

ISSN 2073-7599

Сельскохозяйственные машины и технологии

AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Том 18 N 3 2024

Vol. 18 N 3 2024

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL



3 2024





НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Основан в 2007 году

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

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

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

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

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

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

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

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

Выходит 4 раза в год
(Свободная цена)
Дата выхода в свет 13.09.2024
Формат 60х90/8. Объем 12,25 печ.л.
Тираж 500 экз
Отпечатано в типографии
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2024

Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайл

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Яков Петрович Лобачевский (НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР)

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

Алексей Семенович Дорохов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заместитель директора по на-
учно-организационной работе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская
Федерация, https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=550644

Михаил Никитичевич Ерохин

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный
аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Рос-
сийская Федерация, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=626708

Юрий Анатольевич Иванов

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

Йошисукэ Кишида

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

Юрий Федорович Лачуга

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

Антонин Махалек

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

Владимир Дмитриевич Попов

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

Синьминь Лю

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

Жарылкасын Сарсембекович Садыков

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

Даврон Рустамович Норчаев

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

Юлия Сергеевна Ценц

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

Вячеслав Иванович Черноиванов

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

Роман Алексеевич Фандо

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



SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL
Founded in 2007

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

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

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

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

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

EXECUTIVE EDITORS:

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

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

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

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

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNologii]

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

EDITOR-IN-CHIEF

Andrey Yu. Izmaylov

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

EDITORIAL BOARD

Yakov P. Lobachevskiy (SCIENTIFIC EDITOR)

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

Aleksey S. Dorokhov

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

Mikhail N. Erokhin

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

Yuriy A. Ivanov

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

Yoshisuke Kishida

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

Yuriy F. Lachuga

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

Antonin Makhalek

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

Vladimir D. Popov

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

Xinmin Liu

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

Zharylkasyn S. Sadykov

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

Davron R. Norchaev

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

Yuliya S. Tsench

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

Vyacheslav I. Chernov

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

Roman A. Fando

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

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

Published 4 times a year (open price).

Publication date is 13.09.2024.

The format is 60 x 90/8. The volume is 12.25 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК 300 ЛЕТ

Ценч Ю.С., Шаров В.В.

Становление отечественной мобильной
сельскохозяйственной техники на электротяге 4

Ценч Ю.С., Сидоров И.В.

Этапы развития технологий и технических средств
для внесения удобрений и защиты растений 14

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Иванов Н.М., Иванников А.Б., Дусантаев А.И.,
Крохта Г.М., Крум В.А.

Технологическая схема использования теплоты
отработавших газов самоходной машины 23

Годжаев З.А., Прядкин В.И., Артёмов А.В.

Моделирование движения мобильного
энергетического средства на шинах
сверхнизкого давления 31

Федоренко В.Ф.

Трансформация и интеграция процессов и систем
земледелия в природный ресурсооборот 39

Хамуев В.Г., Герасименко С.А., Борзенко С.И.

Подтверждение адекватности вероятностной
математической модели процесса сепарации
семян сои в гравитационной колонке 49

Подзоров А.В., Шибряева Л.С., Чаплыгин М.Е.

Особенности технологии посева семян на лентах
и жгутах 56

Асовский В.П., Кузьменко А.С.

Численное моделирование защитного опрыскивания
беспилотными воздушными судами вертолетного типа 63

Джаббаров Н.И., Мишанов А.П., Захаров А.М.,
Добринов А.В.

Методика оценки уровня выбросов парниковых газов
при возделывании сельскохозяйственных культур ... 75

Виноградов А.В., Сейфуллин А.Ю., Букреев А.В.

Определение рациональных мест размещения
мультиточечных коммутационных систем 82

Лавров А.В., Текушев А.Х., Давыдова С.А.

Технико-экономическая оценка технологий
улучшения кормовых угодий 91

THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES IS 300 YEARS OLD

Tsench Yu. S., Sharov V.V.

Advancement of domestic mobile agricultural
machinery powered by electric traction 4

Tsench Yu.S., Sidorov I.V.

Stages of technologies and technical means development
for fertilization and plant protection 14

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Ivanov N.M., Ivannikov A.B., Dusantaev A.I.,
Krochta G.M., Krum V.A.

Technological scheme for utilizing exhaust gas heat
from a self-propelled machine 23

Godzhaev Z.A., Pryadkin V.I., Artyomov A.V.

Modeling the motion
of a mobile power
vehicle with ultra-low pressure tires 31

Fedorenko V.F.

Transformation and integration of agricultural processes
and systems into the natural resource cycle 39

Khamuev V.G., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I.

Validation of a probabilistic mathematical
model for soybean seed separation
in a gravity column 49

Podzorov A.V., Shibryaeva L.S., Chaplygin M.E.

Specific characteristics of seed tape
and seed rope planting 56

Asovsky V.P., Kuzmenko A.S.

Numerical simulation of protective spraying
by helicopter-type unmanned aerial vehicles 63

Dzhabborov N.I., Mishanov A.P., Zakharov A.M.,
Dobrinov A.V.

Methodology for assessing the level of greenhouse gas
emissions in agricultural crops production 75

Vinogradov A.V., Seyfullin A.Yu., Bukreev A.V.

Determining the optimal location for multi-contact
switching systems 82

Lavrov A.V., Tekushev A.Kh., Davydova S.A.

Technical and economic assessment of technologies
for forage land improvement 91

EDN: ZMGVTW

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13



Научная статья

УДК 378.663:001:631.372(092)



Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге

Юлия Сергеевна Ценч¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Владимир Васильевич Шаров²,
кандидат технических наук, хранитель фондов,
e-mail: sharov_vv56@mail.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

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

Реферат. С реализацией плана ГОЭЛРО в конце 1920-х-начале 1930-х годов применение электроэнергии стремились распространить на сельскохозяйственные работы в поле, создавая специальные машины и механизмы. Усилия были направлены на поиск возможностей по электрификации энергоемких работ в земледелии. Стали появляться различные конструкции электроплугов и электротракторов. (*Цель исследования*) Провести анализ работ по созданию электротрактора в СССР в период с 1930 по 1956 год. (*Материалы и методы*) В работе использован хронологический метод исследований. Изучались научно-технические публикации и другие источники, в которых отражены вопросы изготовления и испытания электротракторов. На основе анализа и обобщения рассмотренных материалов формировались выводы. (*Результаты и обсуждение*) Начальный этап электрификации операций обработки почвы ознаменовался созданием плугов, приводимых в действие электрическими лебедками. В начале 1930-х годов стали появляться тракторы, в которых тепловой двигатель (внутреннего сгорания) заменяли электрическим. Совершенствование электротракторов привело к созданию гусеничных моделей ХТЗ-15 (Харьков) и ЭТ-5-ЭНИН-ВИЭСХ (Москва). Однако всесторонняя проверка выявила, что не только по техническим, но и экономическим показателям применение электротракторов в полеводстве нецелесообразно. (*Выводы*) С 1930 по 1956 год в Советском союзе были построены не менее 15 типов колесных и гусеничных электротракторов. Их испытания показали положительные и отрицательные стороны электрифицированной тяговой техники. Технические проблемы, возникшие на пути внедрения электротрактора, не смогли преодолеть инженеры середины XX века. Тематика по этому направлению была закрыта в 1956 году.

Ключевые слова: сельское хозяйство, обработка почвы, электропług, электротрактор, лебедка, кабель, барабан, приемное устройство.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Шаров В.В. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13. EDN: ZMGVTW.

Scientific article

Advancement of Domestic Mobile Agricultural Machinery Powered by Electric Traction

Yuliya S. Tsench¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Vladimir V. Sharov²,
Ph.D.(Eng.), curator of museum funds,
e-mail: sharov_vv56@mail.ru

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

²Museum of Memory of the Lopasny region, Chekhov, Russian Federation

Abstract. With the implementation of the GOELRO plan in the late 1920s and early 1930s, efforts were made to extend the use of electricity to agricultural fieldwork through the development of specialized machines and mechanisms. Numerous inventors, engineers, and scientists focused on finding ways to electrify energy-intensive agricultural operations. As a result, various designs of electric plows and electric tractors emerged. (*Research purpose*) The paper aims to analyze the development of electric tractors in the USSR during the period from 1930 to 1956. (*Materials and methods*) The study employs a chronological research method, examining scientific and technical publications, along with other sources, that address the manufacturing and testing of electric tractors. Conclusions were drawn through the analysis and synthesis of the reviewed materials. (*Results and discussion*) The

initial phase of electrifying soil cultivation operations was marked by the development of plows powered by electric winches. In the early 1930s, tractors emerged with electric motors replacing traditional heat (internal combustion) engines. Advancements in electric tractor design led to the creation of tracked models such as the HTZ-15 (Kharkov) and ET-5-ENIN-VIESh (Moscow), which underwent extensive economic testing. The results indicated that the use of electric tractors in field crop farming was unsuitable due to both technical and economic factors. (*Conclusions*) Between 1930 and 1956, at least 15 types of wheeled and tracked electric tractors were developed in the Soviet Union. Testing these models revealed both the advantages and drawbacks of electrified traction equipment. Despite their efforts, mid-twentieth-century engineers were unable to resolve the technical challenges associated with the implementation of electric tractors, leading to the termination of the project in 1956.

Keywords: agriculture, soil cultivation, electric plow, electric tractor, winch, cable, drum, receiving mechanism.

For citation: Tsench Yu. S., Sharov V.V. Advancement of domestic mobile agricultural machinery powered by electric traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13. EDN: ZMGVTW.

Возможность применения электроэнергии в земледелии постоянно будоражит умы специалистов в области механизации сельскохозяйственного производства. Технические решения по этой проблеме на протяжении более ста лет неоднократно предлагались как зарубежными, так и отечественными инженерами [1-4].

В нашей стране такие разработки появились во время создания плана ГОЭЛРО (1918-1920 гг.). Актуальность и значимость этому направлению придавали убеждения руководителей государства в необходимости повсеместной электрификации в производственной сфере и повседневной жизни человека. Внедрение электрооборудования в производство и быт сулило несомненные улучшения экологического и экономического плана, комфортности проживания.

Одним из идеологов массового применения нового для страны вида энергии был В.И. Ленин, который энергетическое строительство считал величайшей частью государственно-политического и научно-технического переустройства России после 1917 г. [5]. Сам вожь интересовался ходом практической работы по внедрению электричества в земледелии, принимал участие в демонстрационных испытаниях электроплуга (рис. 1).



Рис. 1. В.И. Ленин на испытаниях 22.10.1921 г. электроплуга на Бутырском хуторе в Москве. Художник К.И. Феногенов. 1939 г.

Fig. 1. V.I. Lenin at the testing of an electric winch plow at Butyrsky Farmstead in Moscow on October 22, 1921. Artist: K.I. Fenogenov. 1939

«Коммунизм – это есть советская власть плюс электрификация всей страны»: эта фраза В.И. Ленина на Московской конференции РКП(б) 20 ноября 1920 г. породила всплеск социальной энергии. Отечественные ученые, конструкторы, изобретатели направили свои усилия на создание машин для сельского хозяйства с использованием энергии электрического тока.

Цель исследований. Провести анализ и обобщение по работам, посвященным вопросам создания электротракторов в СССР с 1930 по 1956 год.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В работе использовался хронологический метод исследований. Изучались научно-технические и информационные источники, в которых отражены вопросы изготовления и испытания электротракторов. На основе анализа и обобщения рассмотренных материалов формировались выводы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. С возведением электростанций в стране начались разработки электрифицированных машин для сельского хозяйства на смену ветровым, водяным и паровым двигателям. Электродвигатели стремились применить не только на стационарных установках, но и на передвигающихся полевых машинах. Вначале усилия инженеров были сконцентрированы на разработке электроплуга. Суть этого технического решения сводилась к электроприводу многокорпусного плуга с двойным набором лево- и правооборачивающих корпусов.

Плуг приводился в движение двумя электролебедками, которые укреплялись на концах прогона на тележках с мощными электродвигателями и пускорегулирующей аппаратурой на 2000 В. Для перемещения тележки на ней устанавливались двигатели внутреннего сгорания, и плуг челночным способом поочередно подтягивался стальным тросом от одной лебедки к другой. Один рабочий управлял плугом, а двое – лебедками. После каждого прохода тележки передвигались на ширину захвата плуга.

Работы по электроплугу с 1921 по 1925 г. были сосредоточены на предприятии «Электрострой», возглавляемом активным сторонником советской электроэнергетики Г.М. Кржижановским. Отделом электропахоты в организации руководил талантливый инженер П.П. Пыляй, сумевший развернуть масштабные работы в тяжелых условиях послевоенного времени.

Всесторонние хозяйственные испытания электроплуга проводились в разных регионах России: в Самарской губернии (на землях Тимашевского сахарного завода), Костромской губернии (в Шунгенском совхозе), в Донбассе (на землях треста «Химуголь», в совхозах им. Шевченко и «Хлебное») и даже в Средней Азии на хлопковых полях совхоза «Мургаб».

Многочисленные испытания в условиях реальной эксплуатации показали, что везде внедрению нового метода пахоты препятствовало отсутствие достаточных электрических мощностей.

В 1925 г. во время испытаний электроплуга в Донбассе трагически погиб инженер П.П. Пыляй. Возглавляемая им тематика постепенно затухает, а ученые и инженеры нового поколения в 1930-х годах начинают работать над созданием электротрактора.

Электротрактор с двигателем, получающим питание от внешней электросети, предназначен для выполнения операций в растениеводстве и животноводстве как стационарных, так и в движении. Одновременно с перемещением сельскохозяйственных машин электричество может подаваться на механизмы и рабочие органы, оборудованные электродвигателями, средствами электроавтоматики и другими устройствами [6].

По сравнению с тракторами, оснащенными двигателями внутреннего сгорания, электрические обладали рядом преимуществ. Высвобождалось значительное количество топлива и смазочных материалов, не требовалось подвозить топливо и воду, существенно улучшались условия труда тракториста за счет отсутствия выхлопных газов и шума от работы двигателя. КПД повышалось в 1,5-2 раза, а на вспомогательные электродвигатели агрегируемых сельскохозяйственных машин можно передавать мощности с помощью гибких кабелей.

Электротрактора, как правило, создавались на базе серийно выпускаемых тракторов, у которых к двигателю от подстанции по кабелю подводился электрический ток. Для свободного маневрирования на тракторе устанавливался кабельный барабан, приводимый во вращение от трансмиссии трактора или дополнительного электродвигателя.

В начале 1930-х годов в Советском Союзе были созданы несколько конструкций электротракторов, их разработкой занимались не только профессио-

нальные ученые, но и энтузиасты-изобретатели. В научно-технических журналах того времени содержалась информация о некоторых из них. Так, профессор А.И. Дидебулидзе из Закавказского НИМЭСХ предложил два варианта электротрактора – колесный и гусеничный. Колесный трактор на базе американского «Фордзона» оснащался электродвигателем мощностью 20 л.с. с частотой вращения 950 об/мин [7] (рис. 2).



Рис. 2. Электротрактор системы А.И. Дидебулидзе на базе колесного трактора «Фордзон»

Fig. 2. Electric tractor designed by A.I. Didebulidze, based on the Fordson wheeled tractor

Для питающего кабеля на передней части трактора устанавливался горизонтальный барабан с поперечной осью вращения диаметром 0,4 м, длиной 0,45 м и вертикальная мачта (стрела) высотой 3,5 м. Длина кабеля составляла 275 м, вес электротрактора 1470 кг (с кабелем 1620 кг). Трансмиссия обеспечивала три передачи вперед (2,35, 4,34 и 10,90 км/ч) и одну назад (4,15 км/ч).

Гусеничный электротрактор выполнялся на базе американского трактора «Катерпиллер-20» с мощностью электродвигателя 28 л.с. и вращением 1450 об/мин [7]. Горизонтальный барабан диаметром 0,67 м устанавливался в передней части электротрактора, а стрела длиной 2,1 м горизонтального типа размещалась на мощной подставке в средней части. Точка подвеса кабеля стрелой находилась на высоте 2,14 м. Длина кабеля составляла 275 м, вес трактора равнялся 2330 кг (с кабелем 2500 кг). Трансмиссия обеспечивала три передачи вперед (5,50, 7,62 и 13,30 км/ч) и одну назад (6,15 км/ч).

