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the article, the authors propose a methodological approach to calculating the planetary cob-separating device used in corn harvesters and specialized headers. The dynamic characteristics of the planetary cob-separating device operation were investigated. The authors found out that the machine dynamics research problems are rather diverse due to the complexity of the dynamic processes occurring in them. The theoretical research methods prove to be of particular importance, since they make it

possible to define the laws of machine unit motion, even at the stage of designing the planetary cob-separating device. (*Research purpose*) To propose a method for calculating the main kinematic and dynamic parameters of the vertical cob-separating device operation. (*Materials and methods*) The authors studied the methodological approaches and mathematical tools used to determine the main kinematic and dynamic parameters of the vertical cob-separating device operation; examined the scheme of a single-drum planetary cob-separating device in a corn harvester and built a differential equation of motion. (*Results and discussion*) After a step-by-step mathematical calculation with the use of the proposed methodological approach to studying the dynamic characteristics arising during the planetary cob-separating device operation, the following equations were obtained: starting the device at idle; starting the device with a load; feeding stems after starting the device; sudden interruption of the supply. When conducting the laboratory studies, it was determined that the cob-separating device showed the greatest effect at an angular speed of the drum within the range of 52.1-62.2 radians per second. (*Conclusions*) The authors considered four modes of the cob-separating device operation in a corn harvester and obtained the equations for them. The authors created a diagram of the vertical cob-separating device and proposed a methodological approach and an algorithm for calculating the main dynamic and kinematic indicators of its operation.

Keywords: harvesting corn for grain, cob separation, corn harvester, planetary cob separator, method of calculating parameters, dynamic characteristics

For citation: Pogosyan V.M., Chaplygin M.E. Issledovanie dinamicheskikh harakteristik planetarnogo pochatkootdelyayushchego apparata [Research into the dynamic characteristics of the planetary cob-separating device]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 41-47 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-41-47.

Одной из основных задач Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы, согласно Постановлению Правительства РФ от 25 августа 2017 г. № 996, предусмотрено создание и внедрение современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, в том числе и кукурузы на зерно или в початках [1]. Кукурузоуборочные комбайны работают по одной технологической схеме: отрывают початки, очищают их от оберток и подают в прицепленную сзади тележку [2-4]. Стебли срезаются, измельчаются и подаются в идущий рядом транспорт. Собранные и очищенные от оберток початки привозят на ток, перебирают, удаляя незрелые и пораженные болезнями, высушивают до влажности 16-18% и закладывают на хранение в сетчатые сапки или другие хранилища, предназначенные для длительного хранения, согласно требованиям ГОСТ 13634-90.

При уборке на зерно на комбайн навешивают специальную кукурузную приставку и переоборудуют специальным комплектом рабочих органов в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя для уборки кукурузы на зерно [5]. Технологическая схема работы предусматривает отрыв початков и подачу их в молотильный аппарат комбайна для обмола и одновременное измельчение пожнивных остатков находящимися под приставкой ножами [6, 7].

Анализ известных устройств, используемых в конструкциях кукурузоуборочных комбайнов, предназначенных для отделения початков от стеблей выявил существенные недостатки в выполнении технологического процесса: высокие энергозатраты и большую повреждаемость початков. При проектировании и исследовании конструкций таких комбайнов в качестве

рабочих органов все больше применяют планетарные аппараты [8, 9].

Цель исследования – определение основных кинематических и динамических параметров работы вертикального початкоотделяющего аппарата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Рассмотрим схему однобарабанного планетарного початкоотделяющего аппарата кукурузоуборочного комбайна (рис. 1) [10]. Он состоит из планетарного барабана δ , вальцов b , гладкого барабана d , стеблепротягивающих вальцов e_1, e_2 , стеблеподающих цепей f_1, f_2 , Источника энергии – двигателя. Передаточный механизм состоит из колес $1, 2, 3, 4, 5, 6$, солнечного колеса S , сателлитов и цепочных контуров I, II, III (патент №2690794 С1, 2019).

Обозначим как $\tau_\delta, \tau_s, \tau_c, \omega_\delta, \omega_s, \omega_c$ радиусы и угловые скорости барабана, солнечной шестерни и сателлитного колеса; O_s, O_δ, O_c – центры солнечной шестерни, барабана и сателлита. Центры O_s и O_δ совпадают. $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ – радиусы и угловые скорости колес $1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Угловые скорости $\omega_\delta, \omega_s, \omega_c$ можем выразить через угловую скорость вала двигателя [11]:

$$\begin{aligned}\omega_\delta &= \omega_1 \frac{\tau_1}{\tau_2} = i_{21} \omega_1; \\ \omega_s &= \omega_1 \frac{\tau_3}{\tau_4} = i_{43} \omega_1; \\ \omega_d \omega_\delta \frac{\tau_5}{\tau_6} &= i_{21} i_{65} \omega_1,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6$ – радиусы колес $1, 2, 3, 4, 5, 6$, м; ω_1 – угловая скорость первого (1) колеса, рад/с; i_{21}, i_{65}, i_{43} – передаточные числа колес.

Сателлиты, кроме относительного вращения вокруг своих осей, имеют еще и переносное вращение

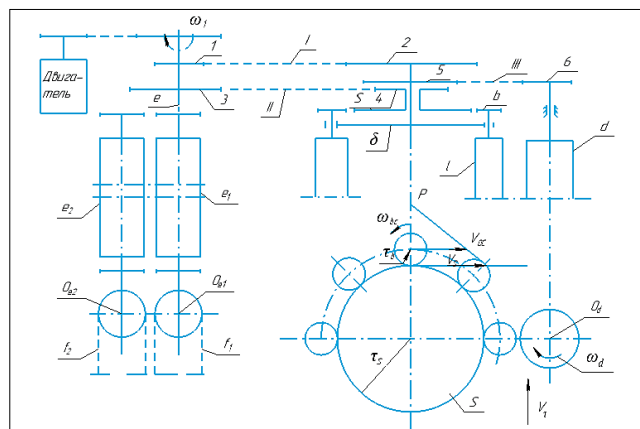


Рис. 1. Схема вертикального початкоотделяющего аппарата: 1-6 – колеса передаточного механизма; δ – планетарный барабан; b – вальцы; S – солнечное колесо; τ_δ, τ_s, τ_c – радиусы барабана; ω_δ, ω_s, ω_c – угловые скорости барабана; I, II, III – сателлиты и цепочные контуры; e₁, e₂ – стеблепротягивающие вальцы; f₁, f₂ – стеблеподающие цепи; O_s, O_δ, O_c – центры солнечной шестерни, барабана и сателлита; d – гладкий барабан

Fig. 1. Diagram of the vertical cob-separating device: 1-6 – gear wheels; δ – planetary drum; b – rollers; S – sun wheel; τ_δ, τ_s, τ_c – drum radii; ω_δ, ω_s, ω_c – drum angular velocities; I, II, III – satellites and chain loops; e₁, e₂ – stem-pulling rollers; f₁, f₂ – stalk feeding chains; O_s, O_δ, O_c – sun gear centers, drum and satellite; d – smooth drum

вместе с осями. Учитывая это, запишем выражение для окружной скорости точки контакты колес S и C:

$$V_c = V_s - V_{OS},$$

где V_c и V_s – окружные скорости точек обода сателлита и солнечной шестерни, м/с; V_{OS} – скорость центра сателлита, м/с.

Тогда:

$$\tau_c \omega_c = \tau_s \omega_s - (\tau_c + \tau_s) \omega_\delta,$$

где τ_δ, τ_s, τ_c – радиусы барабанов, м;

ω_δ, ω_s, ω_c – угловые скорости барабанов, рад/с.

Отсюда:

$$\omega_c = \frac{\tau_s}{\tau_c} \omega_s - \left(1 + \frac{\tau_s}{\tau_c}\right) \omega_\delta.$$

После несложных преобразований получаем выражение для угловой скорости сателлита:

$$\omega_c = [i_{CS} i_{43} - i_{21} (1 + i_{CS})] \omega_1 \quad (2)$$

где ω₁ – угловая скорость первого колеса (1), рад/с;

i_{CS}, i₄₃, i₂₁ – передаточные числа колес.

Кинетическую энергию аппарата, Дж, определим следующим образом:

$$T = \frac{1}{2} \left[(J_{e1} + J_{e2}) \omega_1^2 + J_d \omega_d^2 + J_s \omega_s^2 + J_\delta \omega_\delta^2 + n J_c \omega_c^2 + n m_b (\tau_c + \tau_s)^2 \omega_\delta^2 + (m_{f1} + m_{f2}) \tau_o^2 \omega_1^2 + m_{I1} \tau_1^2 \omega_1^2 + m_{II} \tau_2^2 \omega_1^2 + m_{III} \tau_3^2 \omega_1^2 \right] \quad (3)$$

где j_{e1}, j_{e2}, j_d, j_s, j_c – моменты инерции относительно

своих осей стеблепротягивающих вальцов e₁ и e₂, гладкого барабана d, барабана δ, вальца b с сателлитным колесом C соответственно, кг·м²;

n – количество вальцов, шт.;

m_b – масса вальца совместно с сателлитным колесом, кг;

m_{f1} и m_{f2} – массы правой f₁ и левой f₂ стеблеподающих цепей, кг;

τ_o – радиус начальной окружности привода звездочки цепей, м;

m_I, m_{II} и m_{III} – массы приводных цепей I, II, III соответственно, кг.

Подставив выражения (1) и (2) в (3), после преобразования получим:

$$T = \frac{1}{2} J_\varepsilon \omega_1^2,$$

где J_ε – приведенный к валу 1 момент инерции механизма, кг·м²:

$$J_\varepsilon = J_{e1} + J_{e2} + J_d (i_{21} i_{65})^2 + J_s i_{43}^2 + J_\delta i_{21}^2 + n J_b [i_{CS} i_{43} - i_{21} (1 + i_{CS})]^2 + n m_b^2 (\tau_c + \tau_s) i_{21}^2 + m_{f1} \tau_1^2 + m_{II} \tau_2^2 + m_{III} \tau_3^2 i_{21}^2 + (m_{f1} + m_{f2}) \tau_o^2. \quad (4)$$

Чтобы определить обобщенную силу системы, запишем сумму работ сил, действующих на рассматриваемую систему при повороте вала двигателя на элементарный угол δ_А:

$$\delta_A = [M_1 \omega_1 - (M_e^c + M_e^x) \omega_1 - (M_b^c + M_b^x) \omega_c - (M_\delta^c + M_\delta^x) \omega_\delta - (M_d^c + M_d^x) \omega_d] \delta t,$$

где δ_А – элементарный угол, град;

M₁, M_e^c, M_e^x, M_b^c, M_b^x, M_d^c, M_d^x – моменты сил вальцов, Н·м.

Подставив в выражение элементарной работы сил значения угловых скоростей ω_c, ω_δ, ω_d из выражения (1) и (2) и имея в виду, что δφ = ω₁δt и Q = ΣδA/δφ, получим следующую формулу для обобщенной силы, Н:

$$Q = M_\varepsilon = M_1 - M_e^c - M_b^c [i_{CS} i_{43} - (1 + i_{CS}) i_{21}] - M_\delta^c i_{21} - M_d^c i_{21} i_{65} - M_e^x - M_b^x [i_{CS} i_{43} - (1 + i_{CS}) i_{21}] - M_\delta^x i_{21} - M_d^x i_{21} i_{65}. \quad (5)$$

Рассмотрим отдельно слагаемые, входящие в правую часть (5). Аналитическое выражение крутящего момента двигателя от угловой скорости можем записать линейной функцией:

$$M_1 = M_1^H \frac{\omega_x - \omega_1}{\omega_x - \omega^H}, \text{ или}$$

$$M_1 = M_1^H \frac{1}{\delta_q} - M_1^H \frac{1}{\delta_q} \frac{\omega_1}{\omega_1^x}, \quad (6)$$

где δ_q = (ω₁^x - ω₁^H)/ω₁^x – степень неравномерности вращения вала (потери угловых скоростей до и после обмолота).

Момент сил протягивания стеблей вальцами e (рис. 1) можем определить следующим образом:

$$M_e^c = 2mT_e\tau_e, \quad (7)$$

где T_e – сила трения вальцов по стеблям, Н;

τ_e – радиус вальца e , м;

m – количество стеблей, находящихся в рабочей щели, шт.

Момент сил прокатывания стеблей планетарными вальцами состоит из двух слагаемых:

$$M_b^c = M_{b1}^c + M_{b2}^c,$$

где M_{b1}^c – момент сил, сообщающих скорость стеблевой массе, Н·м;

M_{b2}^c – момент сил, деформирующих стебли при прокатке последних вальцами (патент №2197813 С2, 2003), Н·м:

$$M_{b1}^c = \frac{q^1}{q} \tau_c^2 \omega_b = \beta_c (i_{CS} i_{43} - (1 + i_{CS}) i_{21}) \omega; \quad (8)$$

$$M_{b2}^c = mF_{тр} \tau_c = mfn\tau_c; \quad (9)$$

$$\beta_c = \frac{q^1}{q} \tau_c^2,$$

где q^1 – подача стеблей к аппарату, кг/с;

q – масса одного початка, кг.

$F_{тр}$ – сила трения проката стеблей, Н;

N – сила давления вальца планетарного аппарата на стебель, Н.

Момент сил протягивания стеблей гладким барабаном равен:

$$M_d^c = M_{d1}^c + M_{d2}^c; \quad (10)$$

$$M_{d1}^c = \frac{q^1}{q} \tau_d^2 \omega_d = \beta_d i_{21} i_{65} \omega;$$

$$M_d = mT_d \tau_d. \quad (11)$$

Момент сил отбрасывания початков планетарным барабаном составляет:

$$M_\delta^c = \mu M \frac{q^1}{q} \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)^2 \tau_\delta^2 \omega_\delta, \quad (12)$$

где μ – количество початков на стеблях, шт.;

$\lambda = (\tau_\delta \omega_\delta) / V_C = 0,5 \dots 0,6$, (величина безразмерная);

V_C – скорость движения стеблей в рабочей щели,

$V_C = \tau_0 \omega_1$, м/с.

Имея выражения кинетической энергии и обобщенной силы системы, пользуясь методом Лагранжа, составим дифференциальное уравнение движения системы:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_e, \quad (13)$$

где J_e и M_e определяются выражениями (4) и (5).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Рассмотрим режимы работы кукурузоуборочного комбайна.

1. Запуск аппарата на холостом ходу, без нагрузки. В этом случае в выражении обобщенной силы мо-

мент сил сопротивления равен нулю и дифференциальное уравнение движения имеет вид [12, 13]:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{хх}. \quad (14)$$

Начальная угловая скорость при $t = 0$ и $\omega = 0$ также равна нулю.

2. Запуск аппарата с нагрузкой. Для этого режима имеем уравнение:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{хх} - M_C. \quad (15)$$

Начальное условие: $t = 0, \omega = 0$.

3. Подача стеблей после запуска аппарата. В этом случае начальная угловая скорость равна угловой скорости холостого хода. Имеем дифференциальное уравнение:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{хх} - M_C. \quad (16)$$

Начальное условие: $t = 0, \omega = 0$.

4. Внезапное прекращение подачи стеблей. В этом случае момент сил сопротивления равен нулю, а начальная угловая скорость равна угловой скорости установившегося движения:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{хх}. \quad (17)$$

Начальное условие: $t = 0, \omega = 0$.

Для всех режимов работы аппарата в правых частях дифференциальных уравнений движения можем выделить слагаемые, содержащие угловую скорость и свободные члены. Тогда выражения (14)-(17) будут приведены к уравнению вида:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = b_k \omega + B_k, \quad (18)$$

где B_k и b_k имеют различные числовые значения для различных режимов работы аппарата.

Разделив все члены уравнения (18) на J_e и обозначив $\frac{b_k}{J_e} = a_k, \frac{B_k}{J_e} = A_k$, получим:

$$\frac{d\omega}{dt} = a_k \omega + A_k. \quad (19)$$

Запишем общий интеграл уравнения (19):

$$\frac{1}{a_k} \ln |a_k \omega + A_k| = t + C_K, \quad (20)$$

где C_K – произвольные постоянные, имеющие безразмерные величины.

Для режимов запуска аппарата вхолостую и с нагрузкой имеем нулевые начальные условия. Используя их, определим произвольные постоянные:

$$C_K = \frac{1}{a_k} \ln |A_k|. \quad (21)$$

Из выражений (20) и (21) получаем так называемые скоростные характеристики, то есть зависимости угловой скорости от времени:

$$\omega = \frac{1}{a_k A_k} e^{a_k t} - \frac{A_k}{a_k}. \quad (22)$$

Аналогично получаем скоростные характеристики

ки для III и IV режимов:

$$\omega = \frac{1}{a_k} \left[(a_k \omega^x + A) e^{a_k t} - A \right]; \quad (23)$$

Выбор оптимального приведенного момента инерции – важная задача динамических расчетов, так как распределение масс влияет на развитие динамических процессов. Коэффициент неравномерности хода машин равен:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{ср}}}. \quad (24)$$

Имея скоростную характеристику рассматриваемого режима, можно найти $\omega_{\max}$, $\omega_{\min}$ и $\omega_{\text{ср}}$. Подставив найденные выражения в (24) и решив полученное выражение относительно J_e , получим формулу для определения величин постоянных маховых масс при заданном коэффициенте неравномерности хода.

В предыдущих рассуждениях мы считали звенья рассматриваемой системы абсолютно жесткими. В действительности карданный вал обладает упругими свойствами, и при передаче крутящего момента в нем, кроме основного движения, возникает и колебательное. Образуются дополнительные динамические нагрузки, величина которых может быть значительна, особенно для режима разгона [14, 15].

С учетом жесткости передачи рассматриваемую систему можно заменить двухмассовой системой (рис. 2)

Запишем дифференциальные уравнения движения для системы:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 + C(\varphi_1 - \varphi_2) &= 0; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - C(\varphi_1 - \varphi_2) &= M, \end{aligned} \quad (25)$$

где $M = M_2 - M_1 - b$.

Полагая, что $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi$, получим:

$$\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}; \quad \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2 = \ddot{\varphi}.$$

Система (25) принимает вид:

$$\begin{aligned} J_1 (\ddot{\varphi} + \varphi_2) + C\varphi &= 0; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - C\varphi &= b. \end{aligned} \quad (26)$$

Из второго уравнения системы (26) имеем:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{C} (J_2 \ddot{\varphi}_2 - b\varphi_2 - B), \\ \text{поэтому} \\ \dot{\varphi} &= \frac{1}{C} (J_2 \ddot{\varphi}_2 - b\dot{\varphi}_2); \quad \ddot{\varphi} = \frac{1}{C} (J_2 \ddot{\varphi}_2 - b\ddot{\varphi}_2). \end{aligned} \quad (27)$$

Пусть $\tau_1 = 0$, τ_2 , τ_3 , τ_4 – корни характеристического уравнения:

$$\frac{J_1 J_2}{C} \tau_4 - \frac{b J_1}{C} \tau_3 + (J_1 + J_2) \tau_2 - b \tau = 0.$$

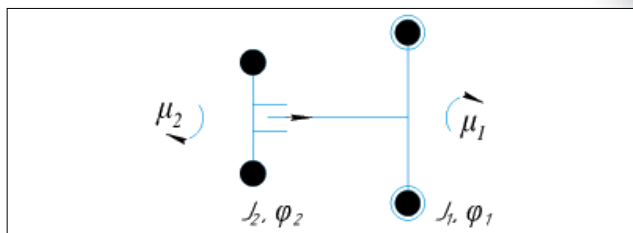


Рис. 2. Расчетная схема двухмассовой системы: J_1 – момент инерции системы роторов, приведенный к валу двигателя; J_2 – момент инерции ротора двигателя; φ_1 , φ_2 – текущие угловые отклонения; μ_1 – приведенный момент сопротивления; μ_2 – крутящий момент

Fig. 2. Design diagram of a two-mass system: J_1 – inertia moment of the rotor system, reduced to the motor shaft; J_2 – inertia moment of the rotor system; φ_1 , φ_2 – current angular deviations; μ_1 – reduced resistance moment; μ_2 – torque

Тогда общее решение выражения (27) имеет вид:

$$\varphi_2 = \frac{-B}{b} t + C_1 + C_2 e^{\tau_2 t} + C_3 e^{\tau_3 t} + C_4 e^{\tau_4 t}. \quad (28)$$

Определив $\dot{\varphi}_2$ и $\ddot{\varphi}_2$, из второго уравнения системы (26), находим:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{B}{b} t + C_1 + \left(C_2 - \frac{b C_2 \tau_2}{C} + \frac{J_2 C_2 \tau_2^2}{C} \right) e^{\tau_2 t} + \\ &+ \left(C_3 - \frac{b C_3 \tau_3}{C} + \frac{J_3 C_3 \tau_3^2}{C} \right) e^{\tau_3 t} + \\ &+ \left(C_4 - \frac{b C_4 \tau_4}{C} + \frac{J_4 C_4 \tau_4^2}{C} \right) e^{\tau_4 t}. \end{aligned} \quad (29)$$

Постоянные интегрирования можно определить из начальных условий движения.

Упругий момент, возникающий в передаче, равен:

$$M = C(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где φ_1 и φ_2 определяются выражениями (28) и (29).

Лабораторные исследования показали, что початкоотделяющий аппарат проявил наибольший эффект при угловой скорости барабана в пределах 52,1–62,2 рад/с.

Выводы. Предлагаемую методику можно использовать при динамических расчетах планетарных рабочих органов сельскохозяйственных машин. В результате теоретических исследований на кукурузоуборочном комбайне получили дифференциальные уравнения планетарного початкоотделяющего аппарата: запуска аппарата на холостом ходу

$$J_e(d\omega/dt) = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}};$$

запуска аппарата с нагрузкой

$$J_e(d\omega/dt) = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}} - M_C;$$

подачи стеблей после запуска аппарата

$$J_e(d\omega/dt) = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}} - M_C;$$

внезапного прекращения подачи

$$J_e(d\omega/dt) = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдова С.А., Вахания В.И., Курасов В.С. Анализ состояния и перспективные направления развития селекции и семеноводства кукурузы. М.: Росинформагротех. 2019. 92 с.
2. Трубилин Е.И., Сапрыкин В.Ю., Труфляк Е.В. Однорядный кукурузоуборочный комбайн для уборки початков сахарной кукурузы // *Техника и оборудование для села*. 2013. N8. С. 26-28.
3. Труфляк Е.В., Трубилин Е.И., Маслов Г.Г. Конструктивно-технологические усовершенствования кукурузоуборочного агрегата // *Тракторы и сельхозмашины*. 2011. N1. С. 8-10.
4. Труфляк Е.В. Приспособление к початкоотделяющему аппарату для уборки кукурузы // *Техника в сельском хозяйстве*. 2010. N4. С. 36-37.
5. Чаплыгин М.Е. Уборка кукурузы на зерно различными жатками // *Сельский механизатор*. 2015. N12. С. 8-9.
6. Чаплыгин М.Е., Белик М.А. Качество измельчения и распределения листостебельной массы при уборке кукурузы на зерно // *Техника и оборудование для села*. 2014. N2. С. 27-29.
7. Давыдова С.А., Чаплыгин М.Е. Техническая оснащённость селекции и семеноводства кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 66-74.
8. Труфляк Е.В., Трубилин Е.И., Маслов Г.Г. Модернизация кукурузоуборочного агрегата // *Техника и оборудование для села*. 2010. N10. С. 17-19.
9. Серга Г.В., Серга М.Г., Тульчий В.И. Разработка и исследование конструкции кукурузоуборочного комбайна со стреловидной рамой // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2016. N121. С. 322-335.
10. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Sharaya O. Substantiation of deck parameters of rotary threshing device. *Engineering for Rural Development*. 2019. N18. 481-486.
11. Курасов В.В., Погосян В.В., Плешаков В.Н., Самурганов Е.Е. Исследование движения кукурузного початка в вальцово-молотилке // *Труды Кубанского Государственного Аграрного Университета*. 2017. N69. С. 315 – 318.
12. Astaf V.L.Y. Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalskiy I.A. Strategy of technical support of grain harvesting operations in republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 46-51.
13. Amankulov Y., Petunina I., Lobanova N. Three-dimensional setup of composite materials as a way to achieve high mechanical properties. *Periodico Tche Quimica*. 2020. Vol. 17. N36. 431-456.
14. Петунина И.А., Короткин А.В., Курасов В.С., Плешаков В.Н. Расчет параметров установки для очистки початков семенной кукурузы // *Сельский механизатор*. 2018. N10. С. 10-11.
15. Byshov D.N., Petunina I.A., Kotelevskaya E.A., Borychev S.N., Rembalovich G.K. Substantiation of technical and operational characteristics of the device to sort corn cobs. BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019). 2020. Vol. 17. 00094.

REFERENCES

1. Davydova S.A., Vakhaniya V.I., Kurasov V.S. Analiz sostoyaniya i perspektivnye napravleniya razvitiya selektsii i semenovodstva kukuruzy [Analysis of the state and prospective directions of maize selection and seed production development]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2019. 92 (In Russian).
2. Trubilin E.I., Saprykin V.Yu., Truflyak E.V. Odnoryadnyy kukuruzoborochnyy kombayn dlya uborki pochatkov sakhar-noy kukuruzy [Single-row corn harvester for harvesting sweet corn cobs]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2013. N8. 26-28 (In Russian).
3. Truflyak E.V., Trubilin E.I., Maslov G.G. Konstruktsionno-tekhnologicheskie usovershenstvovaniya kukuruzoboroch-nogo agregata [Structural and technological improvements of the corn harvester]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2011. N1. 8-10 (In Russian).
4. Truflyak E.V. Prispособlenie k pochatkootdelyayushchemu apparatu dlya uborki kukuruzy [Cob separating device for corn harvesting]. *Tekhnika v sel'skom hozyaystve*. 2010. N4. 36-37 (In Russian).
5. Chaplygin M.E. Uborka kukuruzy na zerno razlichnymi zhatkami [Operating-technological indexes of combines Don-1500B on cleaning up of corn on grain]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2015. N12. 8-9 (In Russian).
6. Chaplygin M.E., Belik M.A. Kachestvo izmel'cheniya i raspredeleniya listostebel'noy massy pri uborke kukuruzy na zerno [Shredding and distribution quality of leafy mass when harvesting corn for grain]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2014. N2. 27-29 (In Russian).
7. Davydova S.A., Chaplygin M.E. Tekhnicheskaya osnashchennost' selektsii i semenovodstva kukuruzy [Technical equipment of corn breeding and seed production]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N3. 66-74 (In Russian).
8. Truflyak E.V., Trubilin E.I., Maslov G.G. Modernizatsiya kukuruzoboroch-nogo agregata [Corn harvesting unit modernization]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2010. N10. 17-19 (In Russian).
9. Serga G.V., Serga M.G., Tul'chiy V.I. Razrabotka i issledovanie konstruktsii kukuruzoboroch-nogo kombayna so strelovidnoy ramoy [Development and research of a corn harvester with sweep frame design]. *Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. N121. 322-335 (In Russian).
10. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Sharaya O. Substantiation of deck parameters of rotary threshing device. *Engineering for Rural Development*. 2019. N18. 481-486 (In English).

11. Kurasov V.V., Pogosyan V.V., Pleshakov V.N., Samurganov E.E. Issledovanie dvizheniya kukuruznogo pochatka v val'tsovoy molotilke [Research of corn-cob motion in roller thresher]. *Trudy Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2017. N69. 315-318 (In Russian).

12. Astaf V.L.Y., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalskiy I.A. Strategy of technical support of grain harvesting operations in republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 46-51 (In English).

13. Amankulov Y., Petunina I., Lobanova N. Three-dimensional setup of composite materials as a way to achieve high mechanical properties. *Periodico Tch Quimica*. 2020. Vol. 17. N36. 431-456 (In English).

14. Petunina I.A., Korotkin A.V., Kurasov V.S., Pleshakov V.N. Raschet parametrov ustanovki dlya ochistki pochatkov semennoy kukuruzy [Calculation of parameters of the installation for cleaning the corn COBS]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2018. N10. 10-11 (In Russian).

15. Byshov D.N., Petunina I.A., Kotelevskaya E.A., Borychev S.N., Rembalovich G.K. Substantiation of technical and operational characteristics of the device to sort corn cobs. *BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019)*. 2020. Vol. 17. 00094 (In English).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Погосян В.М. – научное руководство, формулирование основных целей и задач исследования, разработка теоретических предпосылок, доработка текста, формирование общих выводов.

Чаплыгин М.Е. – анализ тенденций развития существующих кукурузоуборочных комбайнов, формирование частных выводов, обработка результатов исследований, визуализация, редактирование рукописи статьи и литературный анализ.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Pogosyan V.M. – scientific leadership, formulation of the research main goals and objectives, development of theoretical premises, revision of the text, formation of general conclusions.

Chaplygin M.E. – analysis of existing corn harvester development trends, formulation of private conclusions, processing of the research results, visualization, the editing of the article manuscript and literary analysis.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

06.07.2021
27.08.2021

Электропривод транспортного средства сельскохозяйственного назначения

Антон Павлович Споров,
магистрант, e-mail: antonspo@yandex.ru;
Дмитрий Юрьевич Писарев,
магистрант;

Александр Сергеевич Парахнич,
аспирант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали актуальность создания сельскохозяйственных машин с применением электропривода. (*Цель исследования*) Разработать экспериментальный образец транспортного средства с использованием электрической принципиальной схемы управления зарядом и электроприводом. (*Материалы и методы*) В качестве экспериментального образца транспортного средства с электроприводом выбрали автомобиль «ВАЗ 111 Ока», так как он имеет небольшую массу – 645 килограммов, простую конструкцию и невысокую стоимость. Рассчитали механические характеристики электродвигателя и выбрали частотный преобразователь для управления электроприводом. Провели испытания на лабораторном стенде. (*Результаты и обсуждение*) Установили аккумуляторные батареи для питания электропривода и разработали электрическую принципиальную систему заряда от стандартной сети переменного напряжения 220 вольт. Получили графики разряда источника питания, состоящего из 40 аккумуляторных батарей. (*Выводы*) Разработали электрическую принципиальную схему управления зарядом и электроприводом и реализовали ее на экспериментальном образце транспортного средства. Определили, что с током нагрузки 1 ампер аккумуляторные батареи разряжаются в течение 104 минут, с током 2 ампера – 83 минуты, 3 ампера – 65 минут, а с током 5 ампер – 50 минут, при постоянной работе электродвигателя, что достаточно для езды по ферме. Графически изобразили зависимости уровня доступной емкости от напряжения, а также разряда аккумуляторных батарей от времени при различных токах нагрузки. Провели два экспериментальных исследования по заряду аккумуляторных батарей от переменного напряжения с током 2 и 3 ампера: в первом случае время зарядки составило 350 минут, во втором – 310 минут. Выяснили, что при использовании разработанной схемы аккумуляторные батареи заряжаются равномерно.

Ключевые слова: электромобиль, электропривод, транспортное средство с электроприводом, энергетическое оборудование, асинхронный электродвигатель, аккумулятор.

■ **Для цитирования:** Споров А.П., Писарев Д.Ю., Парахнич А.С. Электропривод транспортного средства сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 48-54. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54.

Electric Drive for an Agricultural Vehicle

Anton P. Sporov,
master's student, e-mail: antonspo@yandex.ru;
Dmitriy Yu. Pisarev,
master's student;

Aleksandr S. Parakhnich,
Ph.D. student (Eng.)

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors showed the relevance of creating agricultural machines using an electric drive. (*Research purpose*) The research objective is to develop an experimental prototype vehicle using an electrical schematic diagram of charge and electric drive control. (*Materials and methods*) The VAZ 111 Oka car was chosen as an experimental vehicle model with an electric drive, since it has a light weight of 645 kilograms, a simple design and a low cost. Mechanical characteristics of the electric motor were calculated and a frequency converter was chosen to control the electric drive. Laboratory bench tests were conducted. (*Results and discussion*) The authors installed storage batteries to power the electric drive, developed an electrical circuit schematics getting charged from a 220 volt alternating voltage network, and received graphs for the discharge of a 40-storage-battery power supply. (*Conclusions*) An electrical schematic diagram of charge and electric drive control was developed and implemented on an

experimental vehicle model. It was determined that at the electric motor continuous operation with the load current of 1 ampere, the batteries get discharged within 104 minutes; with the current load of 2 amperes, they get discharged within 83 minutes; with 3 amperes – within 65 minutes, and with 5 amperes – within 50 minutes, which is enough to drive around the farm. The authors graphically depicted the dependence of the available capacity level on the voltage, as well as the batteries' discharge on the time at various load currents. The authors carried out two experimental studies on storage batteries' charging from alternating voltage with the current of 2 and 3 amperes: in the first case, the charging time was 350 minutes, in the second – 310 minutes. It was found out that when using the developed scheme, the batteries are charged evenly.

Keywords: electromobile, electric drive, electric vehicle, power equipment, asynchronous electric motor, batteries.

For citation: Sporov A.P., Pisarev D.Yu., Parakhnich A.S. Elektroprivod transportnogo sredstva sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Electric drive for an agricultural vehicle]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 48-54 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54.

Для перемещения по территории агропромышленного комплекса или фермерского хозяйства используют транспортные средства (ТС), оборудованные двигателем внутреннего сгорания (ДВС) на дизельном или бензиновом топливе [1]. ТС применяют для транспортировки грузов, перемещения персонала, а также выполнения технологических задач. Современный бензиновый и дизельный автотранспорт сильно загрязняет окружающую среду выхлопными газами с вредными примесями, а производимый шум плохо сказывается на состоянии животных [2]. Предлагается использовать ТС сельскохозяйственного назначения с электроприводом и возможностью подзарядки от сети переменного напряжения [3].

Такое ТС не загрязняет окружающую среду, что особенно важно в закрытых помещениях животноводческих комплексов. По сравнению с аналогом, где установлен ДВС, оно имеет сравнительно высокую надежность, обеспечивающую двигателю более длительный срок эксплуатации. Зарядка аккумуляторов осуществляется от стандартной электрической сети, практически от любой розетки напряжением 220 В, а также от солнечной электростанции, что позволяет значительно снизить затраты [4]. Кроме того, есть возможность экономить на ночном тарифе за потребленную электроэнергию централизованной электросети. Из недостатков следует отметить высокую стоимость аккумуляторных батарей, имеющих большой вес и объем, их длительную зарядку и утилизацию по окончании срока эксплуатации [5].

Разумеется, невозможно мгновенно весь мировой автопарк перевести на электротягу, поэтому на данный момент большую популярность приобрели так называемые «гибриды» – автомобили, приводимые в движение двумя источниками тяги: классическим ДВС и электродвигателем. Самым весомым недостатком, как у гибридов, так и у электромобилей, остаются громоздкие и тяжелые аккумуляторные батареи и небольшая дальность пробега [6].

Вследствие электрификации части автомобильного транспорта, использующего бензиновые двигатели, нагрузка на энергодобывающие объекты и электрические сети увеличивается приблизительно на 5%.

Фактически современные электромобили обладают большими запасами мощности и воплощают в себе множество технологических инноваций [7]. Массовый перевод ТС с бензиновым двигателем на электрическую тягу вполне достижим в ближайшие годы. И все же этот процесс следует осуществлять поэтапно: по мере увеличения объема выработки электроэнергии (в частности, путем использования альтернативных источников энергии) или экономии ее в ходе внедрения энергоэффективных технологий в соответствии с «Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года» [8].

Фермеру необходимо лично вести контроль за качеством продукции, соблюдением технологических процессов, техники безопасности и пожарной безопасности на производстве. За ошибки и неточности ему приходится расплачиваться за счет собственных средств [9].

Транспортный и сельскохозяйственный секторы экономики характеризуются повышенной энергоемкостью [10]. Для транспортировки персонала, кормов или сельскохозяйственного инвентаря по территории закрытых помещений животноводческих комплексов, а также по территории фермерского хозяйства более экологичны и менее энергозатратны ТС с электроприводом.

Цель исследования – разработать экспериментальный образец транспортного средства с использованием электрической принципиальной схемы управления зарядом и электроприводом.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований автомобиль «ВАЗ 1111 Ока» переоборудовали в ТС с электроприводом (рис. 1).

В соответствии с расчетами выбрали асинхронный двигатель АИР 100 S2 [11]:

номинальная мощность, кВт	4,0;
номинальный ток, А	8,12;
номинальная частота вращения, об/мин	2880;
$\cos \varphi_n$	0,88;
номинальный КПД	0,88;
кратность пускового момента	2,0;
кратность минимального момента	1,6;
кратность критического момента	2,2;

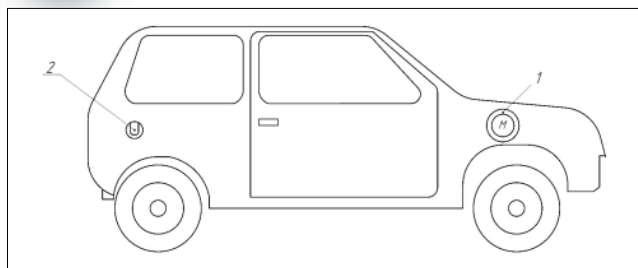


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального транспортного средства с электроприводом: 1 – асинхронный двигатель АИР 100 S2; 2 – однофазная розетка для подключения коннектора для зарядки транспортного средства

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental vehicle with an electric drive: 1 – asynchronous motor AIR100S2; 2 – single-phase socket for the vehicle charging connector

масса электродвигателя, кг 21,6.

Четырехтактный бензиновый карбюраторный двигатель для ВАЗ III имеет следующие характеристики:

номинальная мощность, кВт 21,5;
номинальная частота вращения, об/мин 5600;
номинальный КПД 0,2;
масса двигателя, кг 63,5.

При проектировании электрического привода электродвигатель выбирали таким образом, чтобы его механические характеристики соответствовали показателям штатного двигателя, отражая взаимосвязь переменных параметров в установившемся режиме.

Для оценки основных свойств электродвигателя АИР 100 S2 построили механическую характеристику по пяти характерным точкам.

Точка № 1:

$$\omega = \omega_0 = \frac{2 \pi f}{P} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

f – частота тока, Гц;

P – число пар полюсов;

момент нулевой $M = 0$, Н·м.

Точка № 2:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 2880}{30} = 301,44, \quad (2)$$

где ω_n – угловая скорость номинальная, рад/с;

n_n – обороты двигателя номинальные, об/мин;

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{4000}{301,44} = 13,27 \text{ Н·м}, \quad (3)$$

где M_n – момент номинальный, Н·м;

P_n – мощность номинальная, кВт.

Точка № 3:

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0,04, \quad (4)$$

S_n – скольжение номинальное, %;

n_0 – скорость двигателя синхронная, об/мин;

n_n – скорость вращения ротора, об/мин.

Далее:

$$S_k = S_n \left(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right) = 0,04 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,166, \quad (5)$$

где S_k – скольжение критическое, %;

μ_k – кратность критического момента;

$$\omega_k = \omega_0 (1 - S_k) = 314(1 - 0,166) = 261,87 \text{ рад/с}, \quad (6)$$

где ω_k – критическая скорость, рад/с;

ω_0 – синхронная скорость, рад/с;

$$M_k = \mu_k \cdot M_n = 2,2 \cdot 13,27 = 29,19 \text{ Н·м}, \quad (7)$$

где M_k – момент критический, Н·м;

μ_k – кратность критического момента.

Точка № 4:

$$\omega = \omega_{\min} = \frac{\omega_0}{7} = \frac{314}{7} = 44,85, \quad (8)$$

где $\omega_{\min}$ – угловая скорость минимальная, рад/с;

ω_0 – угловая скорость синхронная, рад/с;

$$M_{\min} = \mu_{\min} \cdot M_n = 1,6 \cdot 13,27 = 21,23 \text{ Н·м}, \quad (9)$$

где $M_{\min}$ – момент минимальный, Н·м;

M_n – момент номинальный, Н·м;

$\mu_{\min}$ – значение кратности минимального момента.

Точка № 5:

$\omega = 0$;

$$M_n = \mu_n \cdot M_n = 2 \cdot 13,27 = 26,54 \text{ Н·м}, \quad (10)$$

M_n – момент пусковой, Н·м;

μ_n – кратность пускового момента;

M_n – момент номинальный, Н·м.

Рассмотрим естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя АИР 100S2 (рис. 2).

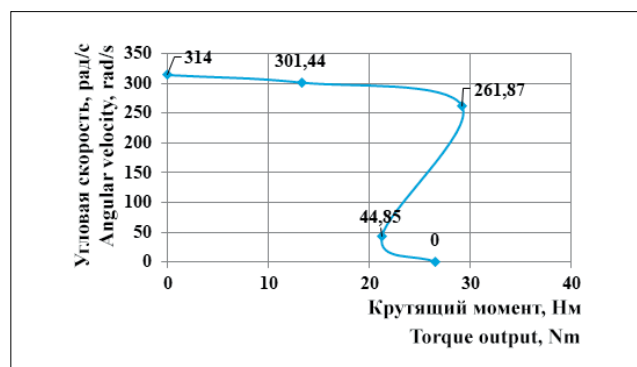


Рис. 2. Естественная механическая характеристика электродвигателя

Fig. 2. Natural mechanical characteristic curve of an electric motor

Точка № 1 соответствует режиму идеального холостого хода. На точке № 2 двигатель работает с максимальным моментом. В точке № 3 ротор двигателя будет принудительно остановлен, что для двигателя означает режим короткого замыкания. Поэтому вра-

щающий момент двигателя в этой точке называется критическим M_k . Точке №4 соответствуют минимальная угловая скорость и минимальный момент. В точке №5 двигатель работает в режиме пуска: скорость ротора $\omega = 0$, а на неподвижный ротор действует пусковой момент M_n . Участок механической характеристики, расположенный между первой и второй характерными точками, называется рабочим участком. На нем двигатель работает в установившемся режиме [12].

Для управления электродвигателем *AIP 100 S2* необходимо также выбрать частотный преобразователь, который обеспечивает плавную регулировку скорости вращения электродвигателя путем создания на выходе преобразователя необходимого электрического напряжения при заданной частоте [13]. По мощности электродвигателя наиболее подходит частотный преобразователь мощностью 7,5 кВт *Prostar PR6000-0075T3G* (рис. 3).



Рис. 3. Частотный преобразователь мощностью 7,5 кВт
Fig. 3. Frequency converter with the capacity of 7.5 kW

Технические характеристики частотного преобразователя *Prostar PR6000- 0075T3G* [14]:

мощность, кВт	7,5;
номинальный ток, А	17;
напряжение питания, В	380;
количество фаз	3;
выходная частота, Гц	0-400;
класс защиты	IP 20;
рабочая температура, °С	-10...+40;
габариты (Ш×В×Г), мм	206×286×199;
масса, кг	5,5.

Для продолжительной работы транспортного средства необходимо выбрать аккумуляторные батареи. Наиболее популярны свинцово-кислотные, так как их стоимость в 1,6 раза меньше по сравнению с аналогами и они пригодны к переработке. Для экспериментальных исследований взяли свинцово-кислотные батареи *B.B. Battery* 12 В, 5 А.ч.

Уровень входного напряжения для преобразования его в синусоиду должен находиться в пределах 480-540 В постоянного тока.

Рабочее напряжение аккумулятора (АК) составляет 11,5-13,7 В, номинальное напряжение – 12,0 В.

Рассчитаем необходимое количество аккумуляторов:

$$n = \frac{U_{AB}}{U_{AK}}, \quad (11)$$

где n – количество аккумуляторов в цепи, шт.;

U_{AB} – номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В;

U_{AK} – номинальное напряжение одного аккумулятора, В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Разработали электрическую принципиальную схему управления зарядом и электроприводом для внедрения ее в транспортное средство (рис. 4). Экспериментальные исследования по проверке работоспособности проводили на автомобиле «ВАЗ 1111 Ока» (рис. 5).

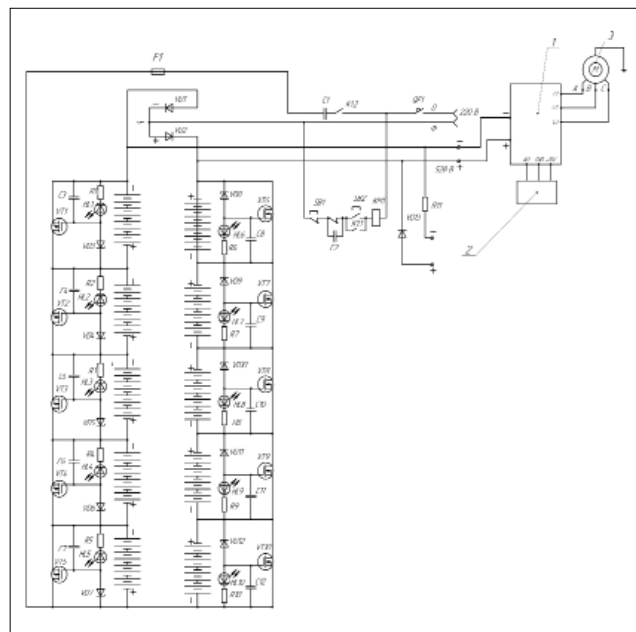


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема управления зарядом и электроприводом: 1 – частотный преобразователь *Prostar PR6000-0075T3G*; 2 – электронная педаль акселератора; 3 – асинхронный электродвигатель *AIP 100 S2*

Fig. 4. Electrical schematic diagram of charge and electric drive control: 1 – *Prostar PR6000-0075T3G* frequency converter; 2 – electronic accelerator pedal; 3 – *AIR100S2* asynchronous electric motor

Система управления зарядом АБ для электротранспорта, работающая от стандартного сетевого напряжения, обеспечивает равномерную зарядку аккумуляторов, соединенных последовательно в одну АБ. При этом аккумуляторы разделены на группы, где каждая из них имеет свое зарядное устройство.

Изучили также заряд и разряд АБ при переменном напряжении 220 В.