Электротрактор гусеничного типа инженера Данильченко (Институт хлопководства, Узбекская ССР) был создан на базе трактора «Катерпиллер-30» с заменой ДВС на электродвигатель мощностью 39,4 л.с. при 960 об/мин [7] (рис. 3). Он отличался оригинальной конструкцией кабельного барабана, который вращался относительно вертикальной оси. Барабан диаметром 1,57 м, высотой 0,3 м располагался в задней части машины вокруг места водителя с рычагами и педалями управления. Стрела дли-

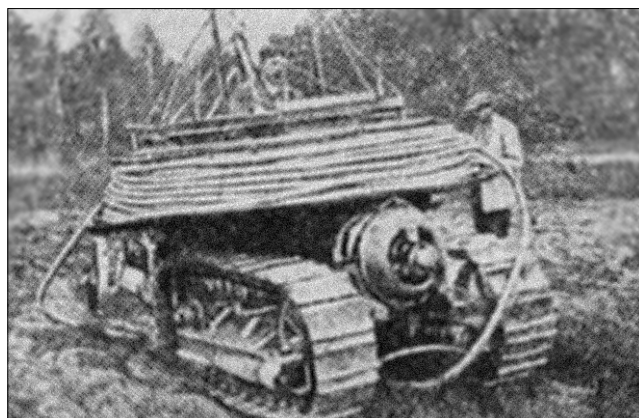


Рис. 3. Электротрактор системы инженера Данильченко на базе гусеничного трактора «Катерпиллер-30»
Fig. 3. Electric tractor designed by engineer Danilchenko, based on the Caterpillar-30 crawler tractor

ной 3,6 м с возможностью изменения угла наклона могла вращаться относительно барабана. Длина питающего кабеля составляла 500 м, вес электротрактора 4100 кг (с кабелем 5000 кг). Трансмиссия обеспечивала три передачи вперед (3,19, 4,76 и 6,57 км/ч) и одну назад (3,64 км/ч).

Другой колесный электротрактор СТЗ-ВИЭСХ был разработан на базе серийного трактора СТЗ-15/30 Сталинградского тракторного завода с электродвигателем мощностью 28 л.с. при 960 об/мин [8] (рис. 4).

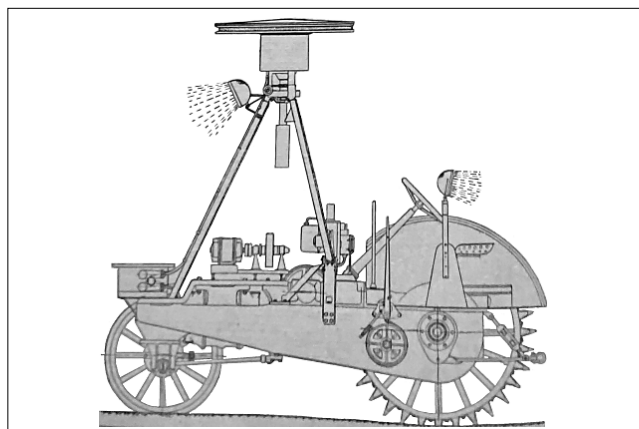


Рис. 4. Электротрактор системы ВИЭСХ на базе колесного трактора СТЗ-15/30
Fig. 4. Electric tractor VIESKh based on the STZ-15/30 wheeled tractor

Конструкция СТЗ-ВИЭСХ создавалась для апробации метода группового кабельного питания нескольких тяговых машин. Этот метод предусматривал подачу электроэнергии через 40-метровый кабель на головной трактор. Кабельный барабан размещался на специальной повозке, передвигающейся по оси обрабатываемого загона параллельно тяговым машинам. Остальные три-четыре электротрактора запитывались последовательно от

головного, таким образом предусматривалась экономия дорогостоящего медного кабеля. Длина кабеля между соседними электротракторами составляла 20 м. В конструкции отсутствовал большой барабан (на 300-500 м) для питающего кабеля.

Для фиксации приемного и передающего кабелей на вершине трехной мачты устанавливалась так называемая электротракторная головка. Конструктивно это был небольшой барабан с вертикальной осью вращения диаметром 0,25 м для кабеля длиной 20-25 м. Также предусматривался механизм, создающий всегда момент закрутки барабана, что позволяло поддерживать кабель в подвешенном состоянии. Головка располагалась на высоте 3 м. Вес трактора составлял 2990 кг. Трансмиссия обеспечивала три передачи вперед (2,93, 4,40 и 5,85 км/ч) и одну назад (4,04 км/ч).

В январе 1936 г. на Ремонтно-механическом заводе «Агроджойнт» в Джанкое (Крым) был изготовлен гусеничный электротрактор конструкции механика З.Л. Элькина [9] (рис. 5).

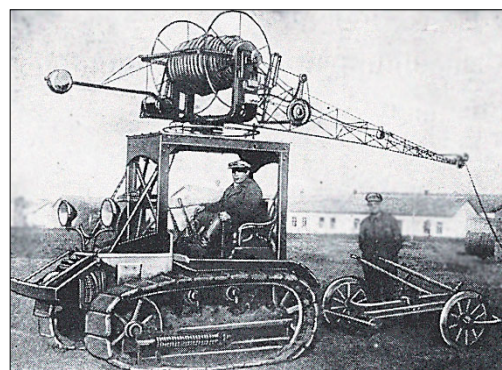


Рис. 5. Электротрактор системы механика З.Л. Элькина на базе гусеничного трактора «Катерпиллер-30»
Fig. 5. Electric tractor designed by mechanic Z.L. Elkin, based on the Caterpillar-30 crawler tractor

За основу использовался трактор «Катерпиллер-30», на котором двигатель внутреннего сгорания заменен на электрический мощностью 29 кВт и 960 об/мин. Отличительная особенность от систем А.И. Дидебулидзе и Данильченко заключалась в расположении кабельного барабана на крыше помоста, который возвышался над местом водителя. Барабан диаметром 0,3 м и шириной 0,72 м имел горизонтальную ось вращения и благодаря оригинальному креплению мог поворачиваться в горизонтальной плоскости. Кабель подавался на барабан посредством стрелы длиной 5,5 м, снабженной приемными роликами. Для устойчивости стрелы с противоположной стороны устанавливался рычаг с противовесом, вся конструкция могла поворачиваться вместе с барабаном на 360°. Длина питающего кабеля предусматривалась 1000 м, вес электротрактора с кабелем равнялся 5200 кг. Трансмис-

сия обеспечивала три передачи вперед (3,19, 4,76 и 6,57 км/ч) и одну назад (3,64 км/ч).

Опытная проверка электротракторов показала возможность их применения на полях в сельских районах широкой электрификации. Широкомасштабные испытания в 1935-1936 гг. имеющихся конструкций электротракторов позволили специалистам ВИАЭСХ выявить наиболее перспективные новые виды техники [7, 10]. Лучшие показатели были отмечены у электротрактора конструкции З.Л. Элькина.

Основываясь на полученных знаниях, специалисты ВИАЭСХ продолжили работу по совершенствованию конструкции электротрактора. Одним из ученых, возглавивших это направление, стал аспирант П.Н. Листов. Будущий академик ВАСХНИЛ Петр Николаевич Листов (1902-1981) приложил много усилий для развития этого направления прикладной науки. Вместе с инженерами В.Г. Стеценко и Т.П. Самойловой он создал несколько модификаций электротракторов на колесном и гусеничном ходу.

В 1938 г. усовершенствованные конструкции электротракторов испытывались на Машинно-тракторной станции имени Энгельса в АССР немцев Поволжья (часть современной Саратовской области). Проводились испытания электротрактора конструкции ВИАЭСХ и в хозяйствах Средней Азии (рис. 6).

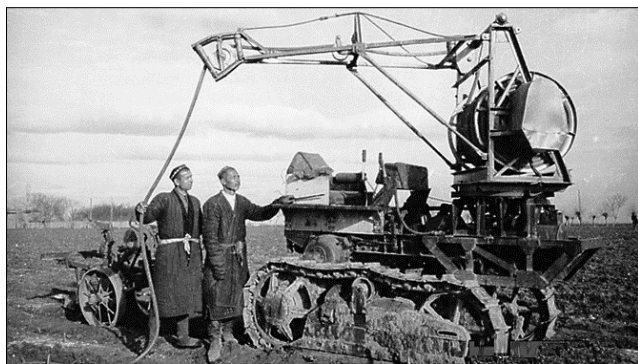


Рис. 6. Испытания электротрактора ВИАЭСХ в Средней Азии, 1938 г.

Fig. 6. Testing of the VIESKh electric tractor in Central Asia, 1938

Электротрактор ВИМЭ-4-500 (рис. 7) состоял из смонтированного на шасси гусеничного трактора СТЗ-НАТИ и трансформаторной подстанции, преобразующей высокое напряжение в рабочее. С помощью специальной мачты агрегат подключался в любой точке к высоковольтной линии электропередачи. Подстанция стояла на месте, а электротрактор двигался перпендикулярно к линии, обрабатывая участок. Электроснабжение трактора от подстанции осуществлялось по гибкому кабелю длиной 750 м.

В период Великой Отечественной войны работы по созданию электротракторов приостановились и возобновились только в послевоенные годы. В феврале 1945 г. советское правительство приняло решение «О развитии сельской электрификации», в рамках его реализации были вновь организованы работы по созданию электротракторов. Научно-исследовательской деятельностью занимались специалисты нескольких организаций, разрабатывая конструкции как гусеничных, так и колесных тяговых машин.

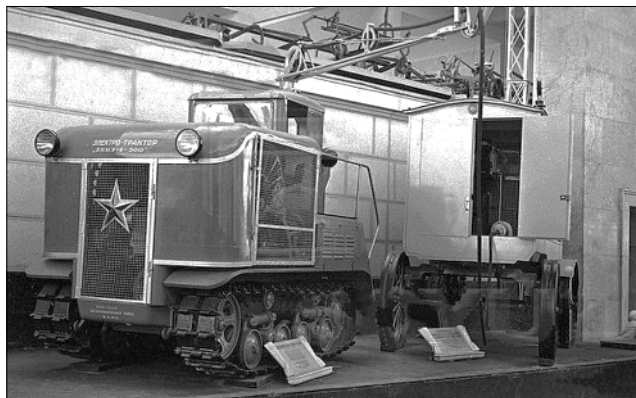


Рис. 7. Электротрактор ВИМЭ-4-500 на Всесоюзной сельскохозяйственной выставке, 1940 г.

Fig. 7. VIME-4-500 electric tractor at the All-Union Agricultural Exhibition, 1940

Используя опыт довоенных лет, П.Н. Листов, В.Г. Стеценко и другие сотрудники Всесоюзного НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства (ВИМЭ) спроектировали в 1945 г. электротрактор ВИМЭ-4-1000. Он отличался от предыдущей модели ВИМЭ-4-500 меньшим сечением кабеля, улучшенным токоъемником, пусковой аппаратурой и механизмом укладки кабеля. На электротракторе устанавливался трехфазный электродвигатель 48 кВт, барабан для 750 м гибкого кабеля с резиновой изоляцией. Номинальное напряжение было увеличено до 1000 В.

На опыте конструирования этих электротракторов в 1945-1946 гг. в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского (ЭНИН) АН СССР совместно с Всесоюзным НИИ электрификации сельского хозяйства (ВИАЭСХ выделился из ВИМЭ) на базе трактора СТЗ-НАТИ спроектирован улучшенный образец электротрактора ЭТ-5-ЭНИН-ВИАЭСХ. На раме трактора стоял асинхронный электромотор переменного тока с короткозамкнутым ротором мощностью 38 кВт с постоянным, не зависящим от нагрузки, и нерегулируемым числом оборотов 980 в минуту. Маховик, муфта сцепления, коробка передач, трансмиссия и ходовая система трактора СТЗ-НАТИ не подвергались изменениям (рис. 8).



Рис. 8. Гусеничные электротрактора ЭТ-5-ЭНИН-ВИЭСХ, 1949 г.

Fig. 8. ET-5-ENIN-VIESKh crawler-type electric tractors, 1949

Для намотки кабеля использовался вспомогательный электродвигатель 3 кВт, соединенный с барабаном через двухступенчатый шестеренный редуктор, цепную передачу и фрикционную муфту. Тормоз привода к барабану предотвращал произвольную размотку кабеля.

Для работы электротрактора на подлежащих обработке полях перпендикулярно к их длине строили высоковольтные полевые электролинии напряжением 6000 или 10 000 В. Электролинии устанавливали параллельно друг другу на расстоянии двойной длины кабеля. Электротрактор питался от высоковольтной линии через передвижную трансформаторную подстанцию, которая снижала высокое напряжение до рабочего. На четырехколесной повозке монтировались понижающий трехфазный трансформатор с аппаратурой управления, а также аппараты защиты и сигнализации. Подстанция могла быть подключена к любой точке высоковольтной линии без выключения в ней напряжения через выдвижную мачту с роговидными токосъемами или посредством подъемных штанг. При длине кабеля на 800 м от одного присоединения подстанции к линии мог быть обработан участок поля от 15 до 60 га (в зависимости от длины загона).

Чтобы обрабатывать поля в двух взаимно перпендикулярных направлениях электротракторный агрегат снабжался тележкой для перевозки дополнительной длины кабеля 800 м. На четырехколесной тележке с прицепом размещался кабельный барабан или бункер с приводом от ходовых колес тележки. При наличии в агрегате кабельной тележки электротрактор от одного присоединения подстанции к сети мог обрабатывать поле площадью свыше 200 га.

Постановлением Совета Министров СССР от 31 августа 1948 г. № 3273 предписывалось изготовить для всестороннего испытания 30 тракторов ЭТ-5-ЭНИН-ВИЭСХ. Опытные образцы были изготовлены на Свердловском мотороремонтном заводе Минсельхоза СССР. Широкомасштабные

испытания в 1949 г. на трех МТС выявили существенные конструктивные недостатки тракторов: неудовлетворительное положение центра тяжести, завышенный вес, недостаточная прочность отдельных механических узлов, неудовлетворительные габариты по ширине и высоте, заниженные скорости поступательного движения. Электрооборудование трактора не гарантировало безопасность работы обслуживающего персонала, кабель не отвечал требованиям работы трактора и не обеспечивал необходимую долговечность, трансформаторная подстанция была недостаточно устойчива при передвижении.

В принятом в июне 1950 г. Постановлении Совета Министров СССР № 2736 за подписью И.В. Сталина был намечен комплекс работ по продолжению создания электротракторов ЭТ-5-ЭНИН-ВИЭСХ с учетом выявленных недостатков. Предусматривалось организовать специализированное бюро по электротракторам на Харьковском тракторном заводе и специальную лабораторию в Научно-исследовательском тракторном институте (НАТИ). Устанавливались сроки: не позднее 1 января 1951 г. изготовить и представить на испытания три экземпляра электротракторов и 30 не позднее 15 мая 1951 г.

Харьковский тракторный завод совместно с Ереванским электромеханическим заводом и заводами кабельной промышленности разработали гусеничный электротрактор мощностью 44 кВт, вначале получивший наименование ХТЗ-12 (рис. 9), а после некоторой доработки ХТЗ-15.

Модель ХТЗ-15 [11] была выполнена на базе шасси гусеничного трактора ДТ-54, а схема cableприемного устройства использовалась от электротрактора ЭТ-5-ЭНИН-ВИЭСХ. Тяговым был трехфазный асинхронный короткозамкнутый защищенный электродвигатель с повышенным скольжением ротора и числом оборотов 1500 в минуту. Номинальное рабочее напряжение составляло 1000 В. При разгоне трактора и переключении шестерен коробки передач применялась муфта сцепления. Натяжение кабеля в режиме намотки и размотки регулировалась с помощью электромагнитной муфты, изменяющей передаваемый момент в зависимости от относительной скорости вращения ведущих и ведомых частей. Постоянный ток возбуждения обмоток электромагнитной муфты вырабатывался генератором, который вращался через ременный привод от тягового электродвигателя. Конструкция трансмиссии обеспечивала четыре скорости вперед (3,59, 4,65, 5,43 и 6,28 км/ч) и одну назад (2,40 км/ч). Эксплуатационный вес равнялся 6600 кг (5600 кг без кабеля). Электротрактор при вспашке агрегатировался с оборотным плугом ПО-5-35, что позволяло двигаться челночным способом и существенно расширяло возможности на основной обработке почвы.

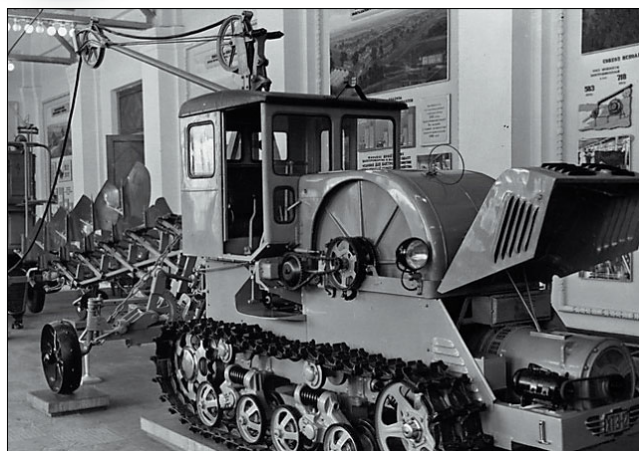


Рис. 9. Гусеничный электротрактор ХТЗ-12 на Всесоюзной сельскохозяйственной выставке

Fig. 9. HTZ-12 crawler-type electric tractor at and the All-Union Agricultural Exhibition

В 1945 г. специалисты Центральной станции механизации и агротехники хлопководства (ЦСМАХ) Союзного хлопкового института (СОЮЗНИХИ) приступили к созданию электротрактора для хлопководческих хозяйств.