При различных нагрузках меняется ток нагрузки, который влияет на доступную энергию, которую мож-

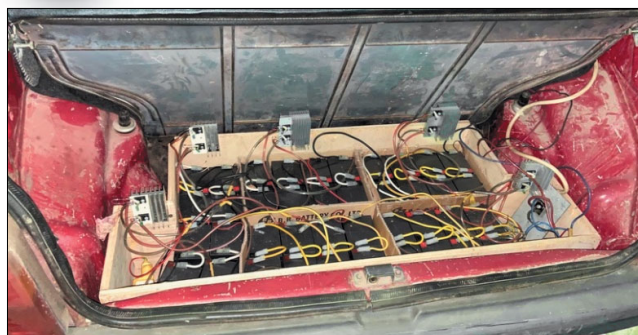


Рис. 5. Аккумуляторные батареи в автомобиле «ВАЗ 1111 Ока»

Fig. 5. Storage batteries in the VAZ 1111 Oka vehicle

но взять из аккумулятора [15]. Чтобы определить, как она изменяется, провели экспериментальные исследования по разряду аккумуляторных батарей при нагрузках 10 А; 7; 5 и 2 А. В ходе исследований можно определить доступную емкость АБ при различных условиях разряда (рис. 6). Разряд АБ проводили с помощью асинхронного электродвигателя АИР 100 S2 мощностью 4 кВт [16].

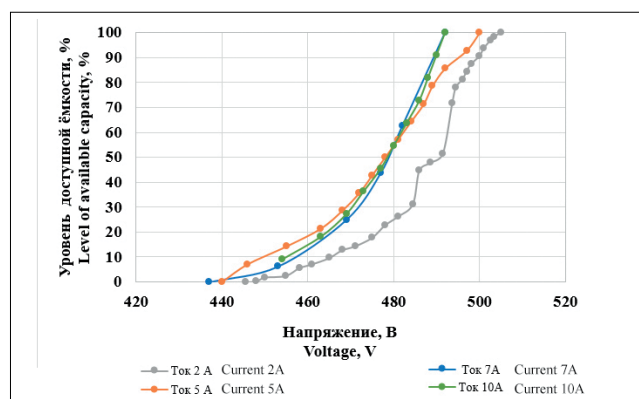


Рис. 6. Зависимость уровня доступной емкости от напряжения при различных токах нагрузки

Fig. 6. Dependence of available capacity level on voltage at various load currents

Следующим этапом было определение времени работы подключенного электродвигателя с током нагрузок 1 А; 2; 3 и 5 А (рис. 7). С током нагрузки 1 А аккумуляторные батареи разряжаются в течение 104 мин, с током 2 А – 83 мин, 3 А – 65 мин, а с током 5 А – 50 мин, при постоянной работе электродвигателя, что достаточно для езды по ферме. С помощью данных исследований можно определить доступную емкость аккумуляторных батарей при различных условиях разряда. Разряд аккумуляторных батарей проводили с помощью асинхронного электродвигателя АИР 100 S2 мощностью 4 кВт.

Результаты экспериментальных исследований по заряду аккумуляторных батарей от сетевого напряжения показали: чем меньше напряжение заряда, тем больше времени требуется на его увеличение (рис. 8).

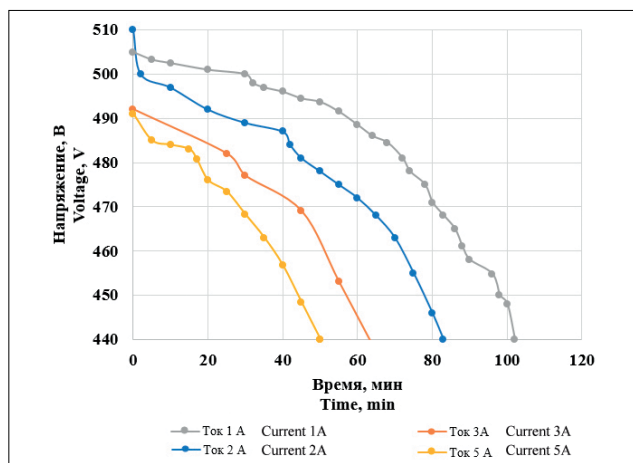


Рис. 7. Зависимость разряда аккумуляторных батарей от времени при различных токах нагрузки

Fig. 7. Battery discharge graph depending on time at different load currents

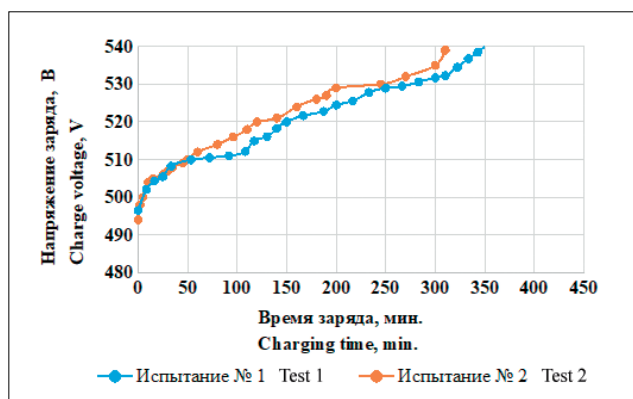


Рис. 8. Зависимость напряжения заряда от времени заряда

Fig. 8. The graph of charge voltage variation dependence on the charging time

Кроме того, провели два экспериментальных исследования по заряду аккумуляторных батарей от переменного напряжения с током заряда 2 и 3 А. В первом случае время зарядки составило 350 мин, во втором – 310 мин.

Все АБ разряжаются и заряжаются равномерно.

Выводы. Разработали электрическую принципиальную схему управления зарядом и электроприводом и реализовали ее на экспериментальном образце транспортного средства.

Определили, что с током нагрузки 1 А аккумуляторные батареи разряжаются в течение 104 мин, с током 2 А – 83 мин, 3 А – 65 мин, а с током 5 А – 50 мин, при постоянной работе электродвигателя, что достаточно для езды по ферме.

Графически изобразили зависимости уровня доступной емкости от напряжения, а также разряда аккумуляторных батарей от времени при различных токах нагрузки.

Провели два экспериментальных исследования по заряду аккумуляторных батарей от переменного



напряжения с током заряда 2 и 3 А. В первом случае время зарядки составило 350 мин, во втором – 310 мин.

Выяснили, что при использовании разработанной схемы аккумуляторные батареи заряжаются равномерно.

Исследования выполнены при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «УМНИК» – 430ГУЦЭС8-D3/62163.

The research was carried out with the support of the Innovation Promotion Fund within the UMNIK program – 430ГУЦЭС8-D3/62163.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Friedrischkova K., Vala D. Development of the Methodology for the Management of the Electromobile System and the Family House System. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2018. Vol. 10808.
2. Семин А.Н., Иовлев Г.А. К вопросу о создании нормативов для формирования оптимального состава машинно-тракторного парка // *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2019. N7. С. 8-12.
3. Габитов И.И., Мударисов С.Г., Иофинов П.А. Региональные меры государственной поддержки повышения уровня технической оснащенности машинотракторного парка предприятий АПК // *Технический сервис машин*. 2020. N2(139). С. 83-95.
4. Трескова Ю. В. Электромобили и экология. Перспективы использования электромобилей // *Молодой ученый*. 2016. N12. С. 563-565.
5. Kim S.Y., Cho J.H., Murray E. Stochastic electrotransport selectively enhances the transport of highly electromobile molecules. 2015. 10.
6. Гаджилы Б.Э. Исследование аккумуляторных батарей электромобилей // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура (электронный научный журнал)*. 2014. N2(2). М.: МАДИ. 2014.
7. Huang X., Lin Y., Lim Ming K., et al. The influence of knowledge management on adoption intention of electric vehicles: perspective on technological knowledge. *Industrial management and data systems*. 2021. April.
8. Александров И.К., Раков В.А., Щербакова А.А. Перспективы развития транспортных средств с электроприводом // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011. N4. С. 65-68.
9. Гусаров В.А., Юферев Л.Ю., Рощин О.А., Споров А.П.

Модернизация автомобиля «Ока» в электромобиль «Ока-Э» для нужд фермера по организации и контролю технологических процессов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. N3(40). С. 37-44.

10. Riedner L., Mair C., Zimek M., et al. E-mobility in agriculture: differences in perception between experienced and non-experienced electric vehicle users. *Clean technologies and environmental policy*. 2019. Vol. 21. N1. 55-67.

11. Кабдин Н.Е., Сетевой электронный учебно-методический комплекс «Основы электропривода» // *Хроники объединенного фонда электронных ресурсов. Наука и образование*. 2014. N6(61). С. 27.

12. Баширин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат. 1982. 392с.

13. Kougiass I., Nikitas A., Thiel C. Clean energy and transport pathways for islands: A stakeholder analysis using Q method. *Transportation research part d-transport and environment*. 2020. 78. 1021802020.

14. Бузун С.А., Лебедев К.Н. Адаптивный плавный пуск погружных электронасосных агрегатов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2008. N8. С. 6-7.

15. Гречушников Е.А., Прокофьев Д.В., Салюк Е.В., Набатчиков А.В. Испытания свинцовых аккумуляторных батарей в условиях контрольно-испытательных станций // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2020. N71. С. 188-195.

16. Волокитина Е.В., Ерохин Д.В., Москвин Е.В., Вшивцев М.Н. Испытательный комплекс для высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2013. N3. С. 40-43.

REFERENCES

1. Friedrischkova K., Vala D. Development of the Methodology for the Management of the Electromobile System and the Family House System. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2018. Vol. 10808 (In English).
2. Semin A.N., Iovlev G.A. K voprosu o sozdanii normativov dlya formirovaniya optimal'nogo sostava mashinno-traktornogo parka [On the issue of creating standards for the formation of the optimal composition of the machine-tractor park]. *Ekonomika sel'skokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy*. 2019. N7. 8-12 (In Russian).
3. Gabitov I.I., Mudarisov S.G., Iofinov P.A. Regional'nye mery

gosudarstvennoy podderzhki povysheniya urovnya tekhnicheskoy osnashchennosti predpriyatiy agropromyshlennogo kompleksa [Regional measures of state support for increasing the technical equipment of machine and tractor fleet of agricultural enterprises]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2020. Vol. 58. N2(139). 83-95 (In Russian).

4. Treskova Yu.V. Elektromobili i ekologiya. Perspektivy ispol'zovaniya elektromobiley [Electric vehicles and ecology. Prospects of electric vehicles]. *Molodoy uchenyy*. 2016. N12. 563-565 (In Russian).

5. Kim S.Y., Cho J.H., Murray E. Stochastic electrotransport selectively enhances the transport of highly electromobile mol-

ecules. 2015. 10 (In English).

6. Gadzhily B.E. Issledovanie akkumulyatornykh batarey elektromobiley [The study of the batteries of electric vehicles]. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura (elektronnyy nauchnyy zhurnal)*. Moscow: MADI. 2014. N2(2) (In Russian).

7. Huang X., Lin Y., Lim Ming K., et al. The influence of knowledge management on adoption intention of electric vehicles: perspective on technological knowledge. *Industrial management and data systems*. 2021. April (In English).

8. Aleksandrov I.K., Rakov V.A., Shcherbakova A.A. Perspektivy razvitiya transportnykh sredstv s elektropivodom [Prospects of development of vehicles with the electric drive]. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2011. N4. 65-68 (In Russian).

9. Gusarov V.A., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A., Sporov A.P. Modernizatsiya avtomobilya «Oka» v elektromobil' «Oka-E» dlya nuzhd fermera po organizatsii i kontrolyu tekhnologicheskikh protsessov [Modernization of «Oka» Vehicle into «Oka-E» Electric Vehicle for Needs of Farmer on Organization and Control of Technological Processes]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2020. N3(40). 37-44 (In Russian).

10. Riedner L., Mair C., Zimek M., et al. E-mobility in agriculture: differences in perception between experienced and non-experienced electric vehicle users. *Clean technologies and environmental policy*. 2019. Vol. 21. N1. 55-67 (In English).

11. Kabdin N.E., Setevoy elektronnyy uchebno-metodicheskiy kompleks «Osnovy elektropivoda» [Network-based elec-

tronic learning and methodological complex "Fundamentals of electric drive"]. *Khroniki obedinennogo fonda elektronnykh resursov. Nauka i obrazovanie*. 2014. N6 (61). 27 (In Russian).

12. Bashirin A.V., Novikov V.A., Sokolovskiy G.G. Upravlenie elektropivodami [Electric drive control]. Leningrad: Energoizdat. 1982. 392 (In Russian).

13. Kougias I., Nikitas A., Thiel C. Clean energy and transport pathways for islands: A stakeholder analysis using Q method. *Transportation research part d-transport and environment*. 2020. 78. 1021802020 (In English).

14. Buzun S.A., Lebedev K.N. Adaptivnyy plavnyy pusk pogruzhnykh elektronasosnykh agregatov [Adaptive soft starters for submersible electric pumping units]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2008. N8. 6-7 (In Russian)

15. Grechushnikov E.A., Prokof'ev D.V., Salyuk E.V., Nabat-chikov A.V. Ispytaniya svintsovykh akkumulyatornykh batarey v usloviyakh kontrol'no-ispytatel'nykh stantsiy [Test lead storage batteries in the conditions of control and test stations]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2020. N71. 188-195 (In Russian).

16. Volokitina E.V., Erokhin D.V., Moskvina E.V., Vshivtsev M.N. Ispytatel'nyy kompleks dlya vysokoskorostnogo elektropivoda kompressora sistemy konditsionirovaniya vozdukhа [Test system for the high-speed electric drive of an air conditioning compressor]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2013. N3. 40-43 (In Russian).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Споров А.П. – проведение лабораторных исследований, разработка теоретических предпосылок, обработка результатов исследований, доработка текста, формирование общих выводов.

Писарев Д.Ю. – помощь в сборке электрических схем, литературный анализ.

Парахнич А.С. – построение графиков, мониторинг лабораторных исследований, редактирование и оформление материалов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Sporov A.P. – conducting laboratory research, developing theoretical prerequisites, processing research results, finalizing the text, forming general conclusions.

Pisarev D.Yu. – assistance in assembling electrical circuits, literary analysis.

Parakhnich A.S. – plotting graphs, monitoring laboratory research, editing and formatting materials.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

20.05.2021

06.09.2021

Оценка показателей работ беспилотных мультикоптеров по внесению пестицидов и агрохимикатов

Валерий Павлович Асовский¹,

доктор технических наук, ученый секретарь,
e-mail: asovsky@panh.ru;

Алла Сергеевна Кузьменко²,

кандидат технических наук, старший преподаватель;

Олег Владимирович Худоленко¹,

доктор технических наук,
заместитель генерального директора,

e-mail: khudolenko@panh.ru

¹Научно-производственная компания «ПАНХ», г. Краснодар, Российская Федерация;

²Южный Федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация

Реферат. Рассмотрели использование беспилотных воздушных судов как одно из перспективных инновационных направлений развития отраслей экономики и социальной сферы. Показали перспективы их применения в сельском хозяйстве, особенно для внесения пестицидов и агрохимикатов, где важны точность, качество и своевременность. Отметили актуальность оценки работы мультикоптеров. (*Цель исследований*) Разработать и апробировать методику оценки показателей выполнения мультикоптерами работы по внесению пестицидов и агрохимикатов в сельскохозяйственном производстве. (*Материалы и методы*) Использовали научно-техническую информацию и экспериментальные материалы, а также методы системного, статистического и функционально-стоимостного анализа, математического моделирования и оптимизации параметров объектов и процессов, применяя отработанные ранее методические подходы изучения авиационного распределения веществ. (*Результаты и обсуждение*) Представили общее описание и содержание разработанной методики и средств оценки показателей мультикоптеров при внесении рабочих растворов, обеспечивающих погрешность оценки до 7 процентов. Выделили типовые варианты участков и выполнения их обработки. Изучили результаты апробации методики и программных средств для характерного гексакоптера с полезной нагрузкой до 10 килограммов. Проанализировали влияние на производительность и себестоимость обработок мультикоптером рабочей скорости до 10 метров в секунду, норм внесения 2-30 литров на гектар, размеров и параметров участка до 200 гектаров, схем движения и других факторов. (*Выводы*) Подтвердили работоспособность методики комплексной многофакторной оценки показателей работ мультикоптеров по внесению рабочих жидкостей в сельскохозяйственном производстве. Определили рациональную область применения мультикоптеров с полезной нагрузкой до 10 килограммов на участках до 50-60 гектаров при длине гона до 800-900 метров при различной производительности обработок: летной – до 10,5 гектара в летный час, рабочей – до 7,5 гектара в час, дневной – до 55 гектаров. Сформулировали предложения и рекомендации по обеспечению, организации и выполнению этих работ.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, мультикоптер, внесение агрохимикатов, участок поля, авиационная обработка растений, авиационно-химические работы, норма внесения, себестоимость обработки.

Для цитирования: Асовский В.П., Кузьменко А.С., Худоленко О.В. Оценка показателей работ беспилотных мультикоптеров по внесению пестицидов и агрохимикатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 55-62. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-55-62.

Evaluation of Unmanned Multicopters' Performance Indicators for Pesticide and Agrochemical Application

Valery P. Asovskiy¹,

Dr.Sc.(Eng.), scientific secretary,
e-mail: asovsky@panh.ru;

Alla S. Kuzmenko²,

Ph.D.(Eng.), senior lecturer, e-mail: all7212@mail.ru;

Oleg V.Khudolenko¹,

Dr.Sc.(Eng.), deputy general director,
e-mail: khudolenko@panh.ru

¹PANH Helicopters, Krasnodar, Russian Federation;

²Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

Abstract. The authors considered the use of unmanned aerial vehicles as one of the promising innovative directions for the development of economic and social sectors. The authors touched upon the prospects for their use in agriculture, especially for pesticide and agrochemical application, where accuracy, quality and timeliness are important. The relevance of multicopter performance assessment was noted. (*Research purpose*) The authors aim to develop and test a methodology for the evaluation of multicopters' performance indicators for pesticide and

agrochemical application in the agricultural industry. (*Materials and methods*) The authors used scientific and technical information and experimental materials, applied methods of system, statistical and functional-cost analysis, mathematical modeling, object and process parameter optimization, as well as previously developed methodological approaches to studying the aerial distribution of substances. (*Results and discussion*) The authors presented a general description and content of the developed methodology and means for assessing multicopter performance when applying working solutions that provide for an estimation error of up to 7 percent. The typical options for field plots and their treatment were specified. The authors analyzed the results of testing the methodology and software for a typical hexacopter with the payload of up to 10 kilograms. The authors analyzed the impact of working speed of up to 10 meters per second, application rates of 2-30 liters per hectare, the size and characteristics of the field plot up to 200 hectares, traffic patterns and other factors on productivity and multicopter treatment cost. (*Conclusions*) The authors confirmed the efficiency of implementing complex multi-factor assessment of multicopter performance indicators for working fluids application in agricultural production. The authors determined the appropriate area of applying multicopters with a payload of up to 10 kilograms in the field plots up to 50-60 hectares with a rut length of up to 800-900 meters with different treatment performance: flight – up to 10.5 hectares per flight hour, working – up to 7.5 hectares per hour, daytime – up to 55 hectares. Proposals and recommendations for the provision, organization and implementation of this work were formulated.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), multicopter, application of agrochemicals, field plot, agricultural aerial spraying, aeronautical and chemical works, application rate, treatment prime cost.

For citation: Asovskiy V.P., Kuzmenko A.S., Khudolenko O.V. Otsenka pokazateley rabot bespilotnykh mul'tikopteroov po vneseniyu pestitsidov i agrokhimikatoov [Evaluation of unmanned multicopters' performance indicators for pesticide and agrochemical application]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 55-62 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-55-62.

Использование беспилотных воздушных судов (БВС) рассматривают как одно из наиболее значимых и перспективных инновационных направлений развития отраслей экономики и социальной сферы во многих странах мира. Применение БВС в сельском хозяйстве повышает его результативность, эффективность, экологичность и безопасность [1-4]. Основной областью их применения на сегодняшний день считается целевой мониторинг и различные виды съемок сельскохозяйственных угодий, в том числе в системе точного земледелия [2-5]. Технические и технологические решения разнообразных видов съемок не связаны напрямую с повышением продуктивности и эффективности сельскохозяйственного производства, однако они составляют информационную основу для проведения работ, непосредственно влияющих на эти показатели [2, 3, 6]. БВС могут обеспечить точность, качество и своевременность внесения необходимых веществ, повышая тем самым урожайность и снижая потери урожая сельскохозяйственных культур [3-7]. Для практического применения в агропромышленном комплексе, особенно для обработок сельскохозяйственных угодий, наиболее перспективны легкие БВС вертолетного типа – мультикоптеры (МК) с электрическим приводом. Для них характерны рациональное сочетание массовой отдачи, длительности полета, летных данных и экономических показателей [1, 3, 5, 6].

К сожалению, вопросам выполнения работ МК по внесению пестицидов и агрохимикатов уделяют недостаточно внимания: в основном рассматривают технические проблемы облика, оснащения и режимов полета [1, 5, 8-10], а также общие вопросы и положения применения БВС для внесения жидких и сыпучих веществ [6, 7, 11]. В информации производителей БВС и в научных работах практически отсутствуют сведения и ре-

зультаты исследований по оценке показателей выполнения БВС авиационно-химических работ (АХР) по внесению пестицидов и агрохимикатов. Именно это показатели, в частности рациональные технологические параметры, производительность и себестоимость обработки, в первую очередь интересуют потенциальных эксплуатантов сельскохозяйственных БВС и потребителей их услуг. Отсутствие этих данных сдерживает развитие применения БВС (МК) в сельском хозяйстве.

Цель исследований – разработать и апробировать методику оценки показателей выполнения мультикоптерами работ по внесению пестицидов и агрохимикатов в сельскохозяйственном производстве.

Материалы и методы. Исследования проводили на базе имеющейся научно-технической информации и полученных экспериментальных материалов с использованием методов системного, статистического и функционально-стоимостного анализа, математического моделирования и оптимизации параметров физических объектов и целевых процессов и применением отработанных ранее методических подходов изучения авиационного распределения веществ [12].

Результаты и обсуждение. В ходе исследований была разработана методика оценки показателей выполнения мультикоптерами работ по внесению агрохимикатов и реализующие ее расчетно-программные средства, учитывающие особенности условий, обеспечения и организации выполнения работ. В состав расчетно-программного комплекса входит набор взаимосвязанных блоков (модулей), обеспечивающих оценку разнообразных значимых единичных и комплексных показателей МК и процессов внесения агрохимикатов методом опрыскивания, а также совокупность интегральных показателей производства этих работ на основании обличных параметров МК (взлетная масса, количество и диаметр не-

сущих винтов и т.д.). Модуль оценки массово-геометрических характеристик МК основан на поэлементном подходе и предусматривает расчет каркасных элементов конструкции (ферма, шасси и т.д.) и узлов крепления с использованием методов сопротивления материалов для условий полета с учетом коэффициентов безопасности, а также основных элементов обеспечения и управления полетов (электродвигатели, винты, регуляторы и т.д.) с применением полученных ранее статистических выражений. Результаты расчетов этого блока позволяют оценить массу конструкции МК с погрешностью в пределах $\pm 5\%$, сопоставимой с аналогичными известными методиками [1, 10, 13]. В дальнейшем ее учитывают совместно с массой опрыскивателя и аккумуляторных батарей (АБ) при расчете полезной загрузки.