В 1948 г. на базе колесного трактора «Универсал-1» был изготовлен и испытан образец электротрактора ЭТУ-1 для пропашных работ. В следующем году построена и испытана улучшенная модель ЭТУ-12, оборудованная электромотором переменного тока 15,2 кВт при напряжении 380 В. Особенности конструкции ЭТУ-12:

- расположение барабана с кабелем по продольной оси трактора;
- фиксированное положение стрелы;
- согласованное вращение кабельного барабана и поступательного движения трактора.

С помощью кабеля длиной около 400 м электротрактор соединялся с передвижной трансформаторной подстанцией, которая не имела мачты токосъемника и включалась в выводные устройства на столбах высоковольтной линии.

Дальнейшие работы по усовершенствованию конструкции колесного электротрактора для хлопководства привели к созданию модели ЭТУ-13. Мощность увеличилась до 17 кВт при напряжении 500 В, рабочая скорость варьировалась от 3,15 до 6,50 км/ч.

НАТИ совместно с Минским тракторным заводом и Институтом автоматики и телемеханики АН СССР разработали колесный электротрактор ЭТ-36 мощностью 27 кВт (рис. 10) [12]. Он был выполнен на базе трактора «Беларусь» МТЗ-2 с заменой дизельного двигателя на трехфазный асинхронный с фазовым ротором электродвигатель защищенного исполнения мощностью 27 кВт, номинальным рабочим напряжением 1000 В, частотой вращения 1500 оборотов в минуту.

Оригинальное кабелеприемное устройство с вертикальным барабаном, ось вращения которого совпадала с осью стрелы, позволяло исключить закручивание кабеля при поворотах трактора. Натяжение кабеля регулировалось с помощью фрикционных муфт, работающих в масле, а кратковременные нагрузки в кабеле при движении трактора по неровностям амортизировались. Длина гибкого кабеля составляла 800 м. Конструкция трансмиссии обеспечивала четыре скорости вперед (4,7, 5,7, 6,1 и 7,5 км/ч) и одну назад (3,3 км/ч). Эксплуатационный вес составлял 3800 кг с кабелем. Электротрактор на вспашке агрегатировался с оборотным плугом ПО-3-30.

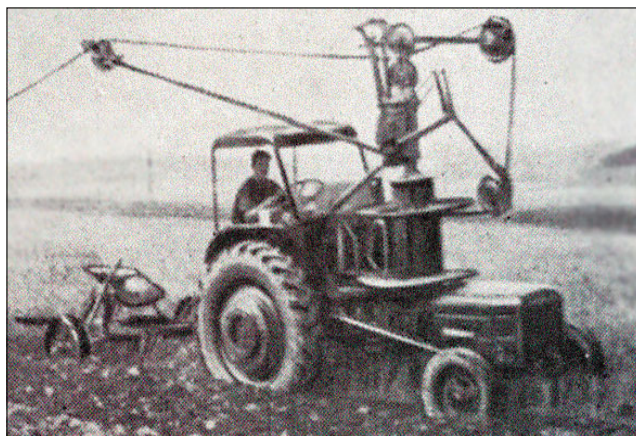


Рис. 10. Электротрактор ЭТ-36, 1954 г.

Fig. 10. ET-36 electric tractor, 1954

Минским тракторным заводом и институтом НАТИ было построено пять образцов электротракторов ЭТ-36. В 1954-1956 гг. все они проходили испытания с активным участием ВИЭСХ и ТСХА имени К.А. Тимирязева. В частности исследованиями НАТИ было установлено, что короткозамкнутые электродвигатели трехфазного тока имели удовлетворительные показатели в установившемся режиме, но потребляли значительную мощность в пусковом режиме. Кроме того, агрегаты были недостаточно устойчивы при перегрузках: при разгоне, особенно при резком включении муфты сцепления, происходила самопроизвольная остановка двигателя («опрокидывание»). Для устранения этого недостатка на электротракторе ЭТ-36 был установлен фазовый электродвигатель переменного тока.

В целях электрификации производственных процессов в полеводстве и огородничестве в колхозах Московской области в соответствии с постановлениями руководства МГК ВКП(б) было решено построить опытные колесные электротрактора на базе трактора, выпускаемого с 1947 г. московским заводом ВАРЗ [13]. Разработку проекта поручили ВИЭСХ и ВИМЭ. К выпуску узлов и деталей трактора Москворецкий райком ВКП(б) привлёк 14 предприятий, в том числе оборонной промышленности.

К июню 1949 г. узлы и детали поступили на Внуковский авиаремонтный завод (ВАРЗ) для сборки. К концу июня были сделаны четыре опытных электротрактора, получившие наименование ВАРЗ-ЭТК-500, или ЭТК-500.

Электротрактор собирался на базе шасси колесного трактора ВАРЗ с заменой двигателя внутреннего сгорания короткозамкнутым асинхронным тяговым электродвигателем МА-86/6 мощностью 27 кВт с частотой вращения 975 оборотов в минуту при напряжении 500 В (рис. 11).

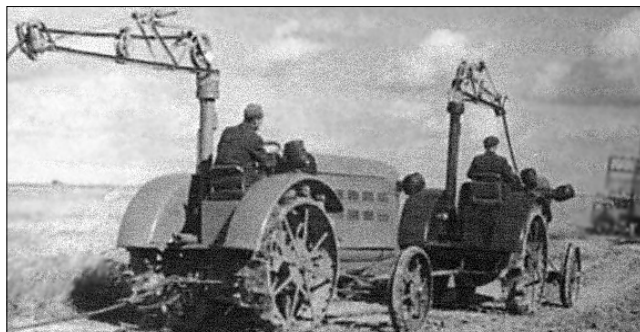


Рис. 11. Колесный электротрактор ЭТК-500, 1949 г.
Fig. 11. ETK-500 wheeled electric tractor, 1949.

Барабан с кабелем располагался горизонтально по продольной оси трактора и приводился во вращение с помощью короткозамкнутого асинхронного электродвигателя АДФЛ-32/6 с частотой вращения 980 об/мин. Вращение передавалось посредством комбинированного шестеренно-цепного редуктора и сухой однодисковой муфты. Включение и выключение вспомогательного электродвигателя было автоматизировано и согласовано с движением электротрактора. Барабан снабжался ленточным тормозом и винтовым кабелеукладчиком. Кабель типа ГРШ был длиной 460 м и диаметром 34 мм.

Вращающаяся стрела кабелеприемного устройства располагалась в левой стороне электротрактора над задним ведущим мостом. Трансмиссия обеспечивала три скорости вперед (3,31, 4,24 и 6,96 км/ч) и одну назад (3,92 км/ч). Эксплуатационный вес ЭТК-500 с кабелем 3200 кг. Работу электротрактора обеспечивали два трансформатора напряжения типа ССО-250 по 200 Вт. Испытания проходили в условиях эксплуатации в Мытищинском районе и в Горках Ленинских Московской области в 1949 г. под руководством специалистов Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева.

К проблеме создания колесного электротрактора в Московском регионе привлекались и специалисты военной промышленности [13]. Под руководством известного конструктора артиллерийских орудий В.Г. Грабина (1900-1980) в НИИ-58 создавалась своя модель электротрактора МЭТ-1. Трансмиссия и органы управления (муфта сцепления, ры-

чаг перемены скоростей, ручной тормоз) были заимствованы от колесного трактора ВАРЗ. Конструкция МЭТ-1 была во многом схожа с ЭТК-500, А некоторые технические параметры были разные.

Так, на МЭТ-1 тяговым был короткозамкнутый асинхронный электродвигатель МА-204-1/6 мощностью 25,5 кВт с частотой вращения 980 об/мин при напряжении 500 В. Вращающаяся стрела кабелеприемного устройства располагалась над барабаном на четырех стойках в передней части электротрактора. Барабан приводился во вращение от электродвигателя АД-32/6 трехфазного переменного тока частотой 930 об/мин. Вращение передавалось посредством комбинированного шестеренно-цепного редуктора (передаточное число 1:10,8) и сухой однодисковой муфты. Включение и выключение вспомогательного электродвигателя было автоматизировано и согласовано с движением электротрактора. Барабан снабжался ленточным тормозом и винтовым кабелеукладчиком. Применялся кабель типа ГРШС длиной 450 м и диаметром 34 мм.

Конструкция трансмиссии обеспечивала три скорости вперед (3,50, 4,50 и 7,40 км/ч) и одну назад (4,20 км/ч). Эксплуатационный вес равнялся 3600 кг с кабелем. Работу электротрактора обеспечивал однофазный трансформатор с воздушным охлаждением ТП-250, 380/12 Вт.

Итоги работ по созданию отечественного электротрактора

Разработкой конструкции отечественного электротрактора занимались довольно продолжительное время (1932-1956 гг.) с привлечением институтов Академии наук СССР, организаций оборонной промышленности, специалистов сельского хозяйства. Это направление курировал И.В. Сталин, как Председатель Совета Министров Союза ССР. Были подписаны несколько постановлений по поддержке и развитию тематики использования электроэнергии в полеводстве.

Широкая эксплуатационная проверка электротракторов различной конструкции в нескольких МТС выявила их работоспособность и возможность повышения чистой производительности на 10-15% по сравнению с базовыми дизельными тракторами в случаях, когда электротракторы работали без поломок [14]. Вместе с тем, по оценкам специалистов НАТИ, были установлены недостатки электротракторов с кабельным питанием.

- Отсутствие универсальности электротракторов для выполнения транспортных работ. Для вывода в поле или при движении от загона к загону они должны буксироваться дизельными тракторами. В связи с этим эксплуатация электротракторов сильно усложнялась, а также возрастала многомарочность тракторного парка.

- Несчастные случаи с обслуживающим персоналом при нарушении правил эксплуатации высоковольтных установок.

- Большие затраты количества дефицитной меди (около 500-700 кг на электротрактор) для изготовления кабеля электродвигателей и трансформаторной подстанции.

- Высокие капитальные затраты на постройку высоковольтных линий (6000 или 10 000 В) на полях, которые должны быть расположены на расстоянии примерно 1 км друг от друга. Кроме этого линии не использовались зимой и в периоды, когда на полях не производилось механизированных работ.

- Низкий срок службы кабеля (70-1000 ч) вследствие тяжелых условий работы. Общая потеря мощности в подводящем кабеле достигала 13%.

- Масса дополнительных агрегатов электротракторов (барабан, стрела и другие приспособления) составляли 15-20% от массы шасси трактора. В результате электротракторы были тяжелее базовых дизельных тракторов на 10-15% (без учета массы кабеля и подстанции).

Таковы были выявленные недостатки электротрактора, которые не смогли устранить инженеры середины XX века. Эти недостатки выливались в экономическую неэффективность вновь создаваемой техники, что исключало ее внедрение в сельскохозяйственное производство. Решение проблем, тормозящих внедрение электротракторов, требовало новых идей и технологий, которых в то время не было у отечественных специалистов.

В эти же годы двигатель внутреннего сгорания совершенствовался стремительными темпами, значительно улучшилась его экономичность, существенно повысились надежность и экологичность. В 1950-х годах в СССР были разведаны громадные запасы нефти, начиналась их промышленная добыча и переработка, в значительной степени был преодолен дефицит нефтепродуктов. Все это снижало актуальность использование электроэнергии в тракторной технике.

Результаты экспериментальных работ по электротракторам обсуждались в 1956 г. на специальной конференции в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского АН СССР. Конференция, которой руководил член-корреспондент АН СССР В.И. Вейц, не подтвердила целесообразности внедрения в сельском хозяйстве электротракторов с кабельным питанием, и работы над этой пробле-

мой были повсеместно прекращены. С 1957 г. направление по электротракторам в планы научных организаций не включались.

В конце 1970-х годов в нашей стране был отмечен всплеск предложений по созданию конструкции электротрактора с учетом новых технических решений. В этой связи институт НАТИ однозначно высказался о нецелесообразности возобновления работ по мощным электротракторам с кабельным питанием, выполняющих полевые операции на значительных площадях.

В то же время электротракторы небольшой мощности с кабельным или троллейным питанием, по их мнению, могли найти применение в отраслях, территориально ограниченных, с постоянными трассами: в животноводстве (внутри зданий), тепличном хозяйстве, а также при возделывании многолетних культур (чай, виноград).

Ученые НАТИ, учитывая необходимость исключения расхода нефтепродуктов в полеводстве в дальней перспективе, предлагали использовать дешевую электроэнергию атомных и гидроэлектростанций в производстве из недефицитного сырья синтетического топлива для заправки тракторов. Это бы сохраняло преемственность с традиционными конструкциями и обеспечило автономность и универсальность энергетических средств сельскохозяйственного производства.

Выводы. За время работы (1930-1956 гг.) над конструкцией электротрактора советские специалисты создали не менее 15 разновидностей опытных образцов тяговых машин колесного и гусеничного типа. Наиболее совершенные гусеничные конструкции тракторов ХТЗ-15 и ЭТ-5-ЭНИН-ВИЭСХ прошли всестороннюю хозяйственную проверку.

Стабильность тяговых свойств электротрактора, простота технического обслуживания, экономия нефтяного топлива и смазочных материалов, а также низкий шум и отсутствие выхлопных газов были главными преимуществами перед тракторами с двигателями внутреннего сгорания. В то же время низкая надежность питающего кабеля, ограниченные возможности перемещения, наличие высоковольтных линий электропередач на обрабатываемых полях сводили на нет все их достоинства.

Технические проблемы, возникшие на пути внедрения электротрактора, не смогли преодолеть инженеры середины XX века. В 1956 г. тематика по этому направлению была закрыта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Листов П.Н. Электротрактор инж. Кемпа (Ашбуртак, Новая Зеландия) // *Электрификация сельского хозяйства*. 1935. №2. С. 76-78.
2. Листов П.Н. Электротяговые машины непосредственной тракции // *Электрификация сельского хозяйства*. №2.1937. С. 18-23.
3. Шаров В.В. Фрагменты истории отечественного тракторостроения: технические очерки по тракторостро-

ению в России. Кн. I. Конец XIX – первая половина XX веков. М.: РА «Идеи оптом». 2015. 96 с.

4. Шаров В.В. Фрагменты истории отечественного тракторостроения: технические очерки по тракторостроению в России. Кн. III. Послевоенное восстановление и переход к планомерному развитию тракторостроительной отрасли 1946-1955 гг. М.: ИКАР. 2022. 104 с.
5. Гвоздецкий В.Л. Становление отечественной электрификации. План ГОЭЛРО // Вихревая динамика развития науки и техники. Россия/СССР. Первая половина XX века: в трех томах. Т. II: Экстремальный режим развития науки и техники. ИИЕТ РАН. Саратов: Амирит. 2018. С. 20.
6. Сельскохозяйственная энциклопедия. Т. 6. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Советская Энциклопедия. 1975. 891 с.
7. Дмитриев И.И. Результаты сравнительных испытаний 4 советских электротракторов кабельного питания // *Электрификация сельского хозяйства*. N4. 1935. С. 43-54.
8. Краснов А.А. Способы индивидуального и группово-

го кабельного питания электротракторов и применение последнего для электрификации трактора СТЗ // *Электрификация сельского хозяйства*. N6. 1934. С. 31-37.

9. Листов П.Н. Электротрактор новой конструкции // *Электрификация сельского хозяйства*. N2. 1936. С. 26-29.
10. Листов П.Н. Результаты испытаний четырёх электротракторов по спаренной системе работы // *Электрификация сельского хозяйства*. N4. 1936. С. 52-62.
11. Краткие технические характеристики советских тракторов, находящихся на производстве и экспериментальных. М.: НАТИ. 1954. 36 с.
12. Краткие технические характеристики советских тракторов. М.: НАТИ. 1955. 56 с.
13. Кириндас А. Механическая тяга. Первенец сталинских пятилеток // *Техника и вооружение*. N7. 2013. С. 33-40.
14. Листов П.Н. Некоторые итоги работы электрических тракторов // *Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства*. N1. 1952. С. 25-32.

REFERENCES

1. Listov P.N. Electric tractor by Engineer Kempa (Ashburta, New Zealand). *Electrification of Agriculture*. N2. 1935. 76-78 (In Russian).
2. Listov P.N. Direct traction electric machines. *Electrification of Agriculture*. N2. 1937. 18-23 (In Russian).
3. Sharov V.V. Fragments of the domestic tractor construction history. Technical essays on tractor construction in Russia. Book I: The late 19th century to the first half of the 20th century. Moscow: Ideas Wholesale. 2015. 96 (In Russian).
4. Sharov V.V. Fragments of the domestic tractor construction history. Technical essays on tractor construction in Russia. Book III. Post-war reconstruction and transition to planned development of the tractor industry 1946-1955. Moscow. IKAR. 2022. 104 (In Russian).
5. Gvozdetzky V.L. The formation of domestic electrification. The GOELRO Plan. Rapid evolution of science and technology development in Russia/USSR. The first half of the 20th century. Vol. II: The high-pressure environment of science and technology development. IET RAS. Saratov. Amirite. 2018. 721 (In Russian).
6. Agricultural Encyclopedia. Vol. 6. 4th ed. Moscow: Soviet Encyclopedia. 1975. 891 (In Russian).
7. Dmitriev I.I. Test results comparing four Soviet cable-powered electric tractors. *Electrification of Agriculture*. N4. 1935. 43-54 (In Russian).
8. Krasnov A.A. Methods of individual and group cable power supply for electric tractors: Application in electrifying the STZ tractor. *Electrification of Agriculture*. N6. 1934. 31-37 (In Russian).
9. Listov P.N. New design for electric tractors. *Electrification of Agriculture*. N2. 1936. 26-29 (In Russian).
10. Listov P.N. Test results of four electric tractors operating in a coupled work system. *Electrification of Agriculture*. N4. 1936. 52-62 (In Russian).
11. Brief technical specifications of soviet tractors at production and experimental stages. Moscow: NATI. 1954 (In Russian).
12. Brief technical specifications of soviet tractors. Moscow: NATI. 1955. 71 (In Russian).
13. Kirindas A. Mechanical traction: a pioneer of Stalin's five-year plans. *Technology and Armament*. N7. 2013. 33-40 (In Russian).
14. Listov P.N. Electric tractor operation results. *Mechanization and electrification of socialist agriculture*. 1952. N1. 25-32 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – общее руководство, постановка задач исследования, научное редактирование текста статьи;
Шаров В.В. – анализ предметной области, написание текста и формулирование выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – general guidance, formulation of research tasks, scientific editing of the manuscript;
Sharov V.V. – analysis of the subject area, writing the manuscript and conclusions formulation.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.06.2024

30.08.2024

EDN: WZGWIN

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22



Научная статья

УДК 631.174



Этапы развития технологий и технических средств для внесения удобрений и защиты растений

Юлия Сергеевна Ценч¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Иван Вадимович Сидоров²,
преподаватель колледжа,
младший научный сотрудник,
e-mail: nit123@yandex.ru

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

²Гжельский государственный университет, Московская обл., Российская Федерация

Реферат. Опыт технологического становления нашей страны является важным источником идей и подходов к дальнейшему развитию сельского хозяйства на основе отечественной техники и технологий. Исследование эволюции техники и технологий предполагает введение периодизации, которая применительно к химизации сельского хозяйства на данный момент разработана минимально, чаще подменяясь набором ключевых дат и биографий. В этой связи представляется актуальным разработать целостный вариант структурирования истории химизации с четко определенными этапами. (*Цель исследования*) Предложить и обосновать авторский вариант периодизации истории химизации сельского хозяйства России. (*Материалы и методы*) Изучили монографии, нормативно-правовые акты, собрания сочинений, работы выдающихся ученых с использованием хронологического, генетического методов и периодизации. (*Результаты и обсуждение*) Предлагаемая периодизация интегрирует ранее высказываемые историко-научные идеи и гипотезы. Развитие технологий и технических средств для внесения удобрений и защиты растений в России насчитывает более чем 250-летнюю историю, которую можно разделить на шесть этапов: подготовительный, формирующий, экстенсивный, стабилизационный, интенсивный и децентрализованный. Началом отсчета выбрано опубликование А.Т. Болотовым труда «Об удобрении земель» в 1770 году. В настоящее время складываются предпосылки нового этапа развития химизации, характерной чертой которого станет цифровизация, сопряженная с механизацией, роботизацией и биологизацией высшей степени. (*Выводы*) Предложенный подход к структурированию истории химизации сельского хозяйства России полезен как исследователям данной проблемы, так и в деле подготовки инженерных кадров для агропромышленного комплекса. Наличие четких ориентиров повышает эффективность изучения исторических аспектов сельского хозяйства, науки и техники, необходимых для профессионального становления будущих агрономов и инженеров.

Ключевые слова: периодизация, развитие науки и техники, внесение удобрений, защита растений, агрохимия, химизация сельского хозяйства, сельскохозяйственная техника, удобрения, пестициды.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Сидоров И.В. Этапы развития технологий и технических средств для внесения удобрений и защиты растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 14-22. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22. EDN: WZGWIN.

Scientific article

Stages of Technologies and Technical Means Development for Fertilization and Plant Protection

Yuliya S. Tsench¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Ivan V. Sidorov²,
college lecturer, junior researcher,
e-mail: nit123@yandex.ru

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

²Gzhel State University, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. The experience of technological development of our country is an important source of ideas and approaches to the further development of agriculture based on domestic equipment and technologies. The study of its evolution necessitates the using of periodization. It is currently undeveloped for chemization of agriculture, more often being replaced by a set of key dates and biographies. So, it is necessary to develop a holistic version of the structuring of chemization history. (*Research purpose*) To propose and substantiate the authors' version of Russian agriculture chemization periodization. (*Materials and methods*)

Monographs, legal acts, collected works and publications of outstanding scientists were studied using chronological, genetic and periodization methods of historical research (*Results and discussion*) The proposed periodization integrates previous historical ideas and hypotheses. The chemization of Russian agriculture has more than 250 years of history, which can be divided into 6 stages: preparatory (prehistory of chemization, which has three sub-stages), formative, extensive, stabilization, intensive and decentralized. The starting point is a publication of work «On lands fertilization» by A.T. Bolotov in 1770. Currently, the prerequisites for a new stage in the development of chemization are being formed, and its main attributes are digitalization, mechanization and biologization in the highest degree. (*Conclusions*) The proposed approach to structuring the history of Russian agriculture chemization is useful both for researchers and for training organization. The presence of clear guidelines increases the effectiveness of studying the historical aspects of agriculture, science and technology, which are so necessary for the professional and personal development of future agronomists and engineers.

Keywords: periodization, history of science and technology, fertilization, plant protection, agrochemistry, chemicalization of agriculture, agricultural machinery, fertilizers, pesticides.

■ **For citation:** Tsench Yu.S., Sidorov I.V. Stages of technologies and technical means development for fertilization and plant protection. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 14-22 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-14-22. EDN: WZGWIN.

Совершенствование техники и технологий применения разнообразных химических средств является одним из ключевых направлений развития сельского хозяйства. Однако если накопление знаний о взаимодействии компонентов агроценозов уходит своими корнями в глубину веков, то химизация сельского хозяйства как предмет научного осмысления весьма молода. Данное понятие 100 лет ввел в научный оборот выдающийся агрохимик и агроном Д.Н. Прянишников. В 2024 году также празднуется 60-летие создания государственной агрохимической службы.

Однако обращение к закономерностям развития сельского хозяйства России актуально и вне юбилейных дат. Как и столетие назад, перед страной стоят задачи обеспечения продовольственной безопасности, развития собственных технических и технологических решений в условиях рыночных ограничений. Предшествующий опыт в связи с этим особенно востребован.

Цель исследования – предложить и обосновать авторский вариант периодизации истории химизации сельского хозяйства России.

Материалы и методы. При подготовке статьи использовались монографии, нормативно-правовые акты, собрания сочинений и отдельные работы выдающихся ученых. Обработка полученных данных проведена с применением историко-научных методов: хронологического, генетического и периодизации.

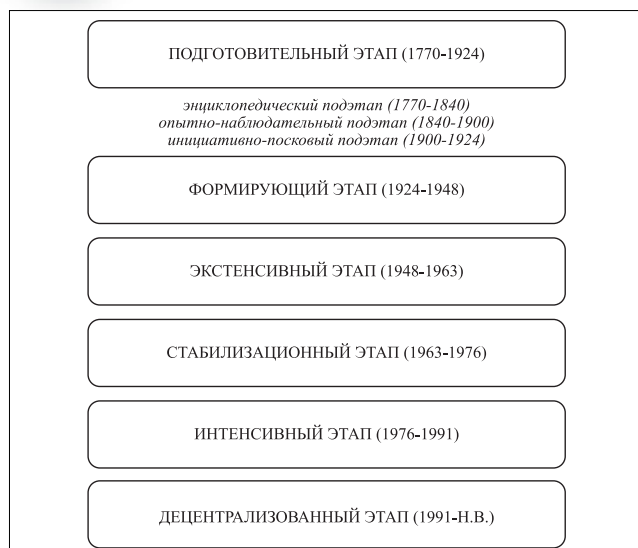
Результаты и обсуждение. Изучение эволюции процессов и явлений предполагает введение некой периодизации. Такой опыт, притом значительный, накоплен в почвоведении (А.А. Ярилов, Д.Г. Виленский, Н.Н. Соколов, В.А. Ковда, Б. Г. Розанов, И.А. Крупеников, Г.В. Добровольский, А.С. Керженцев, И.В. Иванов и Т.С. Луковская), имеется он в защите растений и в агрохимии, где классическими

в этом отношении стали труды академика В.Г. Минеева. Однако его нельзя применить в полной мере к химизации сельского хозяйства, поскольку, кроме агрохимии как своей теоретической основы, она включает множество иных аспектов – технических, экономических, экологических и т.д. По этой причине периодизация развития химизации в сельском хозяйстве на сегодняшний день разработана минимально, чаще подменяясь набором ключевых дат и биографий. В связи с этим представляется весьма актуальным разработать целостный вариант структурирования истории химизации с четко определенными этапами.

Предлагаемая авторами периодизация интегрирует предшествующие историко-научные идеи и гипотезы. Так, точкой отсчета истории химизации сельского хозяйства России выбрано опубликование А.Т. Болотовым в 1770 г. в Трудах Вольного экономического общества работы «Об удобрении земель», что ранее было предложено А.И. Осиповым, В.П. Якушевым и В.В. Якушевым [1]. С этой точкой зрения уместно согласиться, поскольку А.Т. Болотов традиционно рассматривается как основоположник отечественной агрономии, а С.П. Торшин и вовсе называет его первым российским ученым-агрохимиком [2].

Выделение экстенсивного и интенсивного этапов химизации также проводили ранее В.Н. Кудяров и В.М. Семенов, однако не в контексте истории химизации в целом, а применительно к конкретной проблеме обеспечения адекватного азотного питания в земледелии [3].

Новизна предлагаемой периодизации состоит в переносе этих этапов на всю проблематику химизации, уточнении их состава и хронологических рамок с учетом уже существующих вариантов в смежной проблематике [4]. Таким образом, она имеет следующий вид.



Периодизация истории химизации сельского хозяйства России (авторский вариант)

Periodization of the history of Russian agriculture chemization (authors' version)

Подготовительный этап (1770-1924 гг.)

Это своего рода предыстория химизации. Идет накопление эмпирического материала, предпринимаются попытки его теоретического осмысления первоначально в рамках естественных наук (химии, биологии), а с середины XIX века самостоятельной науки агрохимии. Однако в целом химизация как научно обоснованный, организованный процесс остается предметом внимания главным образом энтузиастов от науки и практики.

Подготовительный этап делится на три подэтапа – энциклопедический, опытно-наблюдательный и инициативно-поисковый.

• Энциклопедический подэтап (1770-1840 гг.) связан с именами А.Т. Болотова, А.А. Нартова, И.М. Комова, А.П. фон Пошмана и М.Г. Павлова. В этот период накопление знаний производится преимущественно исследователями-энциклопедистами (что отражено в его названии). Проведенные этими учеными работы носят эмпирический характер, что не умаляет их значения. В контексте заявленной проблемы особенно интересны, кроме классических и широко известных работ А.Т. Болотова и А.А. Комова, принадлежащая перу А.А. Нартова первая русская статья о необходимости известкования («Об удобрении земли жжёной известью», 1771 г.) и идея А.П. фон Пошмана о целенаправленном производстве минеральных удобрений, подкрепленная его же изобретением – по всей видимости, первой «машиной» для их внесения – т. н. «навозной тележкой» (1802-1803 гг., опубликование 1809 г.).

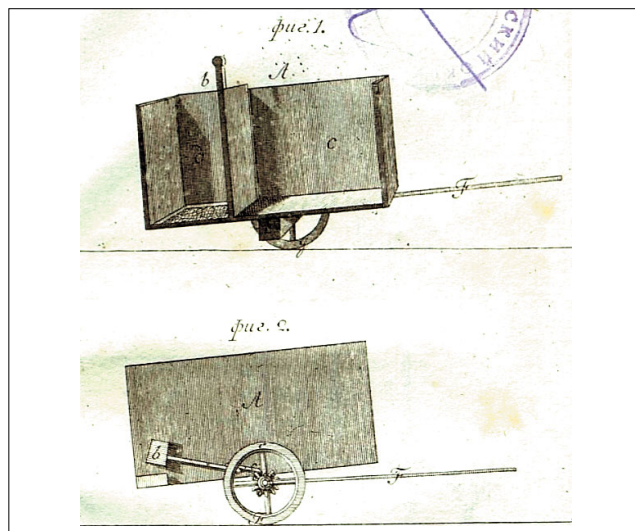
М.Г. Павлов по праву может рассматриваться как первый организатор опытного дела в России, а

его «Земледельческая химия...» является одним из первых отечественных руководств по агрохимии. Велика роль Павлова (формально доктора медицины) в распространении сельскохозяйственных знаний. Однако к середине XIX века формирование агрохимии уже подходило к концу, и наступало время профессионалов. Примечательно, что Ю. Либих также считал 1840-й год знаковым в связи с обнаружением им своей теории минерального питания растений, подтвердившей тесную связь химии и сельского хозяйства.

• Опытнo-наблюдательный подэтап (1840-1900 гг.) связан с именами Я.А. Линовского, П.А. Ильенкова, И.А. Стебута, Д.И. Менделеева, А.Н. Энгельгардта, А.П. Людоговского, А.Е. Зайкевича, П.А. Костычева, К.А. Тимирязева и др. Все они являлись профессионалами в области химии, биологии или сельского хозяйства, и их предложения, несмотря на сохраняющуюся практическую направленность, опирались уже на научные достижения и методы, а не исключительно на опыт и наблюдения.

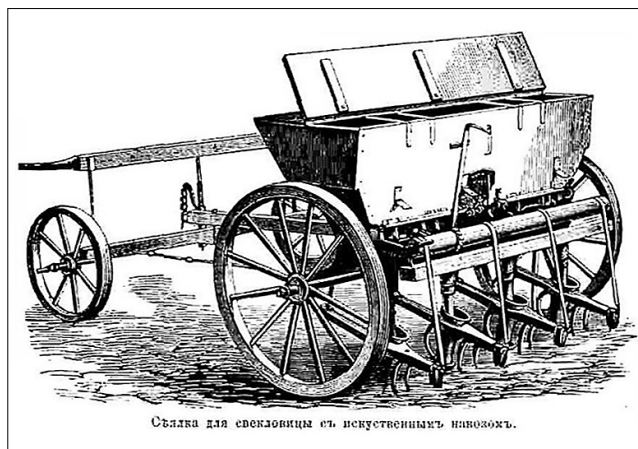
Я.А. Линовский – преемник Павлова в Московском университете – интересен и как историк науки, поскольку его перу принадлежит блестящий анализ («критический разбор», как он сам назвал свою работу) предшествующих и современных ему теорий питания растений. В части конкретных научно-технических достижений этого подэтапа следует отметить:

• новый, экономически эффективный способ получения фосфорных удобрений, предложенный П.А. Ильенковым;



Предположительно первый русский проект машины для внесения удобрений и известкования – «навозная тележка» А.П. фон Пошмана (начало XIX в.)

Presumably the first Russian project of fertilizer and lime distributor - the «manure cart» invented by Anton von Poschmann (early 1800s)



Свекловичная сеялка с отсеками для удобрения, представленная на XIV Всероссийской мануфактурной выставке (1870 г.)