Блок расчета аэродинамических характеристик и летных данных МК базируется на известной методике Л.С. Вильдгрубе [14]. Он предусматривает расчет вспомогательных характеристик (эквивалентная вредная пластинка, нагрузка на несущие винты и т.д.) и определение потребных для полета мощностей. С учетом параметров мультикоптера и показателей его АБ можно с погрешностью до 7% оценить его значимые и предельные летные данные (характерные скорости, время полета, маневренные показатели и т.д.) и энергопотребление при полетах по внесению агрохимикатов.

Модуль оценки показателей подачи, выпуска и распределения рабочей жидкости при выполнении заданного вида работ на принятой высоте и скорости полета МК предназначен для определения рабочей ширины захвата (перехода) обработок и уточнения параметров функционирования опрыскивателя (расход жидкости, степень ее диспергирования, энергопотребление и т.д.) по обеспечению требований производства АХР с учетом типа и количества используемых на БВС распылителей. Блок моделирования летного и рабочего цикла обработок МК участков заданной конфигурации построен на пооперационном подходе и обеспечивает детальную оценку показателей основных и вспомогательных полетных и наземных процессов обработок (времени, количества, выработки рабочей жидкости и емкости АБ и т.д.) с учетом принятой схемы и организации полетов МК, что позволяет определить комплексные показатели обработки, например производительность работ с заданными параметрами.

Модуль расчета технико-экономических показателей АХР для заданного варианта МК основан на отработанных ранее методических подходах [12, 15]. Он предусматривает оценку абсолютных и относительных затрат применения БВС при выполнении соответствующих работ для текущих общеэкономических условий (валютный курс, уровень оплаты труда, ставки налогообложения и страхования и т.д.) и осредненного распределения метеорологических данных в характерный период проведения АХР. При расчетах учитывают технологические и организационно-тех-

нические параметры выполнения работ. В качестве основных вариантов конфигурации участков, описываемых сторонами L и B , площадью $F = L \cdot B$ и коэффициентом удлинения $K_f = L/B$, и выполнения полетов МК при их обработке для проведения расчетов выделены соответствующие типовые схемы (рис. 1). Наиболее удобен и безопасен для обработки открытый участок, не имеющий препятствий (лесополос, кустарников, валков и т.д.) для полета на своих границах, то есть $K_{\Pi} = 0$ (рис. 1а). Опрыскивание проводится в его пределах на прямолинейных гонах с постоянной рабочей высотой H_p и скоростью V_p полета при непрерывном выпуске рабочего раствора (толстые линии) и расстоянии перехода Z_p . Развороты на следующий гон осуществляются с выключенным опрыскивателем – не обрабатываемого участка (тонкие линии).

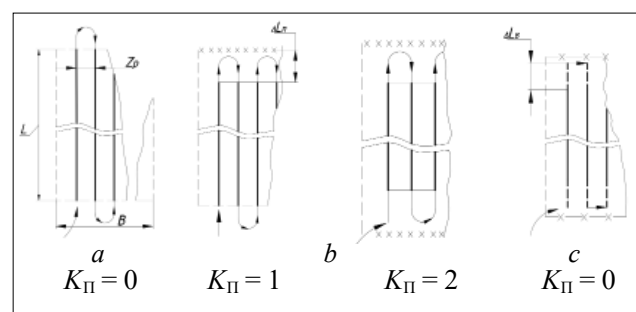


Рис. 1. Типовые схемы обработки участков мультикоптерами: а – открытый участок; б – участки с препятствиями; в – закрытая обработка (K_{Π} – наличие препятствий на границах участка, L и B – длина и ширина участка, Z_p – расстояние перехода, ΔL_{Π} и ΔL_B – отступы от линии препятствий (границы участка) при отключении и изменении подачи

Fig. 1. Typical diagrams for the multicopter treatments of field plots: а – open area; б – a plot with obstacles; в – closed processing (K_{Π} – the presence of obstacles on the plot boundaries, L and B – plot length and width, Z_p – transition distance, ΔL_{Π} and ΔL_B – margins from the obstacle line (plot boundaries) when switching off and changing the feed)

Участки с одним ($K_{\Pi}=1$) или двумя ($K_{\Pi}=2$) препятствиями по линии полета МК при обработке предполагают установившееся опрыскивание лишь в пределах возможного гона $L_{\Gamma} = L - K_{\Pi} \cdot \Delta L_{\Pi}$ с выключением опрыскивателя на удалении ΔL_{Π} от препятствия (рис. 1б). В этом случае участок обрабатывается неполностью (коэффициент покрытия $K_S \approx L_{\Gamma}/L < 1$), что создает определенные сложности для заказчика обработок.

Закрытая обработка ($K_{\Pi}=0$) участков с препятствиями и без них осуществляется в границах участка (рис. 1в). При этом основная часть опрыскивания проводится в установившемся режиме, а приграничная зона обрабатывается при изменении на пути ΔL_B скорости полета на гоне в пределах $[0; V_p]$ и соответствующем изменении выпуска жидкости для обеспечения требуемой нормы внесения (толстая прерывистая линия) с последующим переходом к следующему гону. Для этого варианта, как и для обработки открытых

участков, коэффициент покрытия $K_S \approx 1$, что определяет его перспективность при условии решения вопросов обеспечения качества и эффективности опрыскивания в зоне переходных режимов общей площадью $2\Delta L_B \cdot B$. В России и за рубежом наиболее распространены для внесения пестицидов и агрохимикатов легкие МК с полезной нагрузкой около 10 кг и максимальной взлетной массой до 30 кг, что не требует обязательной сертификации БВС по действующему воздушному законодательству РФ и тем самым снижает потенциальную себестоимость их применения. В этой связи проведем оценку показателей выполнения МК обработок с использованием разработанных методики и расчетно-программных средств на примере характерного для отмеченного класса БВС гексакоптера *ODONATA* (рис. 2). Его максимальная взлетная масса равна 24 кг (на АХР – 22,5 кг), полезная нагрузка – до 10 кг. Имеются две 6S литий-полимерные АБ базовой емкостью по 16 А·ч (355 Вт·ч). Штанговый опрыскиватель оснащен 4 щелевыми форсунками. Максимальный выпуск жидкости – 3,2 л/мин. Рабочая бригада представлена оператором и техником. Для перебазирования БВС потребуется автомобиль типа ГАЗ-3301. Необходимо предусмотреть запас АБ на полную рабочую смену с учетом времени их оперативной подзарядки генератором. В качестве примера рассмотрим влияние рабочей скорости полета на производительность при обработке базовым МК квадратного ($K_f = 1$) участка площадью 4 га при наличии препятствий ($K_{\Pi} = 2$) с нормой внесения $H = 5$ л/га в ходе выполнения полетов с площадки непосредственно на границе участка – удаление $d_L = 0$ (рис. 3). При такой обработке наивысшая летная (кривая Π_L) и рабочая (Π_R) производительности достигаются при $V_p = 6$ м/с: 5,93 га/л.ч и 4,76 га/ч соответственно. При этом изменчивость производительности (отношение диапазона изменения к среднему) по рабочей скорости достигает 50%, что определяет особую значимость рационального выбора технологических режимов полета МК при выполнении АХР в заданных условиях.

Наличие экстремума зависимости производительности от V_p отражает общую закономерность циклического производства АХР и определяется противоположным влиянием V_p на продолжительность полетов на гоне и заходов на них вне зависимости от наличия препятствий на границах обрабатываемого участка, его размеров и принятой схемы обработки (максимальные значения производительности для рассматриваемого случая для схем № 2 ($K_{\Pi} = 1$) и № 1 и 3 ($K_{\Pi} = 0$) достигаются при V_p 6 и 9 м/с соответственно).

Рабочая скорость МК оказывает существенное влияние не только на производительность, но и на другие значимые показатели обработок. При выполнении обработок участков с препятствиями (рис. 1б) размах необработанной перед препятствиями зоны $\Delta L_{\Pi} \sim V_p^2$. По мере роста значений V_p уменьшается коэффициент покрытия K_S , а приведенная по площади



Рис. 2. Внешний вид гексакоптера *ODONATA* (тип 2, полезная нагрузка 10 кг)

Fig. 2. The Design of the *ODONATA* hexacopter (type 2, payload 10 kg)

участка производительность обработок $\Pi_f = K_S \cdot \Pi_L$ более точно отражает приоритет выбора технологических параметров внесения веществ. В частности, для варианта $K_{\Pi} = 2$ кривая Π_f (пунктирная линия на рис. 3) указывает в качестве рациональной V_p уже 5 м/с, для которой значение Π_L уменьшается до 5,57 га/л.ч (на 6,5 %) при росте покрытия K_S примерно на 10%.

Увеличение рабочей скорости при прочих равных условиях производства АХР снижает качество внесения веществ и биологическую эффективность обработки [15]. Это обстоятельство можно учесть коэффициентом K_V , отражающим изменение результативности обработок для соответствующих режимов внесения, и использованием локального критерия оптимальности режима $\Pi_{fv} = K_V \cdot \Pi_f = K_V \cdot K_S \cdot \Pi_L$. Изменение этого критерия иллюстрирует штрих-пунктирная кривая Π_{fv} , полученная при средних показателях распределения жидкостей и имеющая максимум при $V_p = 4$ м/с (рис. 3). В этом случае достигается летная и рабочая производительность на уровне 5,17 га/л.ч и 4,11 га/ч, что примерно на 15% ниже отмеченных ранее максимальных значений, однако обеспечивает приемлемый для потребителя уровень качества обработок.

Для вариантов полной обработки участков при $K_{\Pi} = 0$ (схемы № 1 и 3) поправки K_S и K_V практически не оказывают влияния на рациональную величину V_p ($\Pi_{fv} \sim \Pi_L$), а значения производительности и рациональной скорости полета обработки участка с $K_{\Pi} = 1$ («полуоткрытый участок») являются промежуточными между такими вариантами. Характерно, что для рациональных величин V_p диапазон летной производительности обработок в рассмотренном случае составляет 5,17–8,32 га/л.ч, то есть отличается в 1,6 раза, что отражает влияние на производительность МК выбранной схемы обработки заданного участка.

Отличительная особенность внесения веществ МК с электрическим приводом – влияние на показатели обработок соотношения его загрузки и емкости используемых АБ. Для рассмотренного выше варианта (рис. 3) сплошными линиями без маркеров дополнительно показано предельное число гонов, обусловленное объемом заправленной рабочей жидкости N_w , и емкость установленных АБ N_e при обработке участка для $K_{\Pi} = 2$. Как видно из этих зависимостей, при выполнении обработок с малыми нормами (5 л/га и

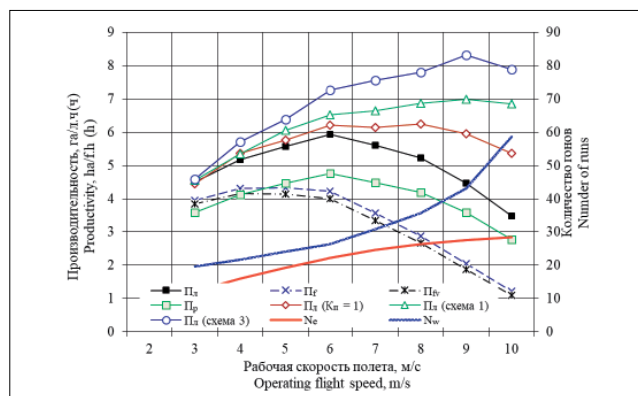


Рис. 3. Влияние рабочей скорости полета на производительность и число гонов в одном полете при обработке базовым мультикоптером квадратного участка площадью 4 га с нормой внесения 5 л/га: P_L (P_R) – летная (рабочая) производительность; P_L (P_R) – приведенная по площади (по площади и скорости) производительность, N_e (N_w) – предельное число гонов по емкости батарей (объему жидкости)
 Fig. 3. The impact of the operating flight speed on the performance indicators and the number of runs in one flight for the treatment of a square plot with the area of 4 ha by a base multicopter with the application rate of 5 l/ha: P_L (P_R) – flight (working) performance; P_L (P_R) – reduced by area (area and speed) productivity, N_e (N_w) – maximum number of runs by battery capacity (liquid volume)

менее) показатели внесения лимитируются недостаточной емкостью базового варианта АБ (16 А·ч), не позволяющей в полной мере использовать объем направленной рабочей жидкости. Согласно расчетам, установка для этого случая более емких АБ емкостью 20 А·ч, несмотря на некоторое увеличение массы снаряженного МК и уменьшение его загрузки, приводит при неизменной рациональной V_p (4 м/с) к увеличению P_L и P_R до 5,32 га/л·ч и 4,22 га/ч соответственно и уменьшению себестоимости обработок примерно на 5%, что может быть использовано при подготовке и производстве МК таких видов работ.

Рассмотрим влияние технологических режимов полета МК V_p на экономические показатели АХР при себестоимости полетов C_L и обработок C_{GA} для описанных выше вариантов (рис. 4). Как видим, изменение V_p оказывает ощутимое опосредованное влияние (через годовой налет и количество полетов, требуемое количество АБ и т.д.) на себестоимость полетов МК (изменчивость C_L для схем 1 и 2 в пределах 13% при близких средних значениях около 4400 руб/л·ч, а для схемы 3 – 37% и 5120 руб/га соответственно). В свою очередь, эти показатели прямо влияют на значения $C_{GA} = C_L/P_L$, изменчивость которых по V_p составляет 29-58% при наибольшем среднем уровне (~920 руб/га) для варианта типовой обработки МК участка с препятствиями ($K_n=2$) и примерно одинаковом среднем (745 руб/га) для остальных вариантов. Примечательно, что наименьшие значения C_{GA} для схем обработок 2 и 3 обеспечиваются при $V_p = 4-6$ м/с, определенных ранее как рациональные для обработки участка с препятствиями (рис. 4).

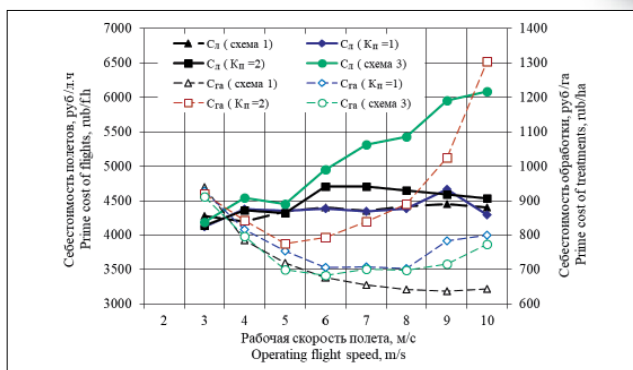


Рис. 4. Влияние рабочей скорости полета на себестоимость полетов C_L и обработок C_{GA} базовым мультикоптером квадратного участка площадью 4 га с нормой внесения 5 л/га
 Fig. 4. The impact of the operating flight speed on the prime cost of flights C_L and treatments C_{GA} of a square plot with the area of 4 ha using a basic multicopter with the application rate of 5 l/ha

При этом для вариантов с $K_n = 0$ и $V_p = 9$ м/с себестоимость обработок также близка к минимальной.

Как показывают расчеты, наивысшую производительность обработки рассматриваемого участка (рис. 3) при достаточно низкой ее себестоимости (рис. 4) обеспечивает схема 3 использования МК в границах участка. Это объясняется прежде всего полной обработкой участка ($K_n = 1$) и теоретической возможностью обработки приграничных зон участка размахом dL_B на этапах торможения и разгона МК по линии гона (рис. 1), то есть при дифференцированном внесении веществ на непостоянной, в отличие от основного режима обработки, скорости полета с использованием автоматического управления выпуском раствора. Для типовой конфигурации МК и его опрыскивателя установка такой системы сопряжена с увеличением массы конструкции, энергопотребления и стоимости мультикоптера, что приведет к усложнению и удорожанию его эксплуатации, в частности к отмеченному росту себестоимости полетов.

Автоматическое управление выпуска жидкости связано, с одной стороны, использованием гидравлического регулирования подачи, отличающегося высокой инертностью и трудностью быстрого изменения и оперативного обеспечения переменного выпуска, с другой – проблемой обеспечения дисперсности распыла жидкости и качества ее распределения по участку на переходных режимах ($dL_B \approx dL_{n-p} - V_p^2$) [6, 7]. Эта проблема при фиксированных в полете типоразмере и количестве форсунок обусловлена необходимостью уменьшения при $V < V_p$ выпуска жидкости посредством снижения мощности привода насосного агрегата опрыскивателя и его напора, что укрупняет размер выпущенных капель и снижает плотность покрытия ими объекта обработки. Кроме того, изменение скорости полета определяет перестройку индуктивного следа за МК и волны осаждения жидкости в нем, что, как показывает опыт, ухудшает равномерность распределения веществ. Эти факторы спо-

способны существенно снизить биологическую эффективность внесения веществ, прежде всего пестицидов, в переходных приграничных зонах участка, и указанные достоинства такой схемы обработки в значительной степени нивелируются. С учетом сделанных замечаний практическое использование потенциально перспективной схемы 3 обработки участков с дифференциальным внесением веществ в их приграничных зонах до решения имеющихся технических и технологических вопросов обеспечения качества и эффективности обработок в этих зонах представляется проблематичным и далее не рассматривается.

Важнейшим технологическим параметром АХР служит норма внесения (рис. 5). График показывает достаточно очевидное и традиционное для авиационной техники ухудшение показателей обработок МК при увеличении норм внесения и соблюдении в целом соотношений показателей между разными схемами обработок (схемы 1 и 2 при $K_{\Pi} = 0; 1$ и 2). При малых нормах внесения (до 5 л/га), обеспечивающих обработку МК более 2 га за один полет, величины P_{Π} , P_r и $C_{\Gamma A}$ для каждой из схем принципиально не отличаются и лимитируются емкостью используемых АБ. При увеличении норм в качестве лимитирующего фактора выступает уже объем заправленной жидкости и наблюдается существенное общее падение производительности (в 1,5-2,0 раза для P_{Π}) и связанный с ней рост себестоимости обработок (в 2,1-2,7 раза). Характеризуя влияние нормы внесения на показатели обработок МК, следует отметить ряд особенностей:

- рост норм внесения рабочих растворов прямо связан с увеличением их выпуска. Для фиксированной полезной нагрузки МК это сопряжено с уменьшением времени собственно внесения веществ и продолжительности летного цикла при примерном постоянстве времени наземных операций. В результате относительно снижается продолжительность полета и растет соотношение между P_{Π} и P_r (от $\sim 1,2$ до 2,0 в диапазоне норм 2-30 л/га), а в итоге непропорционально увеличивается время обработки заданного участка;
- для обработок с повышенными нормами важное значение имеет максимальный выпуск рабочих растворов: для рассматриваемого случая (3,2 л/мин) при нормах более 15 л/га он прямо определяет ограничения рабочей скорости внесения веществ вне зависимости от схемы обработки (для норм 20; 25 и 30 л/га – 5; 4 и 3 м/с соответственно) и практически нивелирует величины P_{Π} , P_r и $C_{\Gamma A}$ разных схем (рис. 5).

От площади, например квадратных участков с ограничениями на границах ($K_f = 1$, $K_{\Pi} = 2$), зависят производительность и себестоимость обработок рассматриваемым МК для разных норм опрыскивания (рис. 6).

Увеличение размеров и площади участков заданной конфигурации до примерно 100 га для малых и частично средних норм (5-10 л/га) в целом сопровождается улучшением значимых показателей обработок в 1,5-2,0

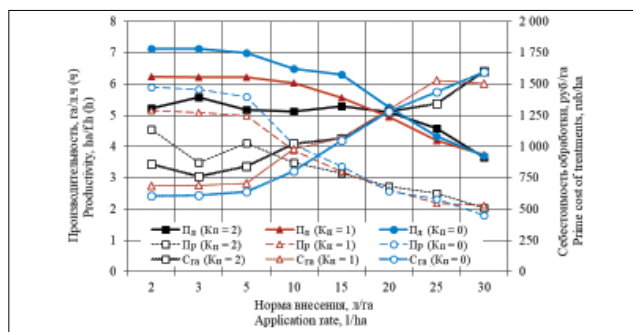


Рис. 5. Влияние нормы внесения рабочей жидкости на производительность и себестоимость обработок базовым мультикоптером квадратных участков площадью 4 га

Fig. 5. The impact of the working fluid application rate on the performance indicators and the treatment prime cost when using a basic multicopter for square plots with the area of 4 ha

раза. Этот рост в условиях отсутствия явных ограничений по объему и выпуску жидкости при обработке и возможностью выполнения более 2-3 гонов обусловлен в основном положительным влиянием на производительность удлинения гона L_{Γ} , связанного с относительным увеличением времени внесения веществ и полетного времени для летного и рабочего цикла.

Эта особенность наблюдается и для повышенных норм – 15 и 20 л/га – при росте площадей до 50 и 24, а также при улучшении P_{Π} и $C_{\Gamma A}$, соответственно, на 50-75 и 20-30%. Для указанных норм обработка невозможна при увеличении L более 1200 и 900 м (150 и 80 га на рис. 6), как и для больших норм 25 и 30 л/га для длины участка примерно 700 м (50 га) и 600 м (36 га). Как показывают расчеты, рост площади F и длины L участка вне зависимости от схемы обработки и нормы внесения связан с увеличением рациональных величин V_p с 4-5 до 8-9 м/с, что необходимо учитывать при выборе расходных характеристик и комплектации форсунками опрыскивателя МК и технологических параметров его применения на АХР. Справочно пунктирными линиями без маркеров даны зависимости себестоимости индивидуальных обработок соответствующих участков с высокими (10 м) препятствиями на границах самолетом Ан-2 с нормами опрыскивания 5 и 25 л/га при рабочей ширине захвата 30 м (рис. 6). Из соотношения представленных на графиках зависимостей $C_{\Gamma A}$ можно отметить конкурентоспособность себестоимости обработок рассматриваемого МК с нормами внесения 5; 10; 15 и 20 л/га самолета Ан-2 с аналогичными нормами на участках с площадью до ~ 100 ; 80; 50 и 36 га, что служит ориентиром при оценке возможности применения характерного МК на разных участках с учетом требуемых сроков проведения обработок.

Выводы. Разработанные и апробированные в процессе исследований методические подходы и расчетно-программные средства многофакторной оценки работы мультикоптеров по внесению рабочих растворов в аграрном производстве обеспечивают приемлемую точность и адекватность определения значимых

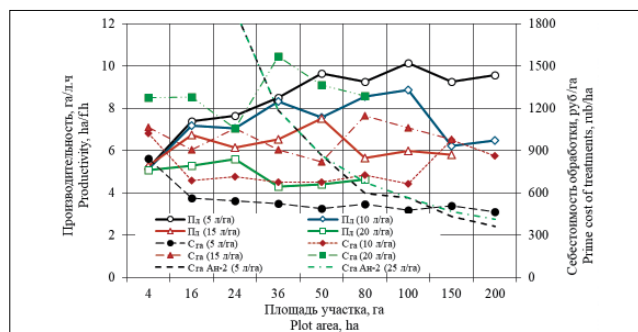


Рис. 6. Влияние площади участков с ограничениями ($K_f=1$, $K_{п}=2$) на показатели летной производительности и себестоимости обработок базовым мультикоптером для разных норм внесения рабочих жидкостей

Fig. 6. The impact of restricted plot area ($K_f=1$, $K_{п}=2$) on the flight performance indicators and the treatment prime cost for different rates of working fluid application when using a basic multicopter

показателей и могут быть использованы для решения комплекса научно-практических задач по обеспечению такими аппаратами АХР в сельском хозяйстве.