A sugar-beet seeder with containers for fertilizer, presented at the XIV All-Russian Manufactory Exhibition (1870)

- исследования И.А. Стебута в области известкования почв, высоко оцененные Д.И. Менделеевым и А.Н. Энгельгардтом [5]. Проблема кислых почв до сих пор актуальна для современной России, особенно с учетом снижения объемов работ по известкованию в постсоветское время (к 2016 г. они сократились в 30 раз по сравнению с 1990 г.) [6];

- дальнейшее развитие Д.И. Менделеевым и А.Н. Энгельгардтом опытного дела, в которое они привнесли строгую научную методологию. Примечательно, что если Д.И. Менделеев относился к фосфорным удобрениям более сдержанно, то А.Н. Энгельгардт приступил к изучению отечественного сырья для их изготовления, традиционно рассматриваемого как некондиционное. Он же развил предложенный П.А. Ильенковым способ и смог добиться организации первых производств по размолу фосфоритной муки в конце 1860-х годов. Важно отметить, что эти и другие работы состоялись при большой поддержке основанного столетием ранее Екатериной II Вольного экономического общества, оказавшегося весьма полезным и на предыдущем этапе;

- фундаментальные открытия К.А. Тимирязева – некогда студента и помощника Д.И. Менделеева в проведении агрономических опытов – в области питания растений, совершенствование им вегетационного метода, изучение роли микроэлементов в жизни растений, пропаганда агрохимических знаний;

- создаются научные основы техники химизации, в частности, механизированного внесения удобрений, что связано с именем А.Е. Зайкевича. Несмотря на то, что опыты по местному внесению удобрений предпринимались за рубежом (в Германии, Бельгии и др.), эффективная механизация это-

го процесса была предложена именно русским ученым. Также именно А.Е. Зайкевич доказал, что в удобрениях нуждается даже чернозем, в чем сомневался сам В.В. Докучаев, основатель отечественного почвоведения.

Конечной точкой данного этапа избран 1900 г. – защита Д.Н. Прянишниковым докторской диссертации о метаболизме растений, выводы которой составили научную основу применения азотных удобрений. Как и ныне, ученая степень доктора подтверждает решение ее обладателем крупной научной проблемы, его становление как независимого исследователя. Поскольку именно Д.Н. Прянишников станет основателем национальной агрохимической школы, факт получения им высшей ученой степени, на наш взгляд, вполне уместен в качестве точки отсчета последующего подэтапа;

- Инициативно-поисковый подэтап (1900-1924 г.). Ему характерен переход от отдельных предложений и изобретений энтузиастов к целостным проектам, нередко с государственной поддержкой, что связано с осмыслением последствий голода 1891 г., а также оборонными нуждами, особенно с началом Первой мировой войны. Учреждаются различные призванные консолидировать работу ученых и инженеров комиссии (Азотная, Фосфоритная и др.) и комитеты (Химический комитет при Главном артиллерийском управлении, Общественный комитет по делам удобрений) [7].

Важнейшие научно-технические достижения:

- отечественная электропечь для получения азотной кислоты из воздуха (1906 г., А.И. Горбов, В.Ф. Миткевич);

- исследования запасов российского сырья для фосфорных удобрений, разработка методики его переработки (Я.В. Самойлов, Д.Н. Прянишников, Э.В. Брицке и др.);



Самолет «Вуазен». Подобный был использован для первого в России опыта по применению авиации для борьбы с вредителями (8 июля 1922 г., Москва, Ходынский аэродром)

The Voisin plane. A similar aircraft was used for the first Russian experiment on the aerial treatment of crops (July 8, 1922, Moscow, Khodynka airfield)

- аналитическое выявление в 1916 г. Н.С. Курнаковым и его сотрудниками Верхнекамского месторождения калийных солей (крупнейшее в России и одно из крупнейших в мире), его ввод в эксплуатацию в 1934 г. ознаменовал создание отечественной калийной промышленности;

- первый русский завод для получения азотной кислоты и аммиачной селитры по собственной технологии – способу И.И. Андреева (1917 г.);

- применение химических средств поручается принципиально новой технике – самолетам (идея не позднее 1921 г., первые опыты 1922 г.) [8].

Именно к инициативно-поисковому подэтапу относится прямой предшественник химизации как понятия и своего рода лозунга – так называемая «мобилизация туков», объявленная на созванном Всероссийским земским союзом Совещании по организации посевной площади 1917 года. На нем ставились вопросы о государственном планировании полевых работ, обеспечения их рабочей силой по мобилизационному образцу и другие вплоть до предложений о регулировании цен, потребления и даже продразверстки и коллективизации. Организация массового отечественного производства удобрений и их широкое внедрение являются вполне естественным продолжением этих чрезвычайных мер. Однако реализация всех планов выпадет на долю уже совершенно иной, советской власти.

«Мобилизация туков», как и прочие практические начинания, с одной стороны, ориентированные на выход из острейшего экономического кризиса, а с другой – имеющие оборонное значение, снискала поддержку и у большевиков. Это сделало возможным выдвинуть саму идею химизации, что и произошло в 1924 г., начав, тем самым, ее собственную историю как научно-исследовательской и технологической программы.

Формирующий этап (1924-1948 гг.)

Это период первоначального признания химизации как государственно значимой инициативы. Важнейшим достижением второго этапа является создание фактически с нуля отечественной азотной, калийной и фосфорной промышленности, производства химических средств защиты растений. Появляются собственные образцы необходимой техники. Все это подкрепляется созданной сетью научно-исследовательских учреждений и развитием подготовки агрономических и инженерных кадров [9]. В то же время отечественная агрохимическая школа в эти годы вынуждена отражать политизированную критику альтернативных течений – учения В.Р. Вильямса, а затем и мичуринской агробиологии Т.Д. Лысенко.

Продолжая дело М.Г. Павлова и Д.И. Менделеева, отечественные ученые создают Географическую сеть опытов с удобрениями (Геосеть. Имен-

но материалы Геосети легли в основу создания увязанного с нуждами земледелия плана развития крупной химической промышленности, без которой, в свою очередь, не было бы Победы в Великой Отечественной войне.

Конец формирующего этапа (1948 г.) соотносится с кончиной основателя советской агрохимии, академика Д.Н. Прянишникова и печально известной сессией ВАСХНИЛ, имевшей последствия не только для генетических, но и агрохимических исследований в стране. В то же время позади остались и карточная система, и голод 1946-1947 гг., а промышленность к 1948 г. вышла на довоенный уровень. Тем самым сложились социально-экономические предпосылки для поиска оптимального пути дальнейшего развития сельского хозяйства.

Экстенсивный этап (1948-1963 гг.)

Связан с различными экспериментами в аграрной политике, ориентированными на попытки решить насущные проблемы через количественный рост. В этом отношении наиболее известны реформы возглавившего после И.В. Сталина страну Н.С. Хрущева: решение об использовании целинных земель, реорганизация машинно-тракторных станций и др. Ошибки в аграрной политике в конечном итоге спровоцировали вкупе с засухой зерновой кризис 1963 г., в результате чего СССР многие годы был вынужден закупать зерно в капиталистических странах.

В то же время среди значимых позитивных событий нельзя не отметить создание в 1961 г. Всесоюзного объединения «Сельхозтехника», внесшего большой вклад в обеспечение села необходимым ассортиментом химической продукции и техники для ее применения, а позднее в проведение таких работ собственными силами. В том же году была организована единая служба защиты растений.

К 1962 г. прекращается опала агрохимической школы, хотя ранее Н.С. Хрущев в ущерб ей патронировал сторонников учений В.Р. Вильямса и Т.Д. Лы-



Опыливатель-опрыскиватель ОУН-4, агрегатированный с трактором «Универсал-4» (1950-е годы)
The OUN-4 duster and sprayer aggregated with the Universal-4 tractor (1950s)

сенко. В марте Пленум ЦК КПСС осудил травопольную систему, потребовал увеличить выпуск химической продукции для сельского хозяйства, машин и оборудования для ее внесения, изыскать дополнительные средства на развитие химической промышленности. В апреле окончательно покидает пост президента ВАСХНИЛ Т.Д. Лысенко, а в целом в 1962 г. СССР занял по объемам производства минеральных удобрений первое место в Европе. Все вышеперечисленное подготовило почву для наступления следующего этапа.

Стабилизационный этап (1963–1976 гг.)

В этот период химизация окончательно признается ключевым, наряду с механизацией и электрификацией, направлением развития сельского хозяйства. Принимаются принципиальные решения о ее поддержке (декабрьский пленум 1963 г. и февральский пленум 1964 г.) Наиболее явным свидетельством этого служит создание в 1964 г. единой агрохимической службы страны как контрольно-консультационной структуры.

Такой курс сохранился с приходом Л.И. Брежнева (хотя в целом стабилизационный этап – время своеобразной работы над управленческими ошибками в сельском хозяйстве, и большая его часть хронологически соответствует так называемой «новой аграрной политике», провозглашенной на мартовском Пленуме 1965 г.). В 1969 г. был создан Центральный научно-исследовательский институт агрохимического обслуживания сельского хозяйства (ЦИНАО), предприняты важные изменения в сфере защиты растений (создано соответствующее отделение ВАСХНИЛ, а ВО «Сельхозтехника» поручены проведение и обеспечение химических работ). Фактор химизации сельскохозяйственного производства тщательно учитывался при создании Второй (1966–1970 гг.) и Третьей систем машин (1971–1975 гг.). К 1974 г. СССР становится мировым лидером по объемам производства, а в 1975 г. по абсолютному потреблению минеральных удобрений.

Интенсивный этап (1976–1991 гг.)

Несмотря на то, что лозунг интенсификации сельского хозяйства выдвигался и ранее, лишь к 1976 г. (XXV съезд КПСС, подтвердивший прежний курс), как следует из ранее приведенных фактов, он становится обеспеченным материально-технически. Это было время наибольшего расцвета химизации.

Постановлениями ЦК КПСС и Совета Министров СССР намечена программа дальнейших действий (от 12.02.1976 № 117 «О мерах по развитию промышленности минеральных удобрений и химических средств защиты растений в 1976–1980 годах» и от 04.06.1976 № 429 «О мерах по дальнейшему повышению эффективности использования минеральных удобрений...»).



Самоходная машина для внесения удобрений MBV-30 (МАЗ, БССР, 1978 г.)

Self-propelled fertilizer placer MVU-30 (MAZ, BSSR, 1978)

ВО «Союзсельхозтехника» становится в 1978 г. государственным комитетом (Госкомсельхозтехника), однако утрачивает (за отдельными незначительными исключениями) химизаторские функции в 1979 г. в связи с приобретением агрохимической службой статуса специализированной и тем самым ее преобразованием в научно-производственную структуру – ВО «Союзсельхозхимия».

В СССР налажен полный цикл производства минеральных удобрений, а также способов их доставки и внесения на пашни практически с нуля, при этом использование готовой продукции внутри страны являлось приоритетным. Аналогично развивалось обеспечение средствами защиты растений, хотя значительное их количество все же приходилось закупать за рубежом. В 1980 г. создается особое союзное министерство по производству минеральных удобрений, отвечавшее также за выпуск химических средств защиты растений и кормовых добавок. К концу этапа, в 1988 г. СССР вышел на исторический максимум производства минеральных удобрений (37,1 млн т) [10].

Реагируя на эти успехи, промышленность освоила выпуск технических средств для выполнения большинства трудоемких операций по транспортировке и внесению минеральных удобрений и извести. Значительно выросли рабочие скорости машинно-тракторных агрегатов, что позволило повысить производительность труда на различных операциях со средствами химизации. В итоге некоторые виды работ были механизированы полностью (например, междурядная подкормка пропашных культур, обработка пестицидами) или практически полностью (рядковое, припосевное, внесение небольших доз удобрений под зерновые и некоторые овощные культуры). Наибольшего размаха достигает применение авиационной техники [8].

Таким образом, была полностью сформирована инфраструктура всего жизненного цикла – от добычи агроруд до внесения удобрений на поля, которая обеспечивалась комплексами машин отечественной разработки и производства.

Невиданный масштаб агрохимических работ неизбежно стимулировал исследования по гигиеническому и экологическим аспектам химизации сельского хозяйства. На их основе была создана система санитарного надзора за безопасностью применения химических средств. Лидерами данных исследований являлись академик Академии медицинских наук СССР Л.И. Медведь, создатель специализированной научной школы во Всесоюзном НИИ гигиены и токсикологии пестицидов, полимерных материалов и пластических масс (ВНИИГИНТОКС, г. Киев), в РСФСР – академик А.П. Шицкова (г. Москва), профессор Н.И. Сметанин (г. Рязань) и др. [11]. Экологические аспекты исследовались в институтах союзных и республиканских академий наук, а также в отраслевых научных центрах (Центральной научно-исследовательской лаборатории охраны природы, ныне ВНИИ «Экология», институтах систем Гидрометслужбы, рыбного хозяйства и т.п.).

Децентрализованный этап (с 1991 года)

Этот этап соотносится с завершением советского периода, когда происходят, с одной стороны, кардинальные структурные изменения агропромышленного комплекса, а с другой – происходит курс на биологизацию сельского хозяйства, разработку технологий точного земледелия. Наряду с максимизацией урожаев становится необходимым учитывать экологические аспекты при сохранении экономической эффективности.

Проводить химизацию ранее принятыми методами в изменившихся условиях стало невозможным. Кроме экономических трудностей резко обострилось общественное неприятие, своеобразным манифестом которого стали статьи известного поэта А.А. Вознесенского «Поэзия без нитратов» и «Ах, министр, не пестициды!», вызвавшие его заочную полемику с министром по производству минеральных удобрений Н.М. Ольшанским. При этом, несмотря на высокие показатели выпуска, в реальности по уровню обеспеченности пашни минеральными удобрениями СССР отставал от ведущих западных стран (от Ве-

ликобритании на 262,7%, ФРГ – на 331,3%, Нидерландов – 678,8%), хотя практически не уступал США [10]. В свою очередь, на Западе также затронутая Вознесенским пестицидная проблема была не менее острой. Впрочем, возмущение поэта имело и рациональные основы: в некоторых регионах с развитым сельским хозяйством обильное применение пестицидов и минеральных удобрений к 1980-м годам привело к подлинной экологической катастрофе [12].

Будущее химизации связано с поиском новых производственных технологий и средств, применение которых не допустит повторения подобных ситуаций. Большая роль в этом объективно принадлежит сельскохозяйственной технике [13].

Произошедшие в конце XX века политические и социально-экономические изменения привели к резкому сокращению масштабов применения минеральных удобрений, необходимых работ по химической мелиорации. Произошла дезинтеграция созданных ранее организационно-технических систем «Сельхозтехники» и «Сельхозхимии», закрылись многие предприятия сельскохозяйственного машиностроения. Снизился уровень фитосанитарного благополучия, поскольку химический способ защиты растений оказался доступен далеко не всем хозяйствам, а к тем, кто его применяет, есть тенденция надзорных органов и общественности.

В настоящее время складываются предпосылки нового этапа развития химизации (предлагается предварительно назвать его, по В.Н. Кудярову и В.М. Семенову, постинтенсивным), целью которого станет «устойчивое получение экономически и экологически оптимального урожая при сохранении качества среды и здоровья почвы» [3]. Характерной чертой техники и технологии этого периода станет цифровизация, сопряженная с механизацией и биологизацией высшей степени [14]. Наиболее ярким олицетворением происходящих перемен могут служить такие технические новшества, как беспилотные авиационные системы [15].

В аспекте информационных технологии такой иллюстрацией служит запущенная в эксплуатацию с 2022 г. Федеральная государственная информационная система прослеживаемости пестицидов и агрохимикатов (ФГИС «Сатурн»), призванная обеспечить прослеживаемость оборота пестицидов и агрохимикатов, а тем самым – предотвратить экологические (а в глубине своей – часто организационные) проблемы химизации [16]. Рутинизация таких новшеств является критерием наступления данного этапа.

Выводы. Безусловно, всякая периодизация сама по себе не абсолютна, однако предложенный подход к структурированию этапов развития химизации сельского хозяйства России полезен как



Современный российский самоходный опрыскиватель-разбрызгиватель «Туман-3»

Modern Russian self-propelled sprayer and caster «Tuman-3»

нынешним и будущим исследователям данной проблемы, так и в деле подготовки инженерных кадров для агропромышленного комплекса, являясь методической основой для разработки и обеспечения учебных курсов («Введение в специальность», «История сельского хозяйства», «История науки и техни-

ки» и др.). Наличие четких ориентиров повышает эффективность изучения исторических аспектов сельского хозяйства, истории науки и техники, столь важных для профессионального становления агрономов и инженеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Осипов А.И., Якушев В.П., Якушев В.В. История научных исследований в агрохимии и перспективы применения удобрений в России // *Агрохимический вестник*. 2020. N2. С. 73-79. DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10028.
- Торшин С.П. Первый российский ученый-агрохимик. К 280-летию со дня рождения А.Т. Болотова // *Агрохимический вестник*. 2019. N3. С. 75-76. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10048.
- Кудяров В.Н., Семенов В.Н. Проблемы агрохимии и современное состояние химизации сельскохозяйственного производства в Российской Федерации // *Агрохимия*. 2014. N10. С. 3-17. EDN: STTOJP.
- Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Интеграция науки, образования, производства как инструмент решения народно-хозяйственных задач в АПК // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. N4(153). С. 116-124. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-116-124.
- Гончаров Н.П. Роль «отца всех агрономов России» И.А. Стебута в становлении отечественного сельскохозяйственного образования и науки // *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020. Т. 6. N3. С. 126-150. DOI: 10.18699/Letters2020-6-16.
- Осипов А.И. История и практические аспекты известкования кислых почв в России // *Агрохимический вестник*. 2019. N3. С. 28-36. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10038.
- Торшин С.П., Смолина Г.А. Первые шаги учения об агрономических рудах (к 150-летию со дня рождения Я.В. Самойлова) // *Агрохимический вестник*. 2020. N6. С. 82-84. DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10092.
- Соболев Д.А. Авиация на службе сельского хозяйства СССР: история вопроса // *Технический сервис машин*. 2023. N2(151). С. 166-176. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-2-166-176.
- Григорьева М.В., Белопухов С.Л. Этапы становления системы химической подготовки студентов аграрных вузов в России // *Преподаватель XXI век*. 2022. N2-2. С. 288-313. DOI: 10.31862/2073-9613-2022-2-288-313.
- Левкевич Р.Е., Сенотрусова С.В., Христианов К.Н. Перспективный анализ производства минеральных удобрений в советский период // *Инновации и инвестиции*. 2023. N4. С. 397-401. EDN: LTUAIJG.
- Попова А.Ю., Онищенко Г.Г., Ракитский В.Н., Кузьмин С.В., Кучма В.Р. Гигиена в обеспечении научно-технологического развития страны и санитарно-эпидемиологического благополучия населения (к 130-летию Федерального научного центра гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана) // *Гигиена и санитария*. 2021. Т. 100. N9. С. 882-889. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-9-882-889.
- Затравкин С.Н., Вишленкова Е.А. Ухудшение здоровья советских людей в эпоху застоя // *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*. 2021. Т. 29. N2. С. 359-368. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-2-359-368.
- Старостин И.А., Ещин А.В. Современное состояние средств механизации химической защиты растений в России // *Агроинженерия*. 2021. N2 (102). С. 23-31. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-23-31.
- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Инновационная система машинно-технологического обеспечения предприятий агропромышленного комплекса. Часть 1. Инновационная система машинно-технологического обеспечения сельскохозяйственных предприятий на длительную перспективу. М.: ВИМ, 2019. 228 с.
- 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. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-5-38-45.
- Созаева Т.Х., Гурфова С.А. Цифровизация агроформирования региона: современное состояние, проблемы и перспективы // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова*. 2023. N2 (40). С. 155-167. DOI: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-155-167.

REFERENCES

- Osipov A.I., Yakushev V.P., Yakushev V.V. History of scientific research in agrochemistry and prospects for fertilizers application in Russia. *Agrochemical Herald*. 2020. N2. 73-79 (In Russian). DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10028.
- Torshin S.P. The first Russian scientist-agrochemist to the 280th anniversary from the date of A.T. Bolotov's birth. *Agrochemical Herald*. 2019. N3. 75-76 (In Russian). DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10048.
- Kudeyarov V. N., Semenov V. N. Agrochemical problems

- and the current state of agricultural chemicalization in the Russian Federation. *Agricultural Chemistry*. 2014. N10. 3-17 (In Russian). EDN: STTOJP.
4. Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Integration of science, education, production as a tool for solving economic problems in the agro-industrial complex. *Machinery technical service*. 2023. Vol. 61. N4(153). 116-124 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-116-124.
 5. Goncharov N.P. Contribution of the «father of all Russian agronomists» I.A. Stebut to the development of the national agricultural education and science. *Letters to the Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020. Vol. 6. N3. 126-150 (In Russian). DOI: 10.18699/Letters2020-6-16.
 6. Osipov A.I. History and practical aspects of acid soils liming in Russia. *Agrochemical Herald*. 2019. N3. 28-36 (In Russian). DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10038.
 7. Torshin S.P., Smolina G.A. The first steps of agronomic ores doctrine (to the 150th anniversary from the date of Ya.V. Samoilov's birth). *Agrochemical Herald*. 2020. N6. 82-84 (In Russian). DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10092.
 8. Sobolev D.A. Aviation at the service of agriculture in the USSR: background. *Machinery technical service*. 2023. N2(151). 166-176 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-2-166-176.
 9. Grigor'yeva M.V., Belopukhov S.L. Stages of forming a system of chemical training for agrarian university students in Russia. *Lecturer XXI Century*. 2022. N2-2. 288-313 (In Russian). DOI: 10.31862/2073-9613-2022-2-288-313.
 10. Levkevich R.Ye., Senotrusova S.V., Khristianov K.N. Retrospective analysis of mineral fertilizers production in the Soviet period. *Innovation & Investment*. 2023. N4. 397-401 (In Russian). EDN: LTUAJG.
 11. Popova A.Yu., Onishchenko G.G., Rakitskiy V.N., Kuz'min S.V., Kuchma V.R. Hygiene in supporting scientific and technological development of the country and sanitary and epidemiological welfare of the population (to the 130th anniversary of the Federal Scientific Centre of Hygiene named after F.F. Erisman). *Hygiene and Sanitation*. 2021. Vol. 100. N9. 882-889 (In Russian). DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-9-882-889.
 12. Zatravkin S.N., Vishlenkova E.A. Deterioration of Soviet people's health in an era of stagnation. *Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine*. 2021. Vol. 29. N2. 359-368 (In Russian). DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-2-359-368.
 13. Starostin I.A., Yeshchin A.V. Currently used mechanization means of chemical plant protection in Russia. *Agricultural Engineering* (Moscow). 2021. N2 (102). 23-31 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-23-31.
 14. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Beilis V.M., Tsench Yu.S. Innovative system of machine and technological support for enterprises of the agro-industrial complex. Part 1. An innovative system of machine-technological support of agricultural enterprises for the long term. Moscow: VIM. 2019. 228. (In Russian).
 15. Marchenko L.A., Artyushin A.A., Smirnov I.G., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Technology of pesticides and fertilizers application with unmanned aerial vehicles in digital agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N5. 38-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-5-38-45.
 16. Sozayeva T.Kh., Gurfova S.A. Digitalization of agricultural formations of the region: current status, problems and prospects. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2023. N2 (40). 155-167 (In Russian). DOI: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-155-167.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – общее руководство, постановка задач исследования, научное редактирование текста статьи;

Сидоров И.В. – анализ предметной области, выделение и обоснование этапов периодизации, написание текста и формулирование выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – general guidance, formulation of research tasks, scientific editing of the manuscript;

Sidorov I.V. – analysis of the subject area, highlighting and reasoning the stages of periodization, writing the manuscript and conclusions formulation.

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

02.04.2024

22.05.2024

EDN: XDMGLD

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-23-30



Научная статья

УДК 631.3, 62-6



Технологическая схема использования теплоты отработавших газов самоходной машины

Николай Михайлович Иванов^{1,2},
член-корреспондент РАН, профессор,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: sibime@sfsca.ru;

Алексей Борисович Иванников^{1,2},
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: ivannikovab@sfsca.ru;

Азамат Истлеуович Дусантаев¹,
аспирант,
e-mail: sibime@sfsca.ru;

Геннадий Михайлович Крохта²,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: krumva@mail.ru;

Василий Андреевич Крум²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: krumva@mail.ru

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Новосибирская область, Российская Федерация;

²Новосибирский государственный аграрный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

Реферат. Эффективность машинно-тракторного парка во многом зависит от условий эксплуатации. Чем жестче условия (в основном климатические), тем больше отказов, что приводит к снижению долговечности и эффективности использования техники. Уменьшить количество отказов и потери мощности в моторно-трансмиссионной установке, а также повысить топливную экономичность возможно за счет использования бросовой теплоты двигателя внутреннего сгорания. Это позволяет обеспечить оптимальный температурный режим в основных узлах машин при отрицательной температуре окружающей среды. (*Цель исследования*) Разработать технологическую схему применения бросовой теплоты двигателя внутреннего сгорания в виде теплоты отработавших газов для поддержания оптимальной температуры в основных узлах машинно-тракторного агрегата. (*Материалы и методы*) Изучили и оценили потенциальную возможность использования теплоты отработавших газов в разрабатываемой схеме. Исследования проводили на экспериментальной установке. При обработке результатов применен эксергетический метод исследования. (*Результаты и обсуждение*) Установлено, что величина мощности теплового потока отработавших газов на различных режимах работы двигателя создает благоприятные условия для его использования в предлагаемой схеме. Разработана и запатентована система поддержания заданного температурного режима в основных узлах и прицепном агрегате самоходной машины. (*Выводы*) Наличие в отработавших газах существенной по величине кинетической и тепловой энергии создает возможность ее вторичного использования. Составлена технологическая схема использования теплоты отработавших газов двигателей внутреннего сгорания в виде системы поддержания заданного температурного режима в основных узлах и прицепном агрегате самоходной машины. Применение разработанной системы позволит максимально повысить коэффициент полезного использования теплоты, выделившейся при сгорании в двигателе топлива.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, прогрев, система, бросовая теплота, отработавшие газы.

■ **Для цитирования:** Иванов Н.М., Иванников А.Б., Дусантаев А.И., Крохта Г.М., Крум В.А. Технологическая схема использования теплоты отработавших газов самоходной машины // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N3. С. 23-30. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-23-30. EDN: XDMGLD.

Scientific article

Technological Scheme for Utilizing Exhaust Gas Heat from a Self-Propelled Machine

Nikolay M. Ivanov^{1,2},
corresponding member of the RAS, professor,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, e-mail: sibime@sfsca.ru;
Aleksey B. Ivannikov^{1,2},
Ph.D.(Eng), associate professor, leading researcher,
e-mail: ivannikovab@sfsca.ru;

Azamat I. Dusantaev¹,
Ph.D.(Eng) student, e-mail: sibime@sfsca.ru;
Gennadiy M. Krochta²,
Dr.Sc.(Eng), professor, e-mail: krumva@mail.ru;
Vasily A. Krum²,
Ph.D.(Eng), associate professor, e-mail: krumva@mail.ru

¹Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk region, Russian Federation;

²Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The paper shows that the efficiency of the machine and tractor fleet is significantly influenced by operating conditions. It is known that the harsher the operating conditions, particularly those related to climate, the higher the frequency of failures, which, in turn, results in the reduced durability and efficiency of the equipment. One way to mitigate failures and power losses in the motor-transmission unit, as well as improve fuel efficiency, is by utilizing the waste heat from the internal combustion engine. This approach ensures an optimal temperature in the main units of the machinery at negative ambient temperatures. (*Research purpose*) The research aims to develop a technological scheme for utilizing waste heat from the internal combustion engine, specifically the heat from exhaust gases, to maintain the optimal temperature in the main units of the machine and tractor unit. (*Materials and methods*) The potential for using exhaust gas heat in the proposed scheme was studied and assessed using an experimental setup. The results were processed using the exergy research method. (*Results and discussion*) It is found that the power of the exhaust gas heat flow at various engine operating modes provides favorable conditions for its utilization in the proposed scheme. Based on the research results, a system for maintaining a set temperature regime in the main units and trailer unit of a self-propelled machine was developed and patented. (*Conclusions*) The presence of significant kinetic and thermal energy in the exhaust gases enables its secondary use. A technological scheme for utilizing the heat of exhaust gases from internal combustion engines has been developed as a system for maintaining a set temperature regime in the main units and trailer unit of a self-propelled machine. The application of the developed system will maximize the utilization coefficient of the heat released during fuel combustion in the engine.

Keywords: internal combustion engine, warming up, system, waste heat, exhaust gases

For citation: Ivanov N.M., Ivannikov A.B., Dusantaev A.I., Krochta G.M., Krum V.A. Technological scheme for utilizing exhaust gas heat from a self-propelled machine. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 23-30 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-23-30. EDN: XDMGLD.

Эксплуатация машинно-тракторного парка в условиях пониженных температур окружающей среды связана с рядом отрицательных факторов, воздействующих на рабочие процессы дизеля, узлы и агрегаты самоходных машин. Наиболее существенное влияние на технические устройства оказывают низкая температура воздуха, скорость ветра, осадки и др. [1, 2].

Холодный пуск и последующий прогрев моторно-трансмиссионной установки сопровождается неполным сгоранием топлива и большими потерями мощности в коробке передач, раздаточной коробке и ведущих мостах в силу значительного повышения вязкости трансмиссионного масла [3, 4].

Вместе с тем известно, что в полезную работу преобразуется до 45% выделяющейся от сгорания топлива теплоты, а ее остальное количество безвозвратно рассеивается в атмосферу. Основная часть рассеиваемой теплоты (30-40%) приходится на отработавшие газы. Вторым по количеству рассеиваемой теплоты источником (до 28%) является система охлаждения двигателя внутреннего сгорания [5]. Незначительная доля рассеиваемой теплоты приходится на систему смазки и на боковые стенки силового агрегата машины [6].

Рассеивание теплоты и значительные внутренние потери на трение заставляют искать способы полезного использования бросовой теплоты двигателя внутреннего сгорания для нивелирования не-

гативного влияния климатических факторов и погодных явлений [7, 8]. В связи с тем, что максимальные потери мощности происходят в моторно-трансмиссионной установке, целесообразно бросовую теплоту двигателя в первую очередь использовать для обеспечения оптимального теплового режима в узлах и агрегатах трансмиссии самоходной машины [9, 10]. Кроме того, актуальными остаются вопросы обеспечения нормальной эксплуатации самоходных машин с навесным оборудованием, для привода которых используется гидросистема навесного устройства [11, 12].

Использование бросовой теплоты двигателя открывает возможность её подвода в прицепной агрегат для обеспечения оптимального температурного режима различных технологических операций, а также в кабину водителя для дополнительного обогрева в зимний период [13,14].

Наряду с исследованиями по подогреву узлов и агрегатов самоходной машины, существует возможность использования бросовой теплоты в процессах получения холода (эффект Пельтье, абсорбционные холодильные машины и т.д.) [15].

Цель исследования – разработать технологическую схему применения бросовой теплоты двигателя внутреннего сгорания в виде теплоты отработавших газов для поддержания оптимальной температуры в основных узлах машинно-тракторного агрегата.

Для достижения цели необходимо:

- оценить эксергетический потенциал теплового потока отработавших газов на различных режимах работы двигателя внутреннего сгорания;
- обосновать технические и технологические решения системы вторичного использования теплоты отработавших газов для поддержания заданного температурного режима в основных узлах машинно-тракторного агрегата;
- разработать алгоритм работы системы вторичного использования теплоты отработавших газов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Процессы рекуперации и использования теплоты отработавших газов двигателя внутреннего сгорания в основных узлах машинно-тракторного агрегата исследовали на экспериментальной установке (рис. 1).

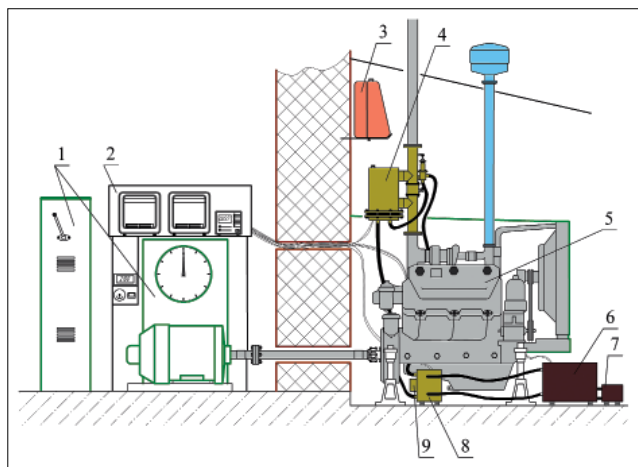


Рис. 1. Экспериментальная установка
Fig. 1. Experimental installation

Установка смонтирована таким образом, что часть приборов и оборудования находилась внутри лаборатории, а часть – снаружи на открытой площадке. Обкаточно-тормозной стенд 1 КИ-2118А соединен с дизельным двигателем 5 марки 6ЧН13,0/11,5 посредством двухшарнирного карданного вала автомобильного типа через технологическое отверстие в стене лаборатории. На двигателе установлены рекуператор теплоты отработавших газов 4, жидкостно-жидкостный теплообменник 8, циркуляционный насос 9, емкость 6 с моторным маслом М-8Г2, насосный узел 7 и трубная обвязка. Топливный бак 3 размещен снаружи помещения, а контрольно-измерительные приборы 2 внутри лаборатории. Это оборудование позволяло имитировать любую систему смазки.

На экспериментальной установке были смонтированы два тепловых контура: утилизационный и теплопотребляющий. Утилизационный контур предназначен для аккумуляции рекуперированной теплоты отработавших газов и ее последующей подачи в теплопотребляющий контур, который пред-

назначен для непосредственного подвода теплоты в симитированную гидравлическую систему.