Показатели выполнения МК определенного типа работ по внесению пестицидов и агрохимикатов отличаются высокой изменчивостью (до 130%) и чувствительностью к условиям, размерам участка, схеме выполнения и технологическим параметрам обработок, что определяет необходимость обоснованного выбора рациональных вариантов оснащения мультикоптеров и схем и режимов выполнения ими полетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Marinello F., Pezzuolo A., Chiumenti A., Sartori L. Technical analysis of Unmanned Aerial Vehicles (Drones) for agricultural applications. *Engineering for rural development*. Jelgava, 25-27.05. 2016. 870-875.
2. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чашин А.Н., Заболотно-ва М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // *Вестник ПФИЦ*. 2019. N2. С. 47-51.
3. Мелихова Е.В., Мелихов Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в аграрном производстве // *Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral»*. 2019. N3. С. 206-211.
4. Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. N3. С. 10-16.
5. Mogili U.M., Deepak B.B.V.L. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*. 2018. N133. 502-509.
6. Марченко Л.А., Артюшин А.А., Смирнов И.Г., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю., Курбанов Р.К. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N5. С. 38-45.
7. Марченко Л.А., Личман Г.И., Смирнов И.Г., Мочкова Т.В., Колесникова В.А. Дифференцированное внесение удобрений и пестицидов с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. N3. С. 17-23.
8. Свердлов С.З. О компоновке многороторного беспилотного вертолета (мультикоптера) // *Вестник Вологодского государственного университета*. 2018. N2(2). С. 20-24.
9. Арзамасцев А.А., Крючков А.А. Математические модели для инженерных расчетов летательных аппаратов мультироторного типа // *Вестник ТГУ*. 2014. Т. 19. N6. С. 1821-1828.
10. Vu N.A., Dang D.K., Dinh T.L. Electric propulsion system sizing methodology for an agriculture multicopter. *Aerospace Science and Technology*. 2019. 90. 314-326.
11. Корнилов Т.В. БПЛА – вам взлет // *Защита и карантин растений*. 2017. N5. С. 37-39.
12. Асовский В.П. Теория и практика авиационного распределения веществ. М.: Воздушный транспорт. 2008. 580 с.
13. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: ТехНОСФЕРА. 2015. 312 с.
14. Вильдгубе Л.С. Вертолеты. Расчет интегральных аэродинамических характеристик и летно-технических данных. М.: Машиностроение. 1977. 152 с.
15. Асовский В.П., Кузьменко А.С. Особенности опрыскивания с использованием беспилотных воздушных судов вертолетного типа // *Защита и карантин растений*. 2019. N5. С. 40-44.

REFERENCES

1. Marinello F., Pezzuolo A., Chiumenti A., Luigi Sartori L. Technical analysis of Unmanned Aerial Vehicles (Drones) for agricultural applications. *Engineering for rural development*. Jelgava. 25-27.05.2016. 870-875 (In English).
2. Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v sel'skom khozyaystve [Use of uncleaned aircraft in agriculture] *Vestnik PFITS*. 2019. N2. 47-51 (In Russian).
3. Melikhova E.V., Melikhov D.A. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v agrarnom proizvodstve [The use of unmanned aerial vehicles in agricultural production]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii «Integral»*. 2019. N3. 206-211 (In Russian).
4. Smirnov I.G., Marchenko L.A., Lichman G.I., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu. Bepilotnye letatel'nye apparaty dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy v sisteme tochnogo zemledeliya [Unmanned aerial vehicles for pesticides and fertilizers application in precision farming system]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017. N3. 10-16 (In Russian).
5. Mogili U.M., Deepak B.B.V.L. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*. 2018. N133. 502-509 (In English).
6. Marchenko L.A., Artushin A.A., Smirnov I.G., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Tekhnologiya vneseniya pestitsidov i udobreniy bespilotnymi letatel'nymi apparatami v tsifrovom sel'skom khozyaystve [Technology of pesticide and fertilizer application with unmanned aerial vehicles in digital agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 38-45 (In Russian).
7. Marchenko L.A., Lichman G.I., Smirnov I.G., Mochkova T.V., Kolesnikova V.A. Differentsirovannoe vnesenie udobreniy i pestitsidov s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Variable rate application of fertilizers and pesticides using unmanned aerial vehicles]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017. N3. 17-23 (In Russian).
8. Sverdlov S.Z. O komponovke mnogorotornogo bespilotnogo vertoleta (mul'tikoptera) [On layout design of multirotor unmanned helicopter (multicopter)]. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. N2(2). 20-24 (In Russian).
9. Arzamastsev A.A., Kryuchkov A.A. Matematicheskie modeli dlya inzhenernykh raschetov letatel'nykh apparatov mul'tirotnogo tipa (chast' 1) [Mathematical models for engineering calculations of aircrafts of multi-rotor type (part 1)]. *Vestnik TGU*. 2014. Vol. 19(6). 1821-1828 (In Russian).
10. Ngoc AnhVu, Duy KhangDang, TuanLeDinh. Electric propulsion system sizing methodology for an agriculture multicopter. *Aerospace Science and Technology*. 2019. 90. 314-326 (In English).
11. Kornilov T.B. BPLA – vam vzlet. [The UAV – take-off]. *Zashchita i karantin rasteni*. 2017. N5. 37-39 (In Russian).
12. Asovskiy V.P. Teoriya i praktika aviatsionnogo raspredeleniya veshchestv [Theory and practice of substance aviation distribution]. Moscow: Vozdushnyy transport. 2008. 580 (In Russian).
13. Rendal U. Biard, Timoti U. MakLejn Malye bespilotnye letatel'nye apparaty: teoriya i praktika [Small Unmanned Aerial Vehicles: Theory and Practice]. Moscow: TECHNOSFERA. 2015. 312 (In Russian).
14. Vil'drugbe L.S. Vertolety. Raschet integral'nykh aerodinamicheskikh kharakteristik i letno-tekhnicheskikh dannykh [Helicopters. Calculation of integral aerodynamic characteristics and flight-technical data]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1977. 152 (In Russian).
15. Asovskiy V.P., Kuz'menko A.S. Osobennosti opryskivaniya s ispol'zovaniem bespilotnykh vozdushnykh sudov vertoletnogo tipa [Features of spraying with the use of unmanned aerial vehicles of helicopter type]. *Zashchita i karantin rasteni*. 2019. N5. 40-44 (In Russian).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Асовский В.П. – общее научное руководство, формирование программных средств и схемы расчетных исследований, анализ основных технико-технологических показателей, подготовка и доработка текста.

Кузьменко А.С. – анализ исследований по теме, проведение основных и дополнительных многовариантных расчетов, оперативный анализ и графическое представление полученных результатов.

Худоленко О.В. – уточнение моделей технико-экономической оценки и схемы расчетов, сравнительный анализ экономических показателей, формирование общих выводов и редактирование.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Asovskiy V.P. – general scientific leadership, the formation of software tools and schemes of computational studies, analysis of the main technical and technological indicators, preparation and revision of the text.

Kuzmenko A.S. – analysis of research on the topic, carrying out basic and additional multivariate calculations, operational analysis and graphical presentation of the results.

Khudolenko O.V. – refinement of technical and economic assessment models and calculation schemes, comparative analysis of economic indicators, formation of general conclusions and editing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

26.03.2021

03.09.2021

Технический облик беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений

Леонид Анатольевич Марченко¹,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: marchenko1312@mail.ru;
Михаил Васильевич Мызин²,
руководитель проектов,
e-mail: m.myzin@rhc.aero;

Иван Васильевич Кузнецов³,
технический руководитель
по перспективным проектам,
e-mail: i.kuznecov@kamov.ru;
Артем Юрьевич Спиридонов¹,
младший научный сотрудник,
e-mail: artyom-spiridonov@yandex.ru

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

²АО «Вертолеты России», Москва, Российская Федерация;

³АО «Камов», г. Люберцы, Московская область, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что при формировании технического облика беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений необходимо учитывать взаимосвязь беспилотного и наземного авиационных комплексов. (*Цель исследований*) Разработать технический облик беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений. (*Материалы и методы*) Использовали Методические рекомендации по применению средств химизации в системе точного земледелия (ВИМ), нормативно-техническую документацию на беспилотные авиационные системы. (*Результаты и обсуждение*) Разработали блок-схему алгоритма формирования облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения удобрений и пестицидов, включающую разработку как беспилотного, так и наземного авиационных комплексов. Рассчитали аэродинамические характеристики беспилотного воздушного судна с соосной схемой несущих винтов, при взлетной массе 280 килограммов и полезной нагрузке 100 килограммов. Предложили опрыскиватель в виде модульной конструкции. Обосновали структуру наземного авиационного комплекса в виде мобильного транспортировщика-заправщика с базовой транспортной платформой, подъемно-транспортным и заправочным модулями, универсальным наземным пультом управления пилота-оператора. (*Выводы*) Сформировали рациональный технический облик беспилотной авиационной системы вертолетного типа для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Определили летно-технические ограничения при внесении удобрений и пестицидов беспилотным воздушным судном вертолетного типа: полезная нагрузка не менее 100 килограммов, рабочая высота полета 1,0-1,5 метра с огибанием рельефа сельскохозяйственного поля и уходом от возможных препятствий, рабочая скорость полета не выше 60 километров в час, автоматические взлет и посадка на ограниченную площадку, автоматический полет на скорости 60 километров в час на высоте 1 метр в режиме галсирования. Показали, что запас по статическому потолку без влияния земли при полетной массе 280 килограммов составляет 1300 метров, что позволяет летать в горных районах, например для обработки виноградников пестицидами.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, технический облик, беспилотное воздушное судно, наземный комплекс, внесение пестицидов и удобрений.

Для цитирования: Марченко Л.А., Мызин М.В., Кузнецов И.В., Спиридонов А.Ю. Технический облик беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 63-72. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-63-72.

Technical Configurations of a Helicopter Type Unmanned Aerial System for Pesticide and Fertilizer Application

Leonid A. Marchenko¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: marchenko1312@mail.ru;
Mikhail V. Myzin²,
project manager, e-mail: m.myzin@rhc.aero;

Ivan V. Kuznetsov³,
prospective projects technical supervisor,
e-mail: i.kuznecov@kamov.ru;
Artem Yu. Spiridonov¹,
junior researcher, e-mail: artyom-spiridonov@yandex.ru

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

²JSC Russian Helicopters, Moscow, Russian Federation;

³JSC “Kamov”, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation

Abstract. It was noted that when forming the configurations of an unmanned aerial system for pesticide and fertilizer application, it is necessary to take into account the interdependence of unmanned and ground-based aerial systems. (*Research purpose*) To develop the configurations of an unmanned aerial system for pesticide and fertilizer application. (*Materials and methods*) The authors used Methodological recommendations on the use of chemicals in the precision farming system (VIM), regulatory and technical documentation for unmanned aerial systems. (*Results and discussion*) The authors developed a flowchart of the algorithm for forming the configurations of a helicopter type unmanned aerial system for fertilizer and pesticide application, including the formation of both unmanned and ground-based aerial systems. The authors calculated the aerodynamic characteristics of an unmanned coaxial rotor aircraft with a take-off weight of 280 kilograms and a payload of 100 kilograms. A modular-designed sprayer was offered. The authors substantiated the structure of the ground-based aerial complex in the form of a mobile transporter-tanker with a basic transport platform, lifting and transporting and refueling modules, and a universal ground control panel for the pilot-operator. (*Conclusions*) The authors formed reasonable configurations of a helicopter type unmanned aerial system for pesticide and fertilizer differentiated application in the precision farming system. Aircraft performance limitations were identified for the application of fertilizers and pesticides by a helicopter type unmanned aerial vehicle: the payload of at least 100 kilograms, the operating altitude of 1.0-1.5 meters when bypassing the agricultural field topography and avoiding possible obstacles, the operating airspeed kept below 60 kilometers per hour, automatic take-off and landing on a limited area, autoflight at the speed of 60 kilometers per hour at a one meter altitude in a tacking mode. It was showed that the static ceiling margin, without taking the earth influence into account, with a 280-kilogram flight mass, is 1300 meters, which allows flying in mountainous areas, for example, for the treatment of vineyards with pesticides

Keywords: unmanned aerial system, technical configurations, unmanned aerial vehicles, ground-based aerial systems, application of pesticides and fertilizers.

For citation: Marchenko L.A., Myzin M.V., Kuznetsov I.V., Spiridonov A.Yu. Tekhnicheskiy oblik bespilotnoy aviatsionnoy sistemy vertoletnogo tipa dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy [Technical configurations of a helicopter type unmanned aerial system for pesticide and fertilizer application]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 63-72 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-63-72.

Технический облик авиационного комплекса представляет совокупность количественных и качественных показателей (характеристик, параметров, свойств), определяющих его конструктивно-аэродинамическую схему, силовую установку и вид топлива, состав и характеристики модулей бортового оборудования, полезную нагрузку [1]. Технический облик беспилотных воздушных судов (БВС) формируют на основе системного подхода, анализа и синтеза [2-4]. Для оценки эффективности летательных аппаратов предложены показатели экономической, технической, целевой, транспортной, производственной и эксплуатационной эффективности [5-7]. Формирование облика БВС включает при прочих равных условиях аэродинамическую, объемно-массовую и силовую компоновки [8, 9]. Проанализированы критерии эффективности применения БВС: относительная масса полезной нагрузки, время полета, удельная стоимость полета, стоимость жизненного цикла, а также предложена методика определения рационального облика БВС [10, 11]. В зависимости от назначения и постановки задачи в качестве критериев оптимальности целевой функции для воздушного судна (ВС) могут быть приняты также прямые эксплуатационные расходы, себестоимость тонно-километра,

топливная эффективность и др. [12]. Рассмотрен подход к формированию облика БВС вертолетного типа (БВС ВТ) с учетом посадки на сложно движущуюся платформу. Установлено, что БВС ВТ, базирующиеся на платформе, должны иметь объемно-массовые характеристики, оптимизированные в сторону уменьшения размеров полетной и транспортировочной конфигурации в ходе складывания лопастей несущих винтов (НВ) вдоль фюзеляжа и снятия выступающих элементов конструкции. При этом конструктивно-силовую схему определяют исходя из принятой общей компоновки изделия и нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации [13].

Цель исследований – формирование технического облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений.

Материалы и методы. Разработку проводили с учетом «Методических рекомендаций по применению средств химизации в системе точного земледелия» (ВИМ, 2016), нормативно-технической документации: ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения; ГОСТ 56122-2014. Воздушный транспорт. Беспилотные авиационные системы. Общие требования; ГОСТ 20058. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины,

определения, обозначения, Циркуляр 328 ИКАО. Беспилотные авиационные системы (БАС), Правила проведения авиационно-химических работ в соответствии с Приказом Минтранса РФ от 17.07.2008 № 108 (ред. от 23.06.2009) «Об утверждении федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации».

Результаты и обсуждение. На основании методики структурно-параметрического синтеза конструктивно-компоновочного облика беспилотного летательного аппарата [3, 4, 10] и методики формирования облика беспилотного воздушного судна вертолетного типа [11, 13] разработана блок-схема алгоритма формирования облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа (БАС ВТ) для внесения пестицидов и удобрений (рис. 1).

БАС составляет основу технологии дифференцированного внесения пестицидов и удобрений и включает:

- беспилотный авиационный комплекс (БАК), содержащий определенное число БВС для мониторинга сельскохозяйственных угодий, а также для внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов;
- наземный авиационный комплекс (НАК), представленный техническими средствами транспортировки БВС к сельскохозяйственному полю, заправки топливом, рабочими жидкостями пестицидов и удобрений, взлетно-посадочными техническими средствами, наземным пунктом пилота-оператора.

Отдельными модулями входят [14]:

- средства интеграции с другими системами в воздушном пространстве;
- средства ремонта и технического обслуживания;
- вспомогательные средства;
- эксплуатационно-техническая документация;
- технический персонал.

При формировании технического облика БАС для внесения пестицидов и удобрений важно учитывать взаимосвязь БАК и НАК.

Для внесения средств защиты растений и удобрений в системе точного земледелия предпочтительны БВС многоразового использования, безаэродромного базирования, с небольшой разбежкой для взлета или с вертикальным взлетом и вертикальной посадкой, низковысотные, вертолетного, винтокрылого и мультироторного типов, оснащенные автопилотом и системой дифференцированного распределения рабочих жидкостей удобрений и пестицидов по заданной программе, разработанной в соответствии с агрохимической картограммой и картой фитосанитарного состояния поля [14, 15].

Определены летно-технические ограничения при внесении удобрений и пестицидов БВС ВТ:

- полезная нагрузка не менее 100 кг;
- рабочая высота полета 1,0-1,5 м с огибанием ре-

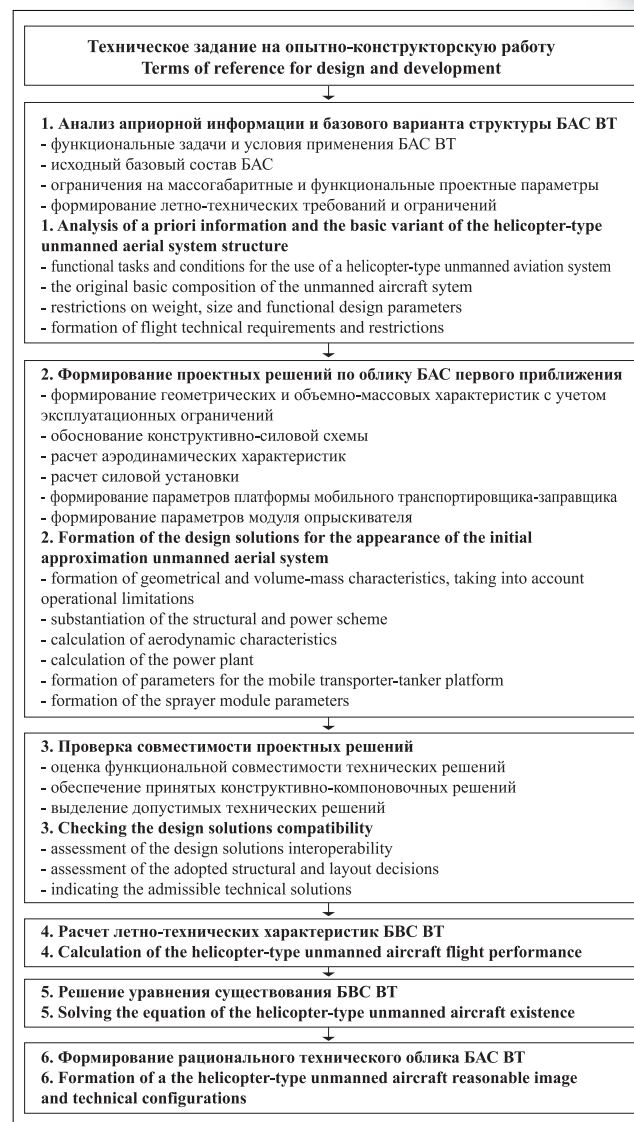


Рис. 1. Блок-схема формирования облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа

Fig. 1 Flowchart for forming the configurations of a helicopter type unmanned aerial system

льефа сельскохозяйственного поля и уходом от возможных препятствий;

- рабочая скорость полета не выше 60 км/ч;
- автоматические взлет и посадка на ограниченную площадку;
- автоматический полет на скорости 60 км/ч на высоте 1 м в режиме галсирования [16].

На базе вертолета Ка-137 разработано БВС вертолетного типа БВС-137 ВИМ соосной схемы для внесения пестицидов [17]. Определяющим в аэродинамической характеристике вертолета стало количество НВ. Симметричная аэродинамическая соосная схема НВ, в отличие от традиционной одновинтовой, включает протяженную механическую трансмиссию рулевого винта и, как следствие, сам рулевой винт. Это позволяет вертолету взлетать с площадок небольшого размера при ветровой нагрузке с любого направ-

ления, обеспечивает высокую маневренность и стабильность при полетах на разных высотах, что повышает безопасность применения беспилотного вертолета. Однако сферическая форма фюзеляжа недостаточно оптимальна с точки зрения его внутренней компоновки, удобства технического обслуживания и эксплуатации вертолета (рис. 2). Поэтому было разработано БВС ВТ с аэродинамической компоновкой фюзеляжа традиционной формы с хвостовой балкой, горизонтальным и вертикальным оперением (рис. 3).



Рис. 2. Общий вид БВС-137 ВИМ на базе беспилотного вертолета Ка-137

Fig. 2. General view of BVS-137 VIM based on the Ka-137 unmanned helicopter

Некоторые геометрические параметры и летно-технические характеристики вертолетов показывают перспективность аэродинамической компоновки БВС-137 ВИМ (таблица).

В аэродинамических расчетах использовали следующие основные исходные данные:

- максимальная взлетная масса, кг 280;
- объем топливного бака, л 60;
- диаметр НВ, м 5,3;
- хорда лопасти, мм 120;
- количество лопастей, шт. 4;



Рис. 3. Общий вид БВС-137 ВИМ традиционной схемы

Fig. 3. General view of BVS-137 VIM of the traditional scheme

- коэффициент заполнения НВ 0,058;
- окружная скорость концов лопастей, м/с 180;
- площадь миделева сечения, м² 0,684;
- вредная пластинка $C_x S$, м² 0,572;
- профильная компоновка лопасти – на базе аэродинамического профиля *NACA 230-12*.

К основным аэродинамическим характеристикам относятся также силы и моменты на фюзеляже, зависящие от угла атаки и угла скольжения:

$$c_{xa} = f(\alpha); c_{ya} = f(\alpha); c_{z\phi} = f(\beta); \quad (1)$$

$$m_{x\phi} = f(\beta); m_{y\phi} = f(\alpha); m_{z\phi} = f(\alpha), \quad (2)$$

где α – угол атаки фюзеляжа, град.;

β – угол скольжения фюзеляжа, град.;

c_{xa} – коэффициент сопротивления фюзеляжа;

c_{ya} – коэффициент подъемной силы фюзеляжа;

$c_{z\phi}$ – коэффициент боковой силы фюзеляжа;

$m_{x\phi}$ – коэффициент поперечного момента фюзеляжа;

$m_{y\phi}$ – коэффициент путевого момента фюзеляжа;

m_z – коэффициент продольного момента фюзеляжа.