При работе установки теплоноситель, нагретый в рекуператоре теплоты отработавших газов 4, прокачивался циркуляционным насосом 9 через жидкостно-жидкостный теплообменник 8 нагревая масло симитированной гидравлической системы, включающей емкость с маслом 6 и насосный узел 7. В экспериментальных исследованиях в качестве греющего теплоносителя использовалась низкотемпературная охлаждающая жидкость марки ОЖ-40. За основу экспериментальной установки выбрана запатентованная система прогрева и поддержания оптимальных температур рабочих жидкостей и масел в агрегатах самоходных машин (RU2577916C1, 2016 г.).

Двигатель трактора при выполнении сельскохозяйственных операций имеет три массива нагрузок: малые, средние и близкие к полным [16]. Основная доля времени смены приходится на средние и близкие к полным нагрузки [17, 18]. Для трактора Т-150К с двигателем 6ЧН13,0/11,5 – это диапазон от 60 до 81% от номинальной мощности или от 72,8 до 98,2 кВт, что и было взято за основу при планировании и проведении эксперимента. Опыты проводились в диапазоне температуры окружающей среды от +25 до –25 °С (в рамках статьи использованы результаты экспериментов при –25 °С). Также предусматривалась серия холодных пусков при температуре до –25 °С.

При обработке данных применялся эксергетический метод анализа.

Эксергия теплового потока отработавших газов

$$E_{ог} = 0,00109 \cdot G_{ог} \cdot (t_{ог} - t_{ос}), \text{ МДж/ч}, \quad (1)$$

где 0,00109 – удельная теплоемкость отработавших газов (C_p), МДж/(кг·К); $G_{ог}$ – массовый расход отработавших газов, кг/ч (равен сумме массовых расходов топлива G_T и воздуха G_B); $t_{ос}$ – температура окружающей среды, °С; $t_{ог}$ – температура отработавших газов перед рекуператором.

Потенциальная мощность теплового потока отработавших газов двигателя

$$N_{ог} = E_{ог}/3,6 \cdot 10^3, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $3,6 \cdot 10^3$ – время, с.

Количество теплоты, передаваемой рекуператором теплоносителю утилизационного контура,

$$E_{ук} = C_p \cdot G_{ж} \cdot (t_{ж2} - t_{ж1}), \text{ МДж/ч}, \quad (3)$$

где C_p – удельная теплоемкость теплоносителя (табличное значение, зависящее от температуры), МДж/(кг·К); $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$ – температура жидкости утилизационного контура на входе и на выходе рекуператора, °С.

Методология и методика базируются на применении общенаучных методов исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Экспериментальные исследования показали, что эксергия теплового потока отработавших газов, выбрасываемых в атмосферу в начале прогрева двигателя после холодного пуска при температуре окружающей среды -25°C , достигает 161,2 МДж/ч, что соответствует мощности 44,8 кВт. Стабилизация температуры окружающей среды происходит на уровне 160°C (рис. 2).

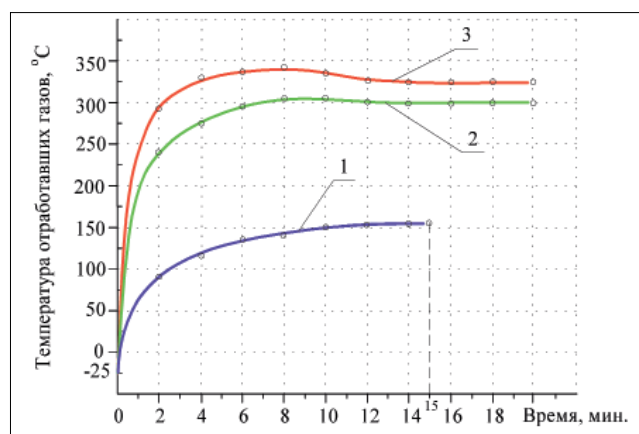


Рис. 2. Динамика изменения температуры отработавших газов при температуре окружающей среды -25°C на режимах работы двигателя: 1 – холостой ход; 2 – загрузка 60% (72,8 кВт); 3 – загрузка 81% (98,2 кВт)
Fig. 2. Dynamics of exhaust gas temperature variation at an ambient temperature of -25°C in the following engine operating modes: 1 – idling; 2 – engine load at 60% (72,8 kW); 3 – engine load at 81% (98,2 kW)

Температура заторможенного потока отработавших газов измерялась перед входом в рекуператор. Величина мощности теплового потока после пуска двигателя и характер ее изменения при прогреве создают условия для вторичного использования теплоты отработавших газов с целью сокращения времени прогрева основных узлов до оптимальной температуры и снижения расхода топлива.

Пропорционально нагрузке двигателя увеличивается количество сгораемого топлива и поступающего в двигатель воздуха, вследствие чего значительно повышаются температура и массовый расход отработавших газов. Например, при загрузке двигателя 60% от номинальной мощности температура газов стабилизируется на уровне 305°C , а эксергия теплового потока отработавших газов достигает 276,2 МДж/ч, что соответствует мощности 76,7 кВт. При росте загрузки до 81% и той же температуре окружающей среды соответственно увеличиваются эксергия теплового потока и потенциальная мощность отработавших газов. Так, эксергия теплового потока газов достигает 321,1 МДж/ч на установившемся режиме, что соответствует мощности теплового потока 89,2 кВт, а температура отработавших газов стабилизируется на уровне 329°C .

Эффективность передачи теплоты в утилизационном контуре определяется коэффициентом полезного действия рекуператора, который зависит в первую очередь от свойств конструкционных материалов и совершенства конструкции. Опытный образец рекуператора изготовлен из стали (Патент RU2523454, 2014 г.).

Обработка экспериментальных данных позволила рассчитать динамику потока эксергии, аккумулируемой в утилизационном контуре при разных режимах двигателя в зимних условиях (рис. 3).

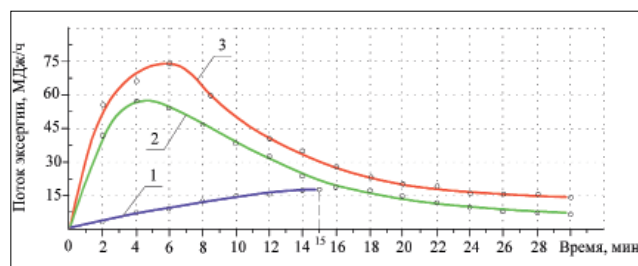


Рис. 3. Динамика потока эксергии, передаваемой в утилизационный контур при температуре окружающей среды -25°C на режимах работы двигателя: 1 – холостой ход; 2 – загрузка 60% (72,8 кВт); 3 – загрузка 81% (98,2 кВт)
Fig. 3. Dynamics of the exergy flow transferred to the utilization circuit at an ambient temperature of -25°C in the following engine operating modes: 1 – idling; 2 – engine load at 60% (72,8 kW); 3 – engine load at 81% (98,2 kW)

При загрузке двигателя 60% поток эксергии, передаваемый рекуператором в утилизационный контур, достигал максимального значения 54,7 МДж/ч. По мере прогрева рекуператора и нагрева теплоносителя утилизационного контура до рабочих параметров поток эксергии стабилизировался на уровне 7,1 МДж/ч. При увеличении загрузки до 81% поток эксергии был максимальный – 72,4 МДж/ч со стабилизацией 13,7 МДж/ч.

На рисунке 2 видно, что температура отработавших газов уже ко второй минуте достигает практически максимальной величины. При этом нарастание потока эксергии, передаваемой в утилизационный контур, относительно температуры окружающей среды происходит медленно. Это объясняется тем, что в первые минуты работы интенсивно поглощается теплота на разогрев непосредственно опытного рекуператора, который имеет достаточно большую массу (60 кг), а по мере его нагрева основной поток теплоты передается в утилизационный контур.

Анализ кривых на рисунке 3 показывает, что при работе двигателя под нагрузкой (кривые 2 и 3) динамика потока эксергии, передаваемой в утилизационный контур, идентичная, а на холостом ходу выглядит иначе (кривая 1).

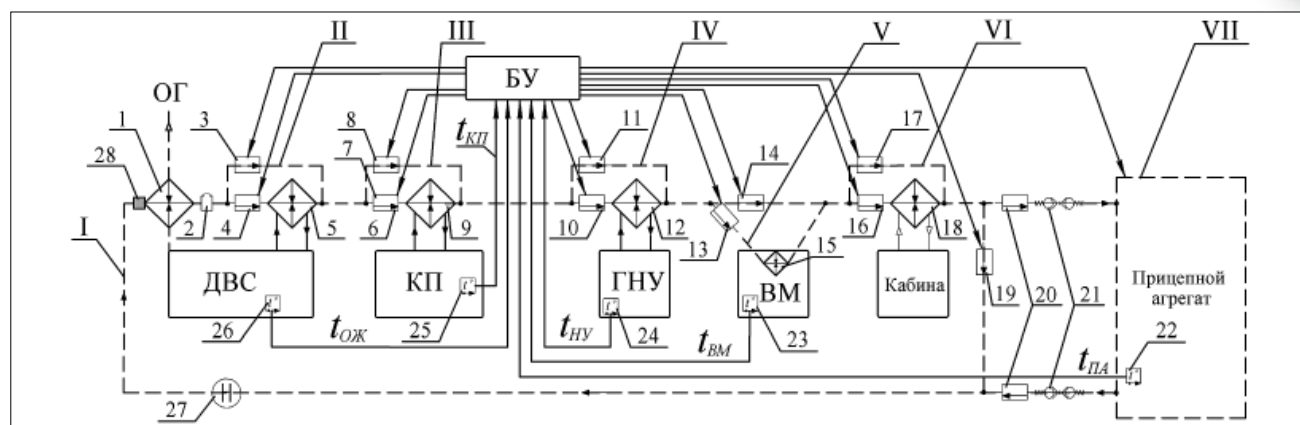


Рис. 4. Система поддержания заданного температурного режима в основных узлах и прицепном агрегате самоходной машины

Fig. 4. System for maintaining a set temperature regime in the main units and trailer unit of the self-propelled machine

Максимальный поток эксергии, передаваемый в утилизационный контур на холостом ходу, составил около 19 МДж/ч при его плавном увеличении. Причина заключается в том, что на режиме послепускового прогрева температура отработавших газов недостаточно высокая при минимальном массовом расходе, и в первые минуты работы рекуператора на его разогрев используется практически вся утилизируемая теплота. По мере выхода рекуператора на рабочий режим и включения терморегулятора в утилизационный контур передается то количество теплоты, которое необходимо для поддержания оптимальной температуры в теплопотребителях.

Таким образом, потенциал эксергии отработавших газов, которая рассеивается в окружающую среду, достаточно велик и может использоваться вторично для интенсификации прогрева основных систем машинно-тракторного агрегата, а также поддержания при необходимости оптимального теплового режима. При помощи рекуператора можно эффективно утилизировать некоторую часть теплоты отработавших газов для дальнейшей передачи теплопотребителям.

Анализ результатов эксперимента, а также подготовка и проведение опытов позволили переосмыслить подходы к разработке схем утилизации бросовой теплоты двигателя внутреннего сгорания, выбрать оптимальный алгоритм управления подобной системой при монтаже на машину или трактор. В результате разработана новая запатентованная система поддержания заданного температурного режима в основных узлах и прицепном агрегате самоходной машины (RU2788019, 2023 г.).

Общий алгоритм работы системы основан на приоритете подвода теплоты к тому или иному теплопотребителю. В зависимости от вида предстоящей работы перед запуском двигателя машины оператор выбирает режим функционирования системы:

автоматический согласно базовому алгоритму работы или ручной выбор теплопотребляющих контуров. В первом случае поддержание заданного температурного режима осуществляется в двигателе внутреннего сгорания (ДВС), коробке передач (КП) и ведущих мостах (ВМ). Во втором случае оператор может включать в работу дополнительно контуры теплопотребления гидросистемы навесного устройства (ГНУ), кабины оператора и прицепного агрегата (ПА). Функциональная схема системы представлена на рисунке 4.

Работа в автоматическом режиме осуществляется следующим образом. После пуска холодного двигателя (температура охлаждающей жидкости менее 60 °С) включаются электромагнитные клапаны 3 и 4 теплопотребляющего контура II. Теплоноситель (греющий) утилизационного контура I начинает циркулировать через жидкостно-жидкостный теплообменник 5. В данном случае максимальное количество бросовой теплоты, утилизируемой рекуператором из отработавших газов, используется для разогрева двигателя внутреннего сгорания. При достижении температуры охлаждающей жидкости двигателя не менее 70 °С клапаны 3 и 4 отключаются, подача теплоносителя утилизационного контура I в теплообменник 5 прекращается. Дальнейший разогрев двигателя до рабочей температуры осуществляется в штатном режиме.

Одновременно с отключением клапанов 3 и 4 включаются электромагнитные клапаны 7 и 8 теплопотребляющего контура коробки передач III. Теплоноситель утилизационного контура I начинает циркулировать через жидкостно-масляный теплообменник 9 и нагревать масло гидравлической системы коробки передач. При достижении температуры масла не менее 70 °С клапаны 7 и 8 отключаются, циркуляция теплоносителя утилизационного контура I через теплообменник 9 прекращается.

Одновременно с отключением клапанов 7 и 8 включаются электромагнитные клапаны 13 и 14 теплопотребляющего контура ведущего моста IV, теплоноситель утилизационного контура I начинает циркулировать через жидкостный теплообменник 15 и нагревать масло в ведущем мосту. При достижении температуры масла в ведущем мосту 50 °С или более клапаны 13 и 14 отключаются, теплоноситель утилизационного контура I через теплообменник 15 прекращает циркулировать.

После разогрева технических жидкостей теплопотребителей до заданных величин система работает в режиме подогрева, т.е. при охлаждении жидкости ниже заданного диапазона включаются соответствующие электромагнитные клапаны, теплоноситель утилизационного контура I начинает циркулировать через теплообменники теплопотребляющих контуров, возобновляется нагрев масла или охлаждающей жидкости до заданного уровня. Температурный диапазон каждого узла устанавливается на основании рекомендаций завода-изготовителя, а при их отсутствии с учетом опубликованных рекомендаций в этой области.

Ручной режим выбора приоритета подвода теплоты теплопотребителям подразумевает возможность включения (выключения) в работу системы одного или нескольких теплопотребляющих контуров. Это реализуется путем вывода на панель управления системой тумблеров для принудительного включения соответствующих потребителей теплоты. При работе самоходной машины с различным навесным оборудованием в условиях пониженной температуры окружающей среды необходимо обеспечить оптимальную температуру масла в гидравлической системе навесного устройства.

В данном случае соответствующим тумблером панели управления системой включается в работу теплопотребляющий контур гидросистемы навесного устройства IV. Его работа аналогична работе других контуров. Включаются электромагнитные клапаны 10 и 11, теплоноситель утилизационного контура I начинает циркулировать через жидкостно-масляный теплообменник 12, нагревая масло гидросистемы. При достижении температуры масла в гидравлической системе 40 °С или более клапаны 10 и 11 отключаются, циркуляция теплоносителя утилизационного контура I через теплообменник 12 прекращается, система продолжает работать в режиме поддержания заданного температурного диапазона.

При эксплуатации самоходных машин в жестких климатических условиях, особенно в северных районах, могут понадобиться дополнительные меры обеспечения комфортных условий в кабине машины. Для этого предусмотрен теплопотребляющий контур кабины самоходной машины VI. Он включается принудительно с панели управления и работает аналогично другим контурам, за исключением того, что его выключает тоже оператор. При активации контура включаются электромагнитные клапаны 16 и 17, теплоноситель утилизационного контура I циркулирует через жидкостно-воздушный теплообменник (конвектор) 18. При выключении теплопотребляющего контура кабины электромагнитные клапаны 16 и 17 отключаются, теплоноситель утилизационного контура I циркулирует, минуя теплообменник 18. Нагрев воздуха кабины самоходной машины прекращается.

При эксплуатации машинно-тракторного агрегата может понадобиться подвод теплоты в буксируемый агрегат. Для решения этой задачи система содержит возможность подключения к теплопотребляющему контуру прицепного агрегата VII с помощью быстроразъемных гидравлических соединений 21. Одновременно перепускной электромагнитный клапан 19 перекрывает поток теплоносителя утилизационного контура I, а запорные электромагнитные клапаны 20 открываются, вследствие чего теплоноситель утилизационного контура I начинает циркулировать через теплопотребляющий контур прицепного агрегата.

Выводы. Анализ литературных данных и полученные результаты экспериментальных исследований указывают на наличие в отработавших газах двигателя внутреннего сгорания существенной по величине кинетической и тепловой энергии.