В расчетах использовали коэффициенты численных аэродинамических продольных сил и момента, полученные с использованием промышленного пакета программ вычислительной гидродинамики *ANSYS CFX*.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТОЛЕТОВ COMPARATIVE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE HELICOPTERS		
Показатели / Indicators	Ка-137 / Ka-137	БВС-137ВИМ / BVS-137 VIM
Площадь миделева сечения, м ² Midsection area, m ²	1,130	0,684
Вредная пластинка $C_x S$, м ² Harmful plate $C_x S$, m ²	0,700	0,357
Максимальная скорость полета, км/ч Maximum flight speed, km/h	125	160
Максимальная скороподъемность, м/с Maximum rate of climb, m/s	8,9	9,5
Часовой расход при полете на скорости 60 км/ч, кг/ч Hourly consumption at a flight speed of 60 km/h, kg/h	18,9	18,7
Продолжительность полета на скорости 60 км/ч при запасе топлива на полет 20 кг/ч, ч Flight duration at a speed of 60 km/h with a fuel reserve for the flight of 20 kg/h, h	1,06	1,07
Дальность полета на скорости 60 км/ч при запасе топлива на полет 20 кг/ч, км Flight range at a speed of 60 km/h with the flight fuel range of 20 kg/h, km	63,6	64,2

Рассмотрим зависимость коэффициентов лобового сопротивления фюзеляжа $c_{ха}$, подъемной силы c_{ya} и момента тангажа m_z от угла атаки фюзеляжа α_ϕ (рис. 4).

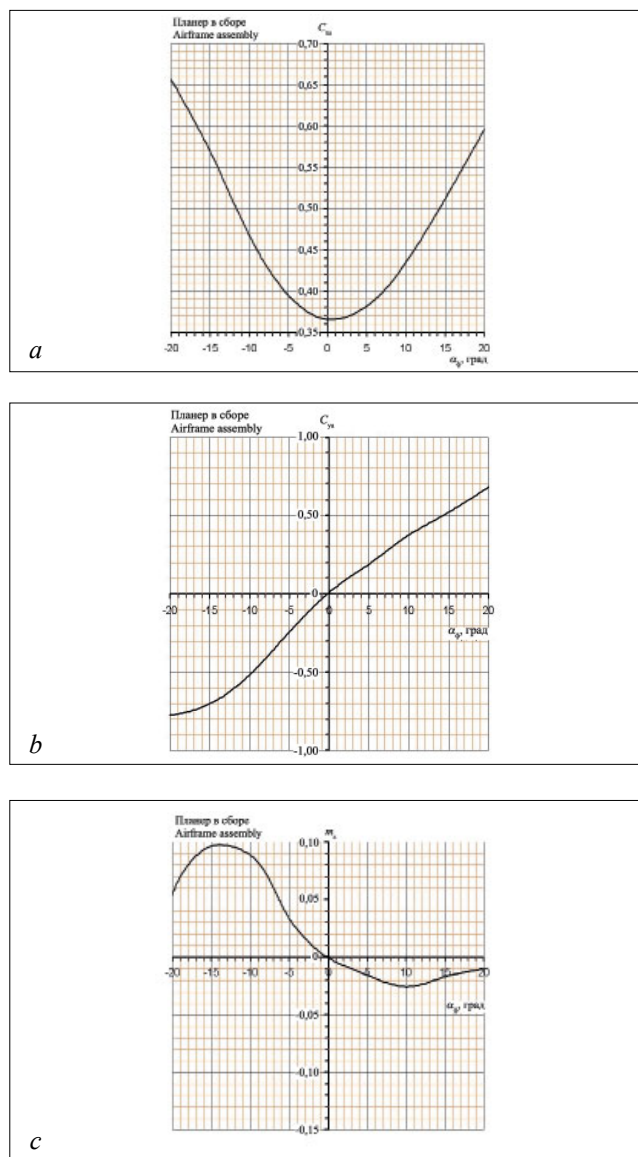


Рис. 4. Влияние угла атаки фюзеляжа α_ϕ на: а – коэффициент лобового сопротивления $c_{ха}$; б – коэффициент подъемной силы c_{ya} ; в – момент тангажа m_z

Fig. 4. Influence of the fuselage attack angle α_ϕ on: a – drag coefficient $c_{ха}$; b – lift coefficient c_{ya} ; c – pitching moment m_z

Наименьшее значение коэффициента лобового сопротивления фюзеляжа будет при угле атаки примерно 1° . В пределах изменения угла атаки от минус $0,5^\circ$ до $2,5^\circ$ коэффициент подъемной силы изменяется незначительно – от 0,02 до 0,10. Коэффициент подъемной силы фюзеляжа равен нулю на углах атаки, также равных нулю, что свидетельствует об аэродинамической симметрии фюзеляжа. Следовательно, рационально осуществлять полет на углах атаки фюзеляжа от минус $0,5^\circ$ до $2,5^\circ$. При этом коэффициент мо-

мента тангажа изменяется незначительно – от 0 до 0,01, что говорит об устойчивости полета.

Потребная мощность, подводимая к НВ, при создании потребной тяги зависит от скорости полета и барометрической высоты (рис. 5).

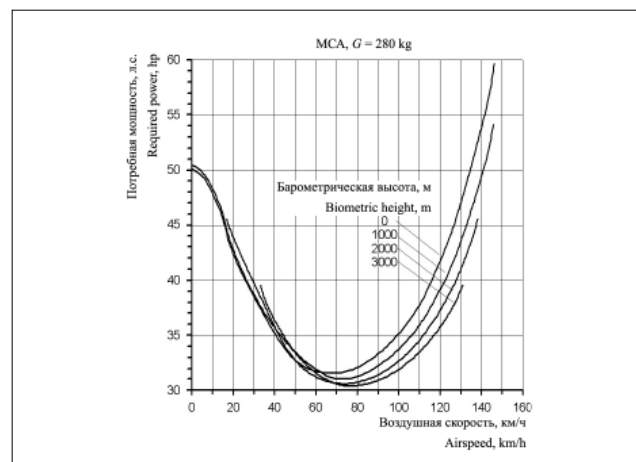


Рис. 5. Зависимость потребной мощности от скорости полета и барометрической высоты

Fig. 5. Dependence of the required power on the flight speed and barometric altitude

Полная потребная мощность достаточно велика в режиме висения и сравнима с максимальными значениями потребной мощности, обеспечивающими наибольшие значения скорости полета на различных барометрических высотах, достигает минимума в середине диапазона скоростей и возрастает с повышением скорости полета вследствие роста вредных потерь. Наименьшее значение потребной мощности при нулевой барометрической высоте имеет место при скорости полета в пределах 60-70 км/ч. В диапазоне рабочих скоростей полета 40-60 км/ч при внесении пестицидов и удобрений потребная мощность составляет 32-35 л.с.

В рабочих пределах скорости 40-60 км/ч и при нулевой барометрической высоте часовой расход топлива не превышает 14 кг/ч, а километровый расход топлива составляет 0,22-0,35 кг/ч (рис. 6, 7).

Запас по статическому потолку без влияния земли при полетной массе 280 кг составляет 1300 м, что позволяет летать в горных районах, например при обработке пестицидами виноградников (рис. 8).

Уравнение существования (массового баланса) летательного аппарата в первом приближении отображает связь взлетной массы со структурными элементами [18]:

$$m_0 = m_{\text{кон}} + m_{\text{cy}} + m_{\text{об.с.у}} + m_{\text{т}} + m_{\text{пн}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{кон}}$ – масса конструкции, кг;

m_{cy} – масса силовой установки, кг;

$m_{\text{об.с.у}}$ – масса бортового оборудования и систем управления, кг;

$m_{\text{т}}$ – масса топлива, кг;

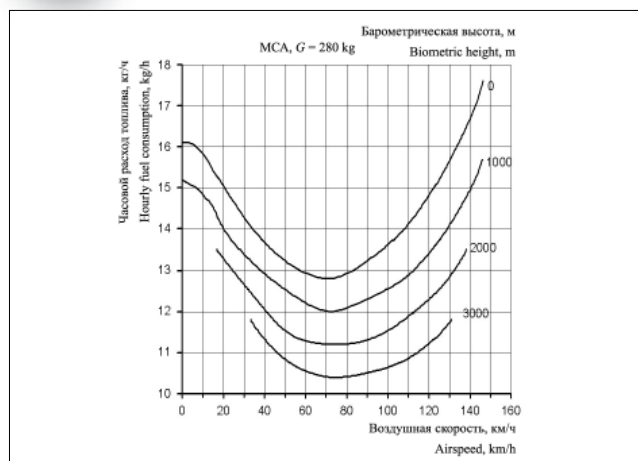


Рис. 6. Зависимости часового расхода топлива от скорости полета и барометрической высоты

Fig. 6. Dependence of hourly fuel consumption on flight speed and barometric altitude

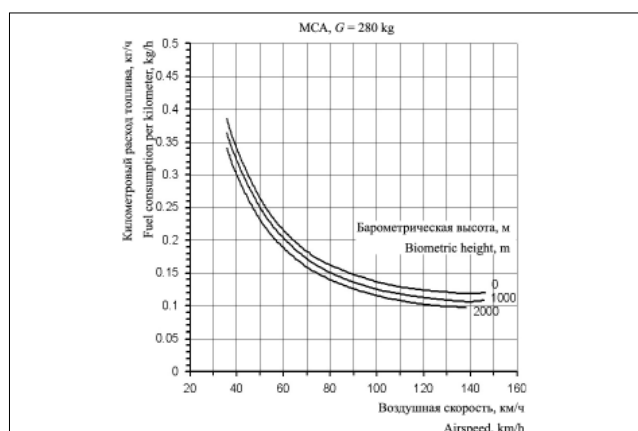


Рис. 7. Зависимости километровых расходов топлива от скорости полета и барометрической высоты

Fig. 7. Dependence of fuel consumption per kilometer on flight speed and barometric altitude

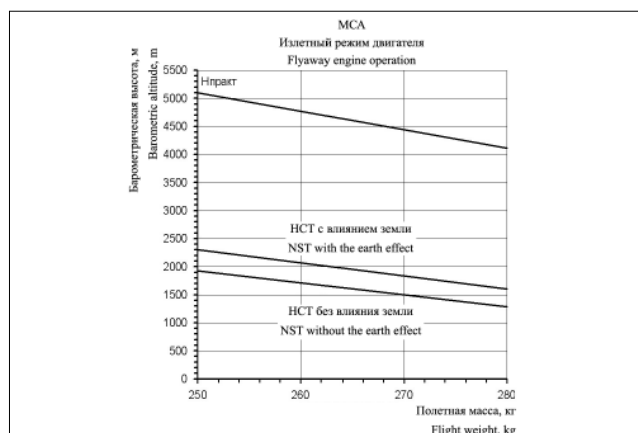


Рис. 8. Зависимости практических и статических потолков (с влиянием земли и без него) от полетной массы на взлетном режиме работы двигателя

Fig. 8. Dependence of practical and static ceilings (with and without the earth effect) on the flight weight in the takeoff engine operation mode

$m_{\text{пн}}$ – масса полезной нагрузки, кг.

Разделив каждый член (9) на m_0 , получим уравнение существования в относительном виде, позволяющем сравнивать летательные аппараты по степени использования единицы массы:

$$1 = \bar{m}_{\text{кон}} + \bar{m}_{\text{сy}} + \bar{m}_{\text{об.сy}} + \bar{m}_{\text{т}} + \bar{m}_{\text{пн}}. \quad (4)$$

Применение БВС ВТ для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений приводит к перераспределению его весовой структуры в сторону увеличения полезной нагрузки (массы загружаемой рабочей жидкости, оборудования для ее распределения, бортового оборудования, систем управления) и уменьшения массы топлива на борту. Описана функциональная связь относительной массы полезной нагрузки с основными ее компонентами и технологическими параметрами [19].

У большинства вертолетов соосной схемы центр масс совпадает с осью, проходящей через НВ. Поэтому следует проектировать оборудование таким образом, чтобы при установке на воздушное судно его центр масс совпадал с центром масс вертолета либо не оказывал существенного влияния на развесовку. Общая масса проектируемого оборудования должна соответствовать следующим условиям:

$$m_0 + m_{\text{рж}} \leq 0,85 m_{\text{п}}, \quad (5)$$

где m_0 – масса оборудования, кг;

$m_{\text{рж}}$ – масса рабочей жидкости, кг;

$m_{\text{пн}}$ – максимальная масса полезной нагрузки летательного аппарата, кг.

Такой подход к оценке предельно допустимого веса изделия связан с тем, что емкости, содержащие жидкости, при транспортировке создают высокие динамические нагрузки. Во избежание превышения нормативных эксплуатационных показателей нагрузок рекомендуется иметь запас нагружения, выраженный в 10-15% размера от максимально допустимой массы полезной нагрузки. Габаритные характеристики оборудования должны соответствовать следующим условиям:

$$l_{\text{ш}} \leq 0,85 L_{\text{НВ}}; \quad (6)$$

$$b_0 < b_{\text{ф}}, \quad (7)$$

где $l_{\text{ш}}$ – общая ширина штанги модуля опрыскивателя, м;

$L_{\text{НВ}}$ – диаметр НВ вертолета, м;

b_0 – общая ширина навесных модулей оборудования, м;

$b_{\text{ф}}$ – ширина фюзеляжа воздушного судна, м.

Длину и высоту модулей оборудования, а также способы их крепления выбирают индивидуально, исходя из конструктивных особенностей конкретной модели. Наиболее рационально исполнение опрыскивателя в виде конструкции, включающей четыре основных модуля:

- размещения рабочей жидкости;
- подачи и регулирования расхода рабочей жидкости;
- диспергирования;
- управления (рис. 9).

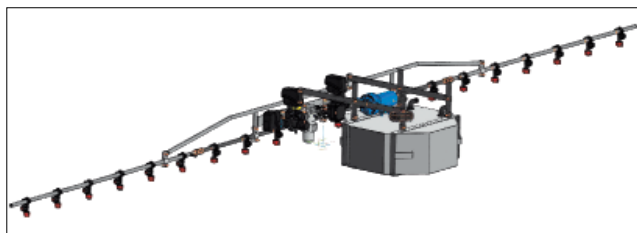


Рис. 9. Оборудование для внесения средств защиты растений и удобрений к летательному аппарату вертолетного типа соосной схемы

Fig. 9 Plant protection and fertilizer application equipment for a helicopter type aircraft of a coaxial design

В качестве материалов для изготовления авиационного опрыскивателя наиболее оптимальны, при учете соотношения масса/прочность, дюралюминий марки Д16Т либо сплавы на основе алюминия с аналогичными прочностными характеристиками. Коллектор штанги для подачи рабочих жидкостей целесообразнее изготовить из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, поскольку многие пестициды и удобрения представлены химически агрессивными веществами. Для баков лучше использовать композитные материалы (кевлар, углепластик), блочный полиамид марки ПА-6 или их аналоги, так как они имеют меньшую плотность и, соответственно, массу, однако обладают достаточным запасом прочности.

Поскольку рабочее напряжение бортовой сети БВС вертолетного типа находится в пределах 12-24 В, электрооборудование опрыскивателя должно иметь соответствующее напряжение питания. При наличии слаботочных элементов, относящихся преимущественно к системам управления (напряжение 3,6; 5 В и т.д.), в схему электрооборудования следует включить преобразователи, понижающие напряжение до конкретных значений, предусмотренных для бортовых приборов. Основу НАК составляет мобильный транспортировщик-заправщик, предназначенный для транспортировки БВС-137 ВИМ к сельскохозяйственному полю, заправки рабочей жидкостью и топливом. Его конструкция имеет ряд модулей:

- базовый транспортный;
- подъемно-транспортный;
- заправочный топливом и рабочей жидкостью пестицидов и удобрений;
- универсальный наземный пульт управления пилота-оператора (НПУ).

НПУ может быть сформирован с использованием стандартных компонентов, входящих в состав автоматизированной системы управления воздушным движением [20].

В состав мобильного транспортировщика-заправщика входят:

- автомобиль повышенной проходимости с длиномерной платформой, оснащенный краном-манипулятором;
- емкость цилиндрическая горизонтальная для воды;
- миксер для приготовления рабочей жидкости;
- емкость для промывочной воды;
- насос для рабочей жидкости;
- емкость для топлива;
- бочковой комплект для заправки топливом;
- ящик для хранения канистр с пестицидами;
- ящики с ЗИП и средствами гигиены.

Грузоподъемность автомобиля с краном-манипулятором выбрана с учетом взлетной массы БВС, объема воды, средств химизации и топлива для обеспечения бесперебойной работы на одну смену – 2300 кг. Вместимость емкости для хранения воды, равная 1000 л, рассчитана для приготовления рабочей жидкости средств химизации с учетом того, что средняя доза внесения равна 10 л/га, средняя производительность БВС-137 ВИМ – 14,1 га/ч, продолжительность рабочей смены – 6 ч. Вместимость миксера 100 л выбрана с учетом емкости для рабочей жидкости. Модель крана-манипулятора КМУ UNICURV-374 осуществляет подъем и спуск БВС-137 ВИМ с грузовой платформы на почву (грузовой момент 7,87 т/м, грузоподъемность с минимальным вылетом стрелы 3,03 т/2,6 м, грузоподъемность с максимальным вылетом – 4,8 т/9,8 м). Производительность насоса для заправки емкости рабочей жидкостью составляет 110 л/мин, обеспечивая заправку емкости БВС за 0,5 мин. Бочковой комплект предусмотрен для заправки БВС топливом за 0,5 мин.

Выводы. Разработали блок-схему алгоритма формирования облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения удобрений и пестицидов, включающую формирование как беспилотного, так и наземного авиационных комплексов. Описали функциональные задачи и условия применения беспилотной авиационной системы, направленные на дифференцированное внесение пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Установили исходный базовый состав БАС, объединяющий беспилотный и наземный авиационные комплексы для выполнения всего спектра технологических операций по дифференцированному внесению удобрений и пестицидов в точном земледелии.

Определили летно-технические ограничения при внесении удобрений и пестицидов БВС ВТ: полезная нагрузка не менее 100 кг, рабочая высота полета 1,0-1,5 м с огибанием рельефа сельскохозяйственного поля и уходом от возможных препятствий, рабочая скорость полета не выше 60 км/ч, автоматические взлет и посадка на ограниченную площадку, автоматический полет на скорости 60 км/ч на высоте 1 м в режи-

ме галсирования. Сформировали геометрические и объемно-массовые характеристики БВС ВТ с аэродинамической компоновкой фюзеляжа традиционной формы с хвостовой балкой, горизонтальным и вертикальным оперением, соосной схемой несущих винтов, при взлетной массе 280 кг.

Показали, что запас по статическому потолку БВС ВТ без влияния земли при полетной массе 280 кг составляет 1300 м, что позволяет летать в горных районах, например для обработки виноградников пестицидами.

Предложили исполнение опрыскивателя для БВС ВТ в виде модульной конструкции. Представили структуру наземного авиационного комплекса, основу которой составляет мобильный транспортировщик-заправщик. Сформировали рациональный технический облик БВС ВТ для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барковский В.И., Скопец Г.М., Степанов В.Д. Методология формирования технического облика экспортно-ориентированных авиационных комплексов. М.: Физматлит. 2008. 243 с.
2. Полтавский А.В., Маклаков В.В., Аверкин А.Е., Полохов А.Н., Бородуля В.М., Бурба А.А., Семенов С.С., Седых Ю.И. Системные принципы создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов. М.: ИПУ РАН. 2010. 102 с.
3. Гусейнов А.Б. Методика структурно-параметрического синтеза конструктивно-компоновочного облика беспилотного летательного аппарата // *Труды МАИ*. 2014. N49. С. 1-14.
4. Гусейнов А.Б., Маховых А.В. Методика формирования рационального облика бортового комплекса радиолокационной защиты беспилотного летательного аппарата // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2017. Т. 20. N5. С. 98-106.
5. Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. Great Britain. Wiltshire. 2011. 365.
6. Valavanis K.P., George J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Netherlands. Springer. 2014. 22-30.
7. Duan H., Li P. Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles. Springer. 2014. 269.
8. Roskam J. Airplane Design, Part IV. DARcorporation. Lawrence, KS. 2007. 403.
9. Проектирование самолетов / под ред. С.М. Егера. М.: Машиностроение. 1983. 616 с.
10. Серебрянский С.А., Парненков А.Е. Подход к формированию технического облика беспилотного воздушного судна // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2019. Т. 19. N3. С. 43-52.
11. Анцев В.Г., Быков В.А., Парненков А.Е. Обоснование критерия эффективности при формировании технического облика беспилотного воздушного судна вертолетного типа // *Вопросы радиоэлектроники*. 2019. N9. С. 63-67.
12. Припадчев А.Д., Межуева Л.В., Султанов Н.З. Концептуальные основы проектирования облика летательного аппарата // *Фундаментальные исследования*. 2013. N6. С. 561-564.
13. Быков В.А., Парненков А.Е. Формирование облика беспилотного воздушного судна вертолетного типа с учетом посадки на сложновдвижущуюся платформу // *Вопросы радиоэлектроники*. 2020. N3. С. 16-22.
14. Марченко Л.А., Артюшин А.А., Смиронов И.Г., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю., Курбанов Р.К. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N5. С. 38-45.
15. Марченко Л.А., Мочкова Т.В., Курбанов Р.К., Краснородько В.В. Основные требования к беспилотным летательным аппаратам для внесения удобрений и пестицидов // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 107-112.
16. Марченко Л.А., Личман Г.И., Смиронов И.Г., Мочкова Т.В., Колесникова В.А. Дифференцированное внесение удобрений и пестицидов с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N3. С. 17-23.
17. Марченко Л.А., Мызин М.В., Кузнецов И.В., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотное воздушное судно вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 61-68.
18. Шейнин В.М., Козловский В.И. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов. Т.1. Весовой расчет и весовое проектирование. М.: Машиностроение, 1977. 344 с.
19. Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. N3. С. 17-23.
20. Токарев Ю.П., Макеев М.Р., Юмаев К.Р. Построение комплекса управления беспилотными летательными аппаратами с использованием стандартных компонентов // *Информатика, телекоммуникационное управление*. 2010. N6(113). С. 56-59.

REFERENCES

1. Barkovskiy V.I., Skopets G.M., Stepanov V.D. Metodologiya formirovaniya tekhnicheskogo oblika eksportno-orientirovannykh aviatsionnykh kompleksov [Methodology for the formation of the technical configurations of export-oriented aviation complexes]. Moscow: Fizmatlit. 2008. 243 (In Russian).
2. Poltavskiy A.V., Maklakov V.V., Averkin A.E., Polokhov A.N., Borodulya V.M., Burba A.A., Semenov S.S., Sedykh Yu.I. Sistemnye printsipy sozdaniya i primeneniya mnogotselyvykh kompleksov bespilotnykh letatel'nykh apparatov [System principles for creating and using multipurpose complexes of unmanned aerial vehicles]. Moscow: IPU RAN. 2010. 102 (In Russian).
3. Guseynov A.B. Metodika strukturno-parametricheskogo sinteza konstruktivno-komponovochного oblika bespilotnogo letatel'nogo apparata [Technique for the structural and parametric synthesis of the design and configurations of an unmanned aerial vehicle]. *Trudy MAI*. 2014. N49. 1-14 (In Russian).
4. Guseynov A.B., Makhovykh A.V. Metodika formirovaniya ratsional'nogo oblika bortovogo kompleksa radiolokatsionnoy zashchity bespilotnogo letatel'nogo apparata [The method of forming a rational aspect of the onboard complex of radar defense unmanned aerial vehicle]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2017. Vol. 20. N5. 98-106 (In Russian).
5. Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. Great Britain. Wiltshire. 2011. 365 (In English).
6. Valavanis K.P., George J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Netherlands. Springer. 2014. 22-30 (In English).
7. Duan H., Li P. Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles. Springer. 2014. 269 (In English).
8. Roskam J. Airplane Design, Part IV. DARcorporation. Lawrence. KS. 2007. 403 (In English).
9. Proektirovanie samoletov [Aircraft design]. pod red. S.M. Egera. Moscow: Mashinostroenie. 1983. 616 (In Russian).
10. Serebryanskiy S.A., Parnenkov A.E. Podkhod k formirovaniyu tekhnicheskogo oblika bespilotnogo vozdušnogo sudna [Approach to shaping the technical appearance of an unmanned aerial vehicle]. *Vestnik YUrGU. Seriya «Mashinostroenie»*. 2019. Vol. 19. N3. 43-52 (In Russian).
11. Antsev V.G., Bykov V.A., Parnenkov A.E. Obosnovanie kriteriya effektivnosti pri formirovanii tekhnicheskogo oblika bespilotnogo vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa [Justification of efficiency criterion in formation of technical appearance of a helicopter-type unmanned aircraft]. *Voprosy radioelektroniki*. 2019. N9. 63-67 (In Russian).
12. Pripadchev A.D., Mezhueva L.V., Sultanov N.Z. Kontseptual'nye osnovy proektirovaniya oblika letatel'nogo apparata [The conceptual bases aircraft figure desingning]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. N6. 561-564 (In Russian).
13. Bykov V.A., Parnenkov A.E. Formirovanie oblika bespilotnogo vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa s uchetom posadki na slozhnodvizhushchuyusya platformu [Formation of appearance of helicopter-type unmanned airvehicle with consideration of landing on complex-moving platform]. *Voprosy radioelektroniki*. 2020. N3. 16-22 (In Russian).
14. Marchenko L.A., Artyushin A.A., Smironov I.G., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Tekhnologiya vneseniya pestitsidov i udobreniy bespilotnymi letatel'nyimi apparatami v tsifrovom sel'skom khozyaystve [Technology of Pesticides and Fertilizers Application with Unmanned Aerial Vehicles in Digital Agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 38-45 (In Russian).
15. Marchenko L.A., Mochkova T.V., Kurbanov R.K., Krasnoborod'ko V.V. Osnovnye trebovaniya k bespilotnym letatel'nyim apparatam dlya vneseniya udobreniy i pestitsidov [Basic requirements for unmanned aerial vehicles for fertilizer and pesticides]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 107-112 (In Russian).
16. Marchenko L.A., Lichman G.I., Smironov I.G., Mochkova T.V., Kolesnikova V.A. Differentsirovannoe vnesenie udobreniy i pestitsidov s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Variable rate application of fertilizers and pesticides using unmanned aerial vehicles]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017. N3. 17-23 (In Russian).
17. Marchenko L.A., Myzin M.V., Kuznetsov I.V., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu. Bespilotnoe vozdušnnoe sudno vertoletnogo tipa dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy [Unmanned helicopter type aircraft for the pesticides and fertilizers application]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 61-68 (In Russian).
18. Sheynin V.M., Kozlovskiy V.I. Vesovoe proektirovanie i effektivnost' passazhirskikh samoletov [Weight design and efficiency of passenger aircraft.]. Vol. 1. Vesovoy raschet i vesovoe proektirovanie. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 344 (In Russian).
19. Smirnov I.G., Marchenko L.A., Lichman G.I., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu. Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy [Unmanned aerial vehicles for pesticides and fertilizers application in precision farming system]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017. Vol. 11. N3. 17-23 (In Russian).
20. Tokarev Yu.P., Makeev M.R., Yumaev K.R. Postroenie kompleksa upravleniya bespilotnymi letatel'nyimi apparatami s ispol'zovaniem standartnykh komponentov [The construction of a control complex for unmanned aerial vehicles using standard components]. *Informatika, telekommunikatsionnoe upravlenie*. 2010. N6(113). 56-59 (In Russian).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Марченко Л.А. – постановка задачи исследования, анализ априорной информации и базового варианта структуры беспилотной авиационной системы, разработка теоретических предпосылок, анализ результатов исследований, написание текста статьи, формирование выводов.

Мызин М.В. – формирование геометрических и объемно-массовых характеристик БВС ВТ, обоснование конструктивно-силовой схемы, анализ аэродинамических характеристик БВС ВТ.

Кузнецов И.В. – расчет летно-технических характеристик БВС ВТ.

Спиридонов А.Ю. – формирование параметров платформы мобильного транспортировщика-заправщика и параметров модуля опрыскивателя.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Marchenko L.A. – setting the research problem, analysis of a priori information and the basic version of the unmanned aviation system structure, development of theoretical premises, analysis of research results, writing the article text, formation of conclusions.

Myzin M.V. – formation of geometrical and volumetric-mass characteristics of a helicopter-type unmanned aircraft, substantiation of the structural and power scheme, analysis of aerodynamic characteristics of a helicopter-type unmanned aircraft.

Kuznetsov I.V. – calculation of flight performance characteristics for a helicopter-type unmanned aircraft.

Spiridonov A.Yu. – formation of the mobile transporter-tanker platform and sprayer module parameters.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

16.07.2021
13.09.2021

Разработка энергоэффективной системы микроклимата для беспривязного содержания дойного стада

Игорь Мамедярович Довлатов,
кандидат технических наук, научный сотрудник,
e-mail: dovlatovim@mail.ru;

Сергей Сергеевич Юрочка,
младший научный сотрудник,
e-mail: yurochkasr@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Изучили научно-техническую литературу, посвященную влиянию микроклимата на продуктивность молочного скота. Установили, что отклонение параметров микроклимата в зданиях от определенных предельных значений снижает надой на 10-20 процентов, уменьшает прирост живой массы на 20-30 процентов, увеличивает падеж молодняка на 5-40 процентов, сокращает количество лактаций на 15-20 процентов по стаду. *(Цель исследования)* Провести обзор современных систем микроклимата и их технической реализации для животноводческих помещений, предложив оптимальный вариант при снижении энергозатрат. *(Материалы и методы)* Привели схему классификации систем микроклимата. Представили в одном рисунке факторы, влияющие на микроклимат животноводческих помещений. Определили основные функции систем вентиляции в животноводстве. Описали условия применения естественной и принудительной (тоннельной) систем вентиляции. Представили устройства для изменения микроклимата в помещениях. Рассмотрели возможность использования перекрытого гребня в зоне конька крыши для увеличения воздушного потока и минимизации проникновения влаги. *(Результаты и обсуждение)* Для экономии энергопотребления предложили вместо системы приточной вентиляции перейти на естественно-гибридную, которая содержит систему удаления воздуха, осветительное оборудование, нагревательные элементы, датчики, вентиляторы с распылительными форсунками, створки. *(Выводы)* Установили, что естественная вентиляция летом не способна предотвратить тепловой стресс от коров. Определили, что при тепловом стрессе в течение 60 дней убытки могут составить 4,2 миллиона рублей. Для обеспечения оптимальных условий микроклимата и снижения затрат от теплового стресса предложили использовать инновационную естественно-гибридную систему вентиляции. В ходе расчетов выявили, что энергопотребление предлагаемой системы в течение 60 дней равно 264 тысячам рублей.

Ключевые слова: микроклимат животноводческих помещений, системы вентиляции, естественная вентиляция, принудительная вентиляция, комбинированные системы, естественно-гибридная система вентиляции.

Для цитирования: Довлатов И.М., Юрочка С.С. Современные системы микроклимата и их техническая реализация для животноводческих помещений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 73-80. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80.

Development of an Energy-Efficient Microclimate System for Dairy Herd Loose Keeping

Igor M. Dovlatov,
Ph.D.(Eng.), researcher, e-mail: dovlatovim@mail.ru;

Sergey S. Yurochka,
junior researcher, e-mail: yurochkasr@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors studied the scientific and technical literature regarding the microclimate influence on dairy cattle productivity. It was found out that the building microclimate parameter deviation from certain limit values reduces milk yield by 10-20 percent decrease the live weight gain by 20-30 percent increases the mortality of young animals by 5-40 percent and reduces the number of lactations by 15-20 percent for the herd. *(Research purpose)* To conduct a survey of modern microclimate systems and their technical implementation for livestock buildings, suggesting the best option while reducing energy costs. *(Materials and methods)* A classification scheme was provided for microclimate systems. The factors affecting the microclimate of livestock premises were presented in one figure. The main functions of ventilation systems in animal husbandry were identified. The conditions for the use of natural and forced (tunnel) ventilation systems were described. The devices for changing the microclimate on the premises were presented. The possibility of using an overlapped ridge in the area of the roof ridge was considered to catch the airflow and

minimize moisture penetration. (*Results and discussion*) To decrease energy consumption, it was proposed to shift from a supply ventilation system to a natural and hybrid ventilation system, which contains an air removal system, lighting equipment, heating elements, sensors, fans with spray nozzles, sashes. (*Conclusions*) It was found out that in summer, natural ventilation is unable to prevent heat stress from cows. It was determined that in case of heat stress within 60 days, losses could amount to 4.2 million rubles. To ensure optimal microclimate conditions and reduce costs from heat stress, it was proposed to use an innovative natural and hybrid ventilation system. The calculations showed that a 60-day energy consumption of the proposed system equals 264 thousand rubles.

Keywords: microclimate of livestock premises, ventilation systems, natural ventilation, forced ventilation, combined systems, natural and hybrid ventilation system.

For citation: Dovlatov I.M., Yurochka S.S. Razrabotka energoeffektivnoy sistemy mikroklimata dlya besprivyaznogo soderzhaniya doynogo stada [Development of an energy-efficient microclimate system for dairy herd loose keeping]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 73-80 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-73-80.

Для проявления высокого потенциала продуктивности животных необходимо обеспечить им оптимальные условия микроклимата в помещениях.

Отклонение параметров микроклимата в зданиях от определенных предельных значений снижает надой на 10-20%, уменьшает прирост живой массы на 20-30%, увеличивает падеж молодняка на 5-40%, сокращает количество лактаций на 15-20% по стаду повышает затраты на ремонт технологического оборудования, на единицу продукции, уменьшает срок службы животноводческих зданий в 3 раза [1, 2].

Ежегодно из помещений животноводческих ферм России требуется удалять 166 млрд м³ водяных паров, 39 млрд м³ углекислого газа, 1,8 млрд м³ аммиака, 700 тыс. м³ сероводорода, 82 тыс. т пыли, патогенную микрофлору [2].

Между специалистами часто возникают разногласия о влиянии отклонений параметров микроклимата от оптимальных значений на продуктивные качества животных. При этом к настоящему времени накоплен огромный объем эмпирического материала [3].

Установлено, что при тепловом стрессе у коров повышается ректальная температура – с нормальной 38,8 до 39,2°C, количество потребления сухого вещества снижается, а среднесуточный надой уменьшится на 7,5 кг [4].

При снижении температуры на 5°C можно увеличить среднесуточный надой с 35 до 45 кг [5]. Оптимальная температура для молочных коров – 10-15°C. В этом диапазоне животные чувствуют себя максимально комфортно, и энергия организма направлена на производство молока. При повышении температуры увеличиваются дыхательная активность, потребление воды, снижаются двигательная активность, потребление корма, что отрицательно сказывается на продуктивности.

Тепловой стресс имеет наибольшую отрицательную корреляцию с удоями [6]. На каждый градус повышения температуры от оптимального значения 10-

15°C среднесуточные надой снижаются на 0,88 кг.

Выявлен эффект запоздалости влияния теплового стресса на снижение частоты доения на период 24-48 ч [7].

Есть немало обзорных статей по системам микроклимата на различных промышленных комплексах. Однако не было проведено всестороннего обзора, который позволил бы понять достижения и оценить потенциал различных систем микроклимата в сельскохозяйственных зданиях.

Цель исследований – изучить современные системы микроклимата, определить оптимальные варианты их технической реализации для животноводческих помещений, предложив оптимальный вариант при снижении энергозатрат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Системы микроклимата бывают естественные, принудительные и комбинированные [8]. Разработана схема их классификации [9]. Основа любой системы микроклимата – это поступление свежего воздуха в помещение, его подготовка (подогрев, охлаждение, высушивание, увлажнение, очистка, ионизация, смешивание) и подача, удаление уже отработанного воздуха (напрямую в атмосферу или с последующей обработкой для других целей).

С учетом собственного практического опыта при посещении ферм Центральной части России (ООО «Ферма Рябцева», АО «Зеленоградское», АПК «Родниковое Поле», ЗАО «Совхоз имени Ленина», ТОО АФ Родина, ФГУП Григорьевская, виварий РГАУ-МСХА, ООО «Истринская Сыроварня» и др.) мы объединили классификации действующих и взаимодействующих факторов, напрямую влияющих на микроклимат животноводческих помещений (*рис. 1*).

Для поддержания оптимальных параметров микроклимата необходимо обеспечить воздухообмен, то есть подачу и равномерное распределение воздуха [10].

Системы вентиляции в животноводстве выполняют следующие функции:

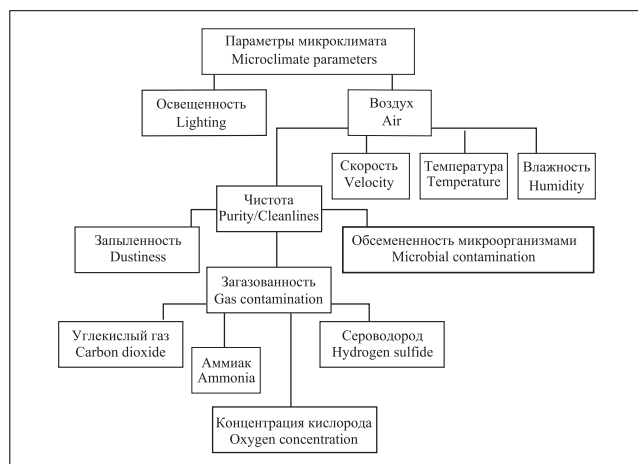


Рис. 1 Факторы, влияющие на микроклимат животноводческих помещений

Fig. 1 Factors affecting the livestock buildings' microclimate

- ассимиляция водяных паров и вредных газов;
- отведение избытков теплоты в жаркий период года;
- удаление пыли и микроорганизмов;
- поставка и распределение необходимого количества чистого воздуха с заданными скоростными параметрами;
- поддержание оптимального температурного и влажностного режима.

Для обеспечения последней функции используют процесс ассимиляции избытков тепла и влаги кондиционно приготовленным приточным воздухом, подаваемым в помещение системой вентиляции или кондиционирования [11]. Для удаления вредных веществ и газов из животноводческих помещений на вентиляцию расходуется около 2 млрд кВт·ч электроэнергии в год, на обогрев дополнительно требуется 1,8 млрд кВт·ч, 0,6 млн м природного газа, 1,3 млн т жидкого и 1,7 млн т твердого топлива [12].

При сравнении эффективности работы принудительной и естественной вентиляции выявлено, что температурно-влажностный индекс *ТНВ* в коровнике с туннельной системой был ниже, а температура на 0,4°C меньше, при одинаковой скорости воздуха внутри помещений (рис. 2) [13]. Закономерны рекомендации дооснащения коровников принудительными системами для улучшения параметров микроклимата [13-16].

При сравнении по экономическому эффекту производства продукции животноводства рентабельность в помещениях с туннельной системой вентиляции выше [18].

В коровниках с естественной системой вентиляции параметры микроклимата изменяются в зависимости от сезона года и зоны помещения [18-20]. Недостаточное количество приточных и вытяжных шахт отрицательно сказывается на микроклимате как летом, так и зимой.



Рис. 2. Вентиляция в коровнике:

a – естественная; *b* – принудительная [13]

Fig. 2. Ventilation of the cowshed: *a* – natural; *b* – forced [13]

В известных системах при подаче воздуха в верхнюю часть помещения и удалении его через вытяжные шахты образуются слабовентилируемые участки в местах кормления, так как животные и кормушки становятся механическими препятствиями на пути воздушных потоков [21]. При этом расход приточного воздуха в 8-10 раз превышает потребность животного.

Проблему теплового стресса молочных коров при беспривязном содержании можно решить с помощью системы автоматического орошения в сочетании с принудительной вентиляцией [22, 23].

При установке теплообменной блокирующей вентиляционной системы холодный воздух проходит по теплообменному воздухопроводу, где подогревается за счет тепла, выделяемого животными, и конденсации водяных паров (рис. 3) [24]. Через отверстия в распределительном воздуховоде подогретый воздух подается к животным. Образуется воздушная подушка, и газы аммиака, сероводорода, углекислого газа удаляются через шахты, опущенные до пола, или через специальные отверстия в нижней части дверей.

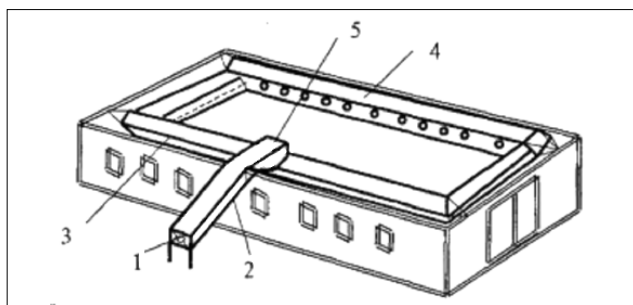


Рис. 3. Система установки вентиляции в животноводческом помещении: 1 – наружный вентилятор; 2 – короб; 3 – теплообменный воздухопровод; 4 – распределительный воздухопровод; 5 – шахта

Fig. 3. The installation of ventilation in the livestock building: 1 – outdoor fan; 2 – box; 3 – heat exchange air duct; 4 – distribution air duct; 5 – shaft

Кроме того, разработана система вентиляции на основе теплонасосных установок (рис. 4) (Петров А.М., 2013). Низкопотенциальный источник тепла (атмосферный воздух) поступает в тепловой насос, а в испарителе рабочее тело (хладагент) находится под низким давлением и кипит при невысокой температуре,

поглощая теплоту низкопотенциального источника. Затем рабочее тело сжимается в компрессоре и поступает в конденсатор, где при более высоких давлениях и температуре конденсируется, направляясь по системе вентиляции. Подогретый воздух транспортируется по воздуховодам в телятник и смешивается с внутренним воздухом помещения.

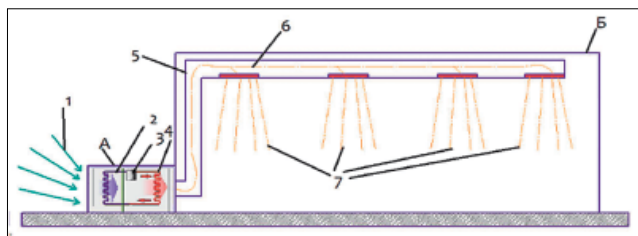


Рис. 4. Схема системы вентиляции на базе теплового насоса в животноводческом помещении: 1 – низкопотенциальный источник тепла; 2 – теплообменник-испаритель; 3 – компрессор; 4 – теплообменник-конденсатор; 5 – воздуховод; 6 – тепловой поток; 7 – внутренний воздух помещения; А – тепловой насос; Б – телятник

Fig. 4. The diagram of a heat pump ventilation system in a livestock building: 1 – low-grade heat source; 2 – heat exchanger-evaporator; 3 – compressor; 4 – heat exchanger-condenser; 5 – air duct; 6 – heat flow; 7 – building indoor air; А – heat pump; Б – calf shed

Факторы окружающей среды (температура, влажность, скорость воздуха за пределами коровника) влияют на производительность молочного стада [10]. Отмечены наиболее статистически значимые показатели:

- отрицательная корреляция ($r = 0,2-0,5$) между температурой воздуха и молочной продуктивностью;
- положительная корреляция ($r = 0,4$) между влажностью воздуха и суточным удоем молока.

Относительная влажность влияет на физиологическое состояние коров. Например, при увеличении этого показателя нарушается терморегуляция животных. Высокая относительная влажность при высокой температуре внутреннего воздуха существенно ухудшает их состояние. При низкой температуре усиливается теплоотдача, а при нормальной температуре и повышенной относительной влажности пар конденсируется на полу, на стенках и подстилке, что негативно влияет на здоровье животных [25-28].

Для увеличения воздушного потока и минимизации проникновения влаги предлагается использовать перекрытый гребень в зоне конька крыши [29]. Доказан эффект установки подобного конька с подветренной стороны (рис. 5).

Компьютерное моделирование и последующие натурные испытания дали возможность сравнить результаты воздействия ветра на крыши различных вариаций, что важно знать при строительстве новых коровников [30]. Коэффициент детерминации совпадения результатов компьютерного моделирования и на-

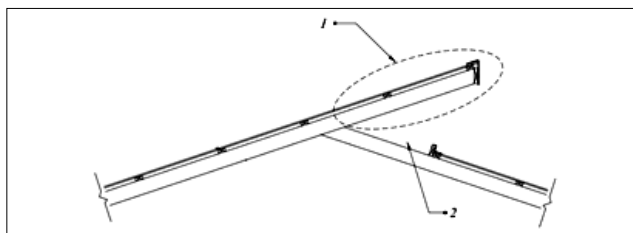


Рис. 5. Перекрытый гребень конька крыши: 1 – перекрывающий конек; 2 – перекрытый гребень

Fig. 5. Overlapped roof ridge: 1 – overlapping ridge; 2 – overlapped ridge

турных замеров составил 0,8157.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для экономии энергопотребления, вместо принудительной системы (с шахтами), мы предлагаем перейти на естественно-гибридную вентиляцию (рис. 6).

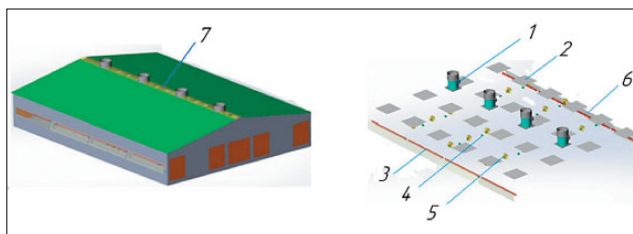


Рис. 6. Естественно-гибридная вентиляция: 1 – система удаления воздуха; 2 – осветительное оборудование; 3 – нагревательный элемент; 4 – датчики; 5 – вентилятор с распылительной форсункой; 6 – створка; 7 – световой конек

Fig. 6. Natural and hybrid ventilation: 1 – air removal system; 2 – lighting equipment; 3 – heating element; 4 – sensors; 5 – fan with a spray nozzle; 6 – sash; 7 – light ridge

Она осуществляется в несколько этапов:

1. Контроллер подает сигнал на привод створок окон для их открытия. После открытия створок воздух начинает проникать во внутреннее пространство коровника. Одновременно с открытием створок окон контроллер проводит опрос датчиков температуры и влажности, в случае отклонения одного из параметров от заданной нормы контроллер включает форсунки с жидкостью или нагревательные элементы (находятся под окнами).

2. Чтобы воздушный поток распространялся равномерно по всему коровнику, контроллер подает сигнал на включение вентиляторов и на привод вентиляторов о необходимости встать в положение 1. После того как набралось достаточное количество воздуха, контроллер подает сигнал на приводы створок о закрытии.

3. Через некоторое время воздух в помещении коровника становится загазованным, тогда срабатывает один из датчиков. Контроллер, принимая сигнал от датчиков о превышении предельно допустимой концентрации (углекислый газ, сероводород, аммиак), совершает ряд одновременных операций, откры-

вая дверцы у труб системы удаления воздуха и подавая на привод вентиляторов сигнал о необходимости встать в положение 2, и весь воздух начинает подниматься вверх.

4. Далее контроллер подает сигнал на привод створок для их открытия и через заданное время отключает привод вентилятора и сам вентилятор, а также закрывает дверцы у труб системы удаления воздуха.

При недостаточной скорости удаления воздуха система оборудована двигателями с вытяжными вентиляторами.

5. Все вышеописанные действия повторяются.

6. В случае недостаточности естественного освещения через створки и световой конек на крыше датчик подает сигнал на контроллер, который включает светильники.

Контроллер оснащен часами астрономического времени и отключает все освещение или его большую часть при наступлении определенных обстоятельств, заложенных в программный код.

Проведен расчет убытков от теплового стресса на базе молочной фермы с естественной системой вентиляции для содержания 480 дойных коров (Тульская область) с использованием нескольких показателей:

длительность периода жары ($>22^{\circ}\text{C}$)	60 сут.;
количество дойных коров	480 гол.;
среднесуточный удой на 1 дойную корову	37 кг;
снижение удоев от теплового стресса (из-за сокращения потребления корма)	10%;
выбраковка коров за период жары	1%;
снижение оплодотворяемости по стаду	4%;
цена реализации молока	33 руб.

При углубленном экономическом расчете для конкретной фермы целесообразно учитывать максимальное количество возможных факторов.

Суточный удой на ферме от всего поголовья равен 17 760 кг. Потери от снижения продуктивности из-за теплового стресса составили 1776 кг/сут., что эквивалентно 58 608 руб./сут. В результате несвоевременного оплодотворения за указанный период недополучено 19 гол. молодняка, или 237 500 тыс. руб. Убытки от выбраковки коров – 480 000 руб. Всего общие потери за 60 дн. достигли 4 233 980 руб.

Для расчета эффективности гибридной системы и подбора наиболее подходящей компоновки оборудования провели теоретическое моделирование в программном комплексе *Solidworks*. Заданные входные данные были следующими: температура воздуха 33°C , погода ясная, скорость движения наружного воздуха не более 1 м/с. В помещении содержатся полновозрастные здоровые коровы 1-4 лактации, средней живой массы 550 кг, черно-пестрой породы. Забор свежего воздуха в помещения осуществлялся через открытые окна. Для удаления воздуха на коньке установлены 10 вытяжных шахт *Sagrada*, тип

820/К/3-6/38,5/400/L, мощность 0,55 кВт, скорость вращения лопаток вентилятора 900 об/мин, производительность $19\,700\text{ м}^3/\text{ч}$.

При моделировании использовали вентиляторы *Munters*, типа *MFS52-2.0hp*. Их энергопотребление при максимальной мощности – 1,5 кВт.

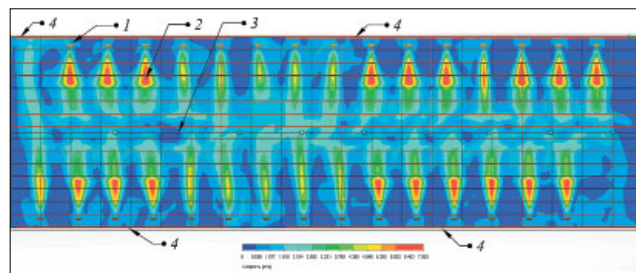


Рис. 7. Скорость распространения воздуха в коровнике, м/с: 1 – вентиляторы; 2 – факел распыла воздушно-водяной смеси на высоте 1500 мм от уровня пола; 3 – вытяжные шахты; 4 – оконные проемы

Fig. 7. Air propagation velocity in the cowshed, m/s: 1 – fans; 2 – spray torch of the air-water mixture at a height of 1500 mm from the floor level; 3 – exhaust shafts; 4 – window openings

Максимальная скорость распространения воздуха в коровнике на высоте 1500 мм достигает 7 м/с на кормовом столе, а в центре помещения, в местах отдыха животных – не менее 2 м/с (рис. 7). Если каждый вентилятор доработать заслонками для направления воздушного потока и использовать форсунки для создания водяного тумана, то гибридная система вентиляции сможет предотвратить последствия теплового стресса.

Для расчета энергозатрат введем допущение, что система вентиляции работает на полную мощность 18 ч в день, остальное время она отключена, обслуживание в стоимость не включено. При стоимости электроэнергии 4,57 руб. за 1 кВт, использовании в расчетной модели 32 вентиляторов и 10 шахт общая сумма энергопотребления за 60 дн. равна 57 780 кВт, или 264 054,60 руб. за период. Расчет стоимости установки всей гибридной системы не проводили, так как это целесообразно делать для конкретной фермы. Определили только предварительную стоимость.

При условии, что потери денежных средств во время теплового стресса равны 4 233 980 руб., а затраты на электроэнергию 264 054,60 руб., экономия составляет 3 969 926 руб. в период. Введем допущение, что окупаемость затрат на систему составляет 3 года. Эта цифра основана на предварительной оценке стоимости монтажа системы и ее себестоимости.

Полученные данные свидетельствуют о том, что установка гибридной системы вентиляции на ферме на 480 коров станет целесообразным вложением.

Выводы

1. Проанализировали существующие современные решения устройства как естественной, так и при-

нудительной (тоннельной) систем вентиляции.

2. Установили, что естественная вентиляция в коровниках в большинстве случаев не обеспечивает необходимый уровень показателей микроклимата. При- нудительная система вентиляции справляется с этой задачей, но она энергозатратна.

3. Предложили использовать естественно-гибрид- ную систему вентиляции, которая обеспечит необходи- мые параметры микроклимата в животноводческих помещениях и снизит энергозатраты.

4. Провели моделирование гибридной системы на ферме при содержании 480 голов, где скорость воз- душных потоков вокруг коров находится в пределах 2-7 м/с;

5. Рассчитали, что при тепловом стрессе в течение 60 дней при естественной вентиляции убытки состав- ляют 4 233 980 руб.

6. Стоимость энергопотребления исполнительными механизмами гибридной системы равна 264 054,60 руб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мартынова Е.Н., Ястребова Е.А. Физиологическое со- стояние коров в зависимости от микроклимата помещений // *Достижения науки и техники АПК*. 2013. N8. С. 53-56.
2. Наливайко А.П. Система регулирования микроклима- та на фермах и комплексах КРС // *Научно-образователь- ный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века*. 2017. N6. С. 177-180.
3. Игнаткин И.Ю., Курячий М.Г. Системы вентиляции и влияние параметров микроклимата на продуктивность сви- ней // *Вестник НГИЭИ*. 2012. N10(17). С. 16-34.
4. Yue S.M., Yang C., Zhou J., Wang Z.S., Wang L.Z., Peng Q.H., Xue B. Effect of heat stress on intake, rumen physiology, milk production and composition and supplementation of dietary fiber and dietary fats to alleviate heat stress: A review. *Pakistan journal of agricultural sciences*. 2020. Vol. 57. Iss. 5. 1421-1427.
5. Liu J.J., Li L.Q., Chen X.L., Lu Y.Q., Wang D. Effects of heat stress on body temperature, milk production, and reproduction in dairy cows: a novel idea for monitoring and evaluation of heat stress: A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Scienc- es*. 2019. Vol. 32. Iss. 9. 1332-1339.
6. Dahl G.E., Tao S., Laporta J. Heat Stress Impacts Immune Status in Cows Across the Life Cycle. *Frontiers in veterinary science*. 2020. Vol. 7. 116.
7. Wildridge A.M., Thomson P.C., Garcia S.C., Clark C.E.F., Kerrisk K.L. Short communication: The effect of temperature-hu- midity index on milk yield and milking frequency of dairy cows in pasture-based automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*. 2018 N101(5). 4479-4482.
8. Тесленко И.И., Хабаху С.Н., Нормов Д.А. Методика оцен- ки и выбора безопасных систем микроклимата животно- водческих помещений // *Чрезвычайные ситуации: промыш- ленная и экологическая безопасность*. 2013. N1-2. С. 77-79.
9. Тесленко И.И. Обзор и классификация систем обеспе- чения безопасных параметров микроклимата в животно- водческих помещениях // *Чрезвычайные ситуации: про- мышленная и экологическая безопасность*. 2013. N3-4. С. 157-166.
10. Dovlatov I.M., Yuferev L.Yu., Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Zheleznikova O.E. Development and testing of combined ger- micidal recirculator. *Light & Engineering*. 2021. Vol. 29. Iss. 3. 43-49.
11. Растимешин С.А., Трунов С.С., Маслова А.А. Форми- рование тепло-влажностного режима коровника // *Вестник НГИЭИ*. 2016. N4(59). С. 106-111.
12. Наливайко А.П. Система регулирования микрокли- мата на фермах и комплексах КРС // *Научно-образователь- ный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века*. 2017. N6. С. 177-180.
13. Bleizgys R., Bagdoniene I. Control of ammonia air pollu- tion through the management of thermal processes in cowsheds. *Science of the total environment*. 2016. Vol. 568. 990-997.
14. Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Y., Tikhomirov A. Energy Consumption Optimization in Agriculture and Devel- opment Perspectives. *International journal of energy optimiza- tion and engineering*. 2020. Vol. 9. Iss. 4. 1-19.
15. Новиков Н.Н. Решение проблемы микроклимата, ав- томатизации процессов и теплоснабжения на животновод- ческих фермах // *Вестник ВНИИМЖ*. 2014. N2(14). С. 102-111.
16. Андрианов Е.А., Андрианов А.М., Андрианов А.А. Ор- ганизация вентиляции животноводческих помещений с ис- пользованием ресурсосберегающих технологий // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2014. N4(44). С. 91-98.
17. Nowakowicz-Debek B., Wlazlo L., Szymula A., Ossowski M., Kasela M., Chmielowiec-Korzeniowska A., Bis-Wencel H. Estimating Methane Emissions from a Dairy Farm Using a Com- puter Program. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. Iss. 8. 803.
18. Довлатов И.М., Смирнов А.А., Павкин Д.Ю., Заикин В.П. Технология и средство для улучшения микроклимата жи- вотноводческих помещений // *Вестник НГИЭИ*. 2020. N4(107). С. 34-43.
19. Tomasello N., Valenti F., Cascone G. Development of a CFD Model to Simulate Natural Ventilation in a Semi-Open Free-Stall Barn for Dairy Cows. *Buildings*. 2019. Vol. 9. Iss. 8. 183.
20. Мартынова Е.Н., Ястребова Е.А. Особенности микро- климата коровников с естественной системой вентиляции // *Ветеринария, зоотехния и биотехнология*. 2015. N6. С. 52-56.
22. D'Emilio A., Porto S.M.C., Cascone G., Bella M., Guli- no M. Mitigating heat stress of dairy cows bred in a free-stall barn by sprinkler systems coupled with forced ventilation. *Jour- nal of agricultural engineering*. 2017. Vol. 48. Iss. 4. 691. 190-195.
23. Tu R., Li J.Q., Hwang Y.H. Fresh air humidification in win- ter using desiccant wheels for cold and dry climate regions: Op- timization study of humidification processes. *International jour- nal of refrigeration-revue internationale du froid*. 2020. Vol. 118. 121-130.
24. Лавров И.М., Пожидаев Г.И., Демин В.А. Энергосберегающая



система вентиляции животноводческих помещений с самообогревом // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2003. N4(12). С. 228-231.

25. Mylostyvyi R., Chernenko O. Correlations between Environmental Factors and Milk Production of Holstein Cows. *Data*. 2019. Vol. 4. Iss. 3. 103.

26. Hammami H., Bormann J., M'hamdi N., Montaldo H.H., Gengler N. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *Journal of Dairy Science*. 2013. N96. 1844-1855.

27. Chung H., Li J., Kim Y. Using implantable biosensors and

wearable scanners to monitor dairy cattle's core body temperature in real-time. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. Vol. 17. 105453.

28. Rizzo M., Monteverde V., Arfuso F., Picciony G. Variation in and relationship among environmental condition and total locomotor activity in dairy cows. *Large animal review*. 2017. Vol. 23. N1. 23-27.

30. De Paepe M. et al. Airflow measurements in and around scale model cattle barns in a wind tunnel: Effect of ventilation opening height. *Biosystems engineering*. 2012. Vol. 113. N1. 22-32.

REFERENCES

1. Martynova E.N., Yastrebova E.A. Fiziologicheskoe sostoyanie korov v zavisimosti ot mikroklimata pomeshcheniy [Physiological state of cows depending on house microclimate]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2013. N8. 53-56 (In Russian).

2. Nalivayko A.P. Sistema regulirovaniya mikroklimata na fermakh i kompleksakh KRS [The system of climate control on farms and cattle complexes]. *Nauchno-obrazovatel'nyy potentsial molodezhi v reshenii aktual'nykh problem XXI veka*. 2017. N6. 177-180 (In Russian).

3. Ignatkin I.Yu., Kuryachiy M.G. Sistemy ventilyatsii i vliyaniye parametrov mikroklimata na produktivnost' sviney [Ventilation systems and effect climate parameters on the productivity of pigs]. *Vestnik NGIEI*. 2012. N10(17). 16-34 (In Russian).

4. Yue S.M., Yang C., Zhou J., Wang Z.S., Wang L.Z., Peng Q.H., Xue B. Effect of heat stress on intake, rumen physiology, milk production and composition and supplementation of dietary fiber and dietary fats to alleviate heat stress: A review. *Pakistan journal of agricultural sciences*. 2020. Vol. 57. N5. 1421-1427 (In English).

5. Liu J.J., Li L.Q., Chen X.L., Lu Y.Q., Wang D. Effects of heat stress on body temperature, milk production, and reproduction in dairy cows: a novel idea for monitoring and evaluation of heat stress: A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2019. Vol. 32. N9. 1332-1339 (In English).

6. Dahl G.E., Tao S., Laporta J. Heat Stress Impacts Immune Status in Cows Across the Life Cycle. *Frontiers in veterinary science*. 2020. Vol. 7. 116 (In English).

7. Wildridge A.M., Thomson P.C., Garcia S.C., Clark C.E.F., Kerrisk K.L. Short communication: The effect of temperature-humidity index on milk yield and milking frequency of dairy cows in pasture-based automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*. 2018. N101(5). 4479-4482 (In English).

8. Teslenko I.I., Khabakhu S.N., Normov D.A. Metodika otsenki i vybora bezopasnykh sistem mikroklimata zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy [Methodology for assessing and selecting safe microclimate systems for livestock buildings]. *Chrezvychaynye situatsii: promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost'*. 2013. N1-2. 77-79 (In Russian).

9. Teslenko I.I. Obzor i klassifikatsiya sistem obespecheniya bezopasnykh parametrov mikroklimata v zhivotnovodcheskikh pomeshcheniyakh [Review and classification of systems for ensuring safe microclimate parameters in livestock buildings].

Chrezvychaynye situatsii: promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost'. 2013. N3-4. 157-166 (In Russian).

10. Dovlatov I.M., Yuferev L.Yu., Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Zheleznikova O.E. Development and testing of combined germicidal recirculator. *Light & Engineering*. 2021. Vol. 29. N3. 43-49 (In English).

11. Rastimeshin S.A., Trunov S.S., Maslova A.A. Formirovaniye teplo-vlazhnostnogo rezhima korovnika [The formation of a heat mode barn]. *Vestnik NGIEI*. 2016. N4(59). 106-111 (In Russian).

12. Nalivayko A.P. Sistema regulirovaniya mikroklimata na fermakh i kompleksakh KRS [The system of climate control on farms and cattle complexes]. *Nauchno-obrazovatel'nyy potentsial molodezhi v reshenii aktual'nykh problem XXI veka*. 2017. N6. 177-180 (In Russian).

13. Bleizgys R., Bagdoniene I. Control of ammonia air pollution through the management of thermal processes in cowsheds. *Science of the total environment*. 2016. Vol. 568. 990-997 (In English).

14. Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Y., Tikhomirov A. Energy Consumption Optimization in Agriculture and Development Perspectives. *International journal of energy optimization and engineering*. 2020. Vol. 9. N4. 1-19 (In English).

15. Novikov N.N. Reshenie problemy mikroklimata, avtomatizatsii protsessov i teplosnabzheniya na zhivotnovodcheskikh fermakh [Solving the problem of microclimate, process automation and heat supply at livestock farms]. *Vestnik VNIIMZH*. 2014. N2(14). 102-111 (In Russian).

16. Andrianov E.A., Andrianov A.M., Andrianov A.A. Organizatsiya ventilyatsii zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy s ispol'zovaniem resursosberegayushchikh tekhnologiy [Application of resource-saving technologies in indoor air ventilation systems of livestock houses]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. N4(44). 91-98 (In Russian).

17. Nowakowicz-Debek B., Wlazlo L., Szymula A., Ossowski M., Kasela M., Chmielowiec-Korzeniowska A., Bis-Wencel H. Estimating Methane Emissions from a Dairy Farm Using a Computer Program. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. N8. 803 (In English).

18. Dovlatov I.M., Smirnov A.A., Pavkin D.Yu., Zaikin V.P. Tekhnologiya i sredstvo dlya uluchsheniya mikroklimata zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy [Technology and means for improving the microclimate of livestock premises]. *Vestnik*

NGIEI. 2020. N4(107). 34-43 (In Russian).

19. Tomasello N., Valenti F., Cascone G. Development of a CFD Model to Simulate Natural Ventilation in a Semi-Open Free-Stall Barn for Dairy Cows. *Buildings*. Vol. 9. N8. 183 (In English).

20. Martynova E.N., Yastrebova E.A. Osobennosti mikroklimata korovnikov s estestvennoy sistemoy ventilyatsii [Features climate barns with natural ventilation system]. *Veterinariya, zootekhnika i biotekhnologiya*. 2015. N6. 52-56 (In Russian).

22. D'Emilio A., Porto S.M.C., Cascone G., Bella M., Gulino M. Mitigating heat stress of dairy cows bred in a free-stall barn by sprinkler systems coupled with forced ventilation. *Journal of agricultural engineering*. 2017. Vol. 48. N4. 691. 190-195 (In English).

23. Tu R., Li J.Q., Hwang Y.H. Fresh air humidification in winter using desiccant wheels for cold and dry climate regions: Optimization study of humidification processes. *International journal of refrigeration-revue internationale du froid*. 2020. Vol. 118. 121-130 (In English).

24. Lavrov I.M., Pozhidaev G.I., Dyomin V.A. Energosberegayushchaya sistema ventilyatsii zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy s samoobogrevom [Energy-saving self-heating ventilation system for livestock buildings] *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2003. N 4(12). 228-231 (In Russian).

25. Mylostyvyi R., Chernenko O. Correlations between Environmental Factors and Milk Production of Holstein Cows. *Data*. 2019. Vol.4. N3. 103 (In English).

26. Hammami H., Bormann J., M'hamdi N., Montaldo H.H., Gengler N. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *J. Dairy Sci.* 2013, N 96. 1844-1855 (In English).

27. Chung H., Li J., Kim Y. Using implantable biosensors and wearable scanners to monitor dairy cattle's core body temperature in real-time. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. Vol. 17. 105453 (In English).

28. Rizzo M., Monteverde V., Arfuso F., Picciony G. Variation in and relationship among environmental condition and total locomotor activity in dairy cows. *Large animal review*. 2017. Vol. 23. N1. 23-27 (In English).

30. De Paepe M., et al. Airflow measurements in and around scale model cattle barns in a wind tunnel: Effect of ventilation opening height. *Biosystems engineering*. 2012. Vol. 113. N1. 22-32 (In English).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Довлатов И.М. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ.

Юрочка С.С. – литературный анализ, сбор и обработка материала, концепция и дизайн естественно-гибридной вентиляции.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Dovlatov I.M. – research supervision, formulation of the main research directions, development of theoretical premises, text proofreading, formulation of general conclusions and literary analysis.

Yurochka S.S. – literature review, data collection and processing, natural-hybrid ventilation concept and design

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

02.07.2021

14.09.2021

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал «Сельскохозяйственные машины и технологии» входит в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук.

Журнал включен в систему Российского индекса цитирования и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству *AGRIS*. Электронные версии журнала размещаются на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки.

Статьи, направляемые в журнал для публикации, должны соответствовать основной тематике журнала.

Статьи, поступившие в редакцию, проходят двойное слепое рецензирование. Отрицательная рецензия является основанием для отказа в публикации.

Редакция принимает рукописи и электронные версии статей, набранные в Word шрифтом 14 пт. через 1,5 интервала, объемом 15-20 страниц.

Приведенные в статье формулы должны иметь пояснения и расшифровку всех входящих в них величин с указанием единиц измерения в СИ. Графические материалы должны быть приложены в виде отдельных файлов: фотографии – *jpg* или *tif* с разрешением 300 dpi, графики, диаграммы – в *eps* или *ai*. Все графические материалы, рисунки и фотографии должны быть пронумерованы, подписаны и иметь ссылку в тексте.

Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны символами в редакторе формул *Microsoft Word* без использования специальных редакторов. Не допускается набор: часть формулы символами, а часть в редакторе формул. Если формулы заимствованы из других источников, то не следует приводить в них подробных выводов: авторы формул это уже сделали, повторять их не следует. Ссылки на обозначения формул обязательны. Статья должна содержать не более 10 формул, 3-4 иллюстрации, 3-4 таблицы, размер таблиц не более 1/2 страницы.

В каждой статье должны быть указаны следующие данные:

- название статьи;
- фамилия, имя и отчество автора(ов) полностью;
- e-mail автора(ов), контактный телефон;
- место работы автора(ов) (аббревиатуры не допускаются), почтовый адрес;
- ученая степень, ученое звание автора(ов);

- реферат (объем 200-250 слов);

- ключевые слова;

- библиографический список.

Статью следует структурировать, обязательно указав следующие разделы:

- Введение (актуальность);

- Цель исследования;

- Материалы и методы;

- Результаты и обсуждение;

- Выводы.

Библиографический список (не менее 20 источников из них 3-4 иностранных, входящих в базу данных *Web of Science*, за последние 5 лет) следует оформлять по ГОСТ Р 7.05-2008.

Реферат

Реферат – это самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы.

Объем реферата – 200-250 слов.

Нельзя использовать в реферате аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

На английский язык следует перевести:

- название статьи;

- фамилию, имя, отчество (полностью);

- ученая степень, ученое звание, место работы автора (ов);

- реферат и ключевые слова;

- библиографический список.

Машинный перевод недопустим!

В конце рукописи необходимо указать фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. Приводится на русском и английском языках.

Рукопись статьи должна быть подписана лично авторами. Автор несет юридическую и иную ответственность за содержание статьи.

Несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

Подписку на журнал
можно оформить в агентстве «Урал-Пресс»
на сайте: www.ural-press.ru,
а также в редакции журнала.

Индекс издания **35825**

КОНТАКТЫ:

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01
www.vimsmit.com e-mail: smit@vim.ru