Разработана технологическая схема использования теплоты отработавших газов в виде системы поддержания заданного температурного режима в основных узлах и прицепном агрегате самоходной машины. Такое решение позволяет ускорить готовность двигателя к принятию нагрузки, повысить экономичность, тяговую мощность, надежность и эффективность функционирования самоходной машины или машинно-тракторного агрегата в условиях пониженной температуры окружающей среды.

Применение разработанной системы позволит максимально повысить коэффициент полезного использования теплоты, выделившейся от сгорания топлива в двигателе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разяпов М.М. Повышение надежности агрегатов трансмиссии автотракторной техники при эксплуатации в условиях низких температур // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2020. N2(26). С. 77-86. EDN: JLVLMR.
2. Сырбаков А.П., Бережнов Н.Н., Корчуганова М.А., Матяш С.П. Тепловая подготовка дизельных двигателей // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2019. N8(178). С. 167-174. EDN: BMFDDB.

3. Krokhta G.M., Khomchenko E.N., Ivannikov A.B. et al. Improving the starting performance of tractor engines and their efficiency when warming up in low temperatures. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 6. N3. 127-135. EDN: DIQLKH.
4. Долгушин А.А., Чернухин Р.В., Кидло Т.И. Статистический анализ отказов тракторов «Кировец» в условиях Новосибирской области // *Технический сервис машин*. 2021. N4(145). С. 103-109. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-103-109.
5. Кукис В.С., ЩербакOVA О.В. Оценка энергии отработавших газов ДВС как возможного источника её утилизации // *Успехи современной науки*. 2017. Т. 1. N5. С. 67-70. EDN: YTASVR.
6. Долгушин А.А., Воронин Д.М., Мамонов О.В. Методология обоснования оптимального теплового режима работы агрегатов автомобилей // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. N9. С. 89-92. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10921.
7. Крохта Г.М., Хомченко Е.Н., Усатых Н.А., Иванников А.Б. К вопросу вторичного использования эксергии выпускных газов в автотракторных силовых установках // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. N89(3). С. 197-205. DOI: 10.17816/0321-4443-106855.
8. Kalinichenko A., Havrysh V., Hruban V. Heat recovery systems for agricultural vehicles: utilization ways and their efficiency. *Agriculture*. 2018. Vol. 8. N12. 199. DOI: 10.3390/agriculture8120199.
9. Иванов Н.М., Иванников А.Б., Крохта Г.М. Повышение эффективности работы моторно-трансмиссионных установок мобильных машин за счёт использования бросовой теплоты выхлопных газов // *Наука в Центральной России*. 2022. N1(55). С. 92-101. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-92-101.
10. Чернухин Р.В., Долгушин А.А., Касимов Н.Г. и др. Обоснование расходных характеристик рекуператора для тепловой подготовки агрегатов машин и оборудования // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. N4. С. 82-93. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-82-93.
11. Спицын И.А., Орехов А.А., Поликанов А.В., Рылякин Е.Г. Оценка эффективности работы техники в условиях отрицательных температур окружающего воздуха // *Нива Поволжья*. 2017. N4(45). С. 169-175. EDN: ZTIESF.
12. Русмиленко А.К., Конев В.В., Мерданов Ш.М. Совершенствование рабочих органов машин для земляных работ, применяемых при строительстве автозимников // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023. N21. С. 85-91. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-21-85-91.
13. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В. и др. Исследование сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N1. С. 19-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26.
14. Раков В.А., Сальников А.Ю. Уменьшение времени прогрева двигателя и отопления салона транспортного средства за счет использования теплоты отработавших газов // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2014. N5(41). С. 36-43. EDN: SNAXFP.
15. Al-Amir Q.R., Al-Dawody M., Abd A.M. Design of cooling system for an automotive using exhaust gasses of turbo-charged diesel engine. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. 021. DOI: 10.1007/s40032-021-00787-4.
16. Дьяков И.Я., Приходько Л.С., Шиляев В.А. и др. Об использовании сельскохозяйственных тракторов на работах различного вида // *Тракторы и сельхозмашины*. 1979. N7. С. 7-9.
17. Окунев Г.А., Кузнецов Н.А., Луковцев А.В. Тенденции формирования парка тракторов для сельских товаропроизводителей // *Вестник Курганской ГСХА*. 2020. N4(36). С. 74-80. EDN: WXAGLC.
18. Сазонов С.Н., Сазонова Д.Д. Особенности использования техники и формирования парка машин в фермерских хозяйствах // *Наука в Центральной России*. 2016. N3(21). С. 32-40. EDN: TUXNZP.

REFERENCES

1. Razyapov M. Increasing the reliability of transmission units of autotractor equipment when operating under the conditions of low temperatures. *Innovations in agricultural complex: problems and perspectives*. 2020. N2(26). 77-86 (In Russian). EDN: JLVMR.
2. Syrbakov A., Berezhnov N., Korchuganova M., Matyash S. Thermal preparation of diesel engines. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2019. N8(178). 167-174 (In Russian). EDN: BMFDDDB.
3. Krokhta G., Khomchenko E., Ivannikov A. et al. Improving the starting performance of tractor engines and their efficiency when warming up in low temperatures. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 6. N3. 127-135 (In English). EDN: DIQLKH.
4. Dolgushin A., Chernukhin R., Kidlo T. Statistical analysis of «Kirovets» tractor failures in the Novosibirsk region. *Machinery Technical Service*. 2021. N4(145). 103-109 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-4-103-109.
5. Kukis V., Shcherbakova O. Assessment of the energy of exhaust gases of internal combustion engines as a possible source of its utilization. *Successes of Modern Science*. N5. 67-70 (In Russian). EDN: YTASVR.
6. Dolgushin A., Voronin D., Mamonov O. Methodology of substantiation of the optimum thermal conditions of vehicle units. *Achievements of Science and Technology of Agro-Industrial Complex*. 2018. Vol. 32. N9. 89-92 (In Russian). DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10921.
7. Krokhta G., Khomchenko E., Usatykh N., Ivannikov A.

- On the question of secondary use of exhaust exergy in power units of vehicles and tractors. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022. N89(3). 197-205 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-106855.
8. Kalinichenko A., Havrysh V., Hruban V. Heat recovery systems for agricultural vehicles: Utilization ways and their efficiency. *Agriculture*. 2018. Vol. 8. N12. 199 (In English). DOI: 10.3390/agriculture8120199.
 9. Ivanov N., Ivannikov A., Krochta G. Improving the efficiency of motor-transmission units of mobile machines by using the waste heat of exhaust gases. *Science in the Central Russia*. 2022. N1 (55). 92-101 (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-92-101.
 10. Chernukhin R., Dolgushin A., Kasimov N. et al. Justification of the flow characteristics of the recuperator for the thermal preparation of machinery and equipment units. *Metal Working and Material Science*. 2020. Vol. 22. N4. 82-93 (In Russian). DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-82-93.
 11. Spicyn I., Orekhov A., Polikanov A., Rylyakin E. Evaluation of the efficiency of machinery operation under conditions of negative ambient air temperatures. *Niva Povolzh'ye*. 2017. N4(45). 169-175 (In Russian). EDN: ZTIESF.
 12. Rusmilenko A., Konev V., Merdanov Sh.M. Perfection of the working bodies of earthmoving machines used in the construction of winter roads. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2023. N21. 85-91 (In Russian). DOI: 10.26160/2658-3305-2023-21-85-91.
 13. Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A. et al. Study of an exhaust gas heat separation system for the beet harvester. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N1. 19-26 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26.
 14. Rakov V., Salnikov A. Engine warm up time reducing and saloon heating car through the waste heat. *Alternative Fuel Transport*. 2014. N5(41). 36-43 (In Russian). EDN: SNAXFP.
 15. Al-Amir Q.R., Al-Dawody M., Abd A.M. Design of cooling system for an automotive using exhaust gasses of turbo-charged diesel engine. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. 021 (In English). DOI: 10.1007/s40032-021-00787-4.
 16. Dyakov I.Ya., Prikhodko L.S., Shilyaev V.A. et al. About the use of agricultural tractors in various types of work. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1979. N7. 7-9 (In Russian).
 17. Okunev G., Kuznetsov N., Lukovtsev A. Tendencies of forming a tractor fleet for rural producers. *Vestnik Kurganskoy GSHA*. 2020. N4(36). 74-80 (In Russian). EDN: WXAGLC.
 18. Sazonov S., Sazonova D. Specifics of using machinery and forming machine fleet in farm enterprises. *Science in the Central Russia*. 2016. N3(21). 32-40 (In Russian). EDN: TUXNZP.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Иванов Н.М. – общее научное руководство, доработка текста и выводов;

Крохта Г.М. – разработка методики эксперимента, постановка цели и задач исследований, обсуждение и анализ результатов, доработка текста и формулирование выводов;

Ивannikov А.Б. – разработка состава экспериментальной установки, анализ существующих технических решений использования бросовой теплоты двигателя внутреннего сгорания, проведение эксперимента, анализ результатов, подготовка текста статьи;

Крум В.А. – обработка результатов экспериментальных исследований, построение графиков;

Дусантаев А.И. – анализ существующих технических решений использования бросовой теплоты двигателя внутреннего сгорания, редактирование и оформление материалов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Ivanov N.M. – scientific supervision, manuscript revision, revision of the manuscript and conclusions;

Krochta G.M. – development of the experimental methodology, setting the goal and objectives of the experimental research, discussion and analysis of the obtained results, manuscript revision and formulation of conclusions;

Ivannikov A.B. – development of the experimental unit design, analysis of existing technical solutions for the utilization of waste heat from the internal combustion engine, conducting experiments, analysis of the results, preparation of the manuscript text;

Krum V.A. – processing the results of experimental studies, plotting graphs;

Dusantaev A.I. – analysis of existing technical solutions for the utilization of waste heat from internal combustion engines, manuscript editing and formatting.

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

01.06.2024

05.08.2024

EDN: PMEWSSE

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-31-38



Научная статья

УДК 629.3.014



Моделирование движения мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления

Захид Адыгезалович Годжаев¹,
доктор технических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,
e-mail: fic51@mail.ru;

Владимир Ильич Прядкин²,
доктор технических наук,
доцент,
e-mail: vip16.vgltu@mail.ru;

Артём Владимирович Артёмов²,
ассистент,
artemow94@yandex.ru

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

²Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация

Реферат. Условия криволинейного движения сельскохозяйственных мобильных энергетических средств значительно зависят от эксплуатационных режимов работы высокоэластичных шин. Описание и моделирование этого процесса позволит улучшить эксплуатационные показатели мобильных энергетических средств на этапах исследования и проектирования. *(Цель исследования)* Оценить влияние параметров шин сверхнизкого давления на курсовую устойчивость мобильных энергетических средств при криволинейном движении. *(Материалы и методы)* Движение мобильного энергетического средства на разворотной полосе рассматривается при различных скоростях движения, внутришинном давлении и с учетом изменения массы технологического материала в баке. Характеристика бокового увода шин сверхнизкого давления представлена зависимостью, основанной на эмпирическом определении угла увода шины в лабораторных условиях. *(Результаты и обсуждение)* Получены зависимости, описывающие изменение величины бокового смещения центра масс мобильного энергетического средства при различном давлении воздуха в шинах передней и задней осей. Проведено сравнение результатов математического моделирования с результатами полевого эксперимента. Анализ характеристик криволинейного движения мобильного энергетического средства указывает на смену типа поворачиваемости при изменении объема технологической жидкости в баке. Применение системы децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах в зависимости от нагрузки на колеса позволяет достичь недостаточной поворачиваемости мобильного энергетического средства во всем диапазоне рабочих скоростей, а максимальное отклонение от планируемой траектории движения на поворотной полосе не превышает 8,5 процента. *(Выводы)* Установили, что предложенная модель криволинейного движения мобильного энергетического средства, учитывающая зависимости бокового увода шины сверхнизкого давления от давления воздуха в шине и воздействующих на нее сил, позволяет получить траекторию поворота с высокой степенью адекватности.

Ключевые слова: шина сверхнизкого давления, мобильное энергетическое средство, боковой увод шины, радиус поворота, устойчивость движения.

■ **Для цитирования:** Годжаев З.А., Прядкин В.И., Артёмов А.В. Моделирование движения мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 31-38. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-31-38. EDN: PMEWSSE.

Scientific article

Modeling the Motion of a Mobile Power Vehicle with Ultra-Low Pressure Tires

Zakhid A. Godzhaev¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
corresponding member of RAS,
e-mail: fic51@mail.ru;

Vladimir I. Pryadkin²,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,
e-mail: vip16.vgltu@mail.ru;
Artyom V. Artyomov²,

assistant,
e-mail: artemow94@yandex.ru

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

²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

Abstract. The paper states that the conditions of curvilinear motion of agricultural mobile power vehicle significantly depend on the operating modes of highly elastic tires. Describing and modeling this process will improve the operational performance of mobile power vehicle at the research and design stages. *(Research purpose)* The research aims to assess the impact of ultra-low-pressure tire parameters on the directional stability of the mobile power vehicle during curvilinear motion. *(Materials and*

methods) The paper analyzes the motion of a mobile power vehicle on the headland at various speeds and internal tire pressure, considering changes in the mass of the operational material in the tank. The characteristics of the lateral slip of ultra-low-pressure tires are presented dependent on the empirical determination of the tire slip angle under laboratory conditions. (Results and discussion) The research resulted in obtaining dependences that describe the change in the lateral displacement of the center of mass in the mobile power vehicle at different air pressures in the front and rear axle tires. The mathematical modeling results are compared with the field experiment outcomes. The analysis of the curvilinear motion characteristics of the mobile power vehicle indicates a change in the steerability when the volume of operational fluid in the tank varies. The application of a decentralized tire pressure control system, which adjusts based on the wheel load, achieves understeer of the mobile power vehicle across the entire range of operating speeds. Additionally, the maximum deviation from the planned trajectory of movement on the headland does not exceed 8.5 percent. (Conclusions) It is established that the proposed model of the curvilinear motion for the mobile power vehicle, which considers the dependence of the lateral slip of ultralow-pressure tires on tire air pressure and acting forces, allows for obtaining a highly accurate turning trajectory.

Keywords: ultra-low pressure tire, mobile power vehicle, lateral tire slip, turning radius, driving stability.

■ **For citation:** Godzhaev Z.A., Pryadkin V.I., Artyomov A.V. Modeling the motion of a mobile power vehicle with ultra-low pressure tires. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 31-38 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-31-38. EDN: PMEWSSE.

Стратегический курс развития агропромышленного комплекса России на период до 2030 года предусматривает применение технологий точного земледелия, основывающихся на автоматизации работ как отдельных агрегатов, так и энергосредств в целом [1]. Реализация данных технологий требует строгого выполнения агротехнического регламента, поэтому при выполнении технологических операций в сжатые агротехнические сроки на почвах с низкой несущей способностью возникает потребность в машинах на шинах сверхнизкого давления [2, 3].

Применение высокоэластичных шин на мобильных энергетических средствах (МЭС) позволяет снизить уровень контактного давления движителя на почву, повысить плавность хода и тяговые свойства, однако в процессе поворота высокая эластичность шин приводит к увеличению углов увода [4]. Следствием этого является увеличение ширины поворотной полосы и снижение курсовой устойчивости мобильных энергетических средств. Режим движения МЭС на повороте представляет собой один из основных и функционально сложных видов маневрирования. Однако влияние параметров шин сверхнизкого давления на характер траектории движения МЭС на повороте исследовано не в должной мере.

Цель исследования – оценить влияние параметров шин сверхнизкого давления на курсовую устойчивость МЭС при криволинейном движении.

Материалы и методы. В предложенной модели МЭС представляется твердым телом, способным перемещаться в двухмерном пространстве. В качестве объекта исследований выступает мобильное энергетическое средство МЭС-600, оборудованное шинами сверхнизкого давления 1020x420-18 модели Бел-79 (рис. 1) [5].



Рис. 1. МЭС-600 с шинами сверхнизкого давления 1020x420-18 модели Бел-79 при испытаниях

Fig. 1. MPV-600 with ultralow-pressure tires 1020x420-18 model Bel-79 being testing

Взаимодействие тела с опорной поверхностью осуществляется со стороны колес в четырех точках. Движение МЭС на повороте рассматривается с учетом влияния шин сверхнизкого давления и опорного основания на перераспределение нормальных нагрузок по колесам под действием центробежной силы и момента сил инерции, при условии изменения массы технологической жидкости в баке в процессе выполнения операции. Принятые допущения позволяют рассматривать данную модель как пространственную, что повышает точность определения кинематических и динамических параметров криволинейного движения объекта.

Теоретическое исследование процесса криволинейного движения МЭС-600 проводилось на основании расчетной схемы (рис. 2) с учетом рекомендаций [6, 7].

$$\begin{aligned}
 m_a \cdot \ddot{x}_C = & (P_{K11} - P_{f11}) \cdot \sin(\beta + (\alpha_{11} - \delta_{11})) + \\
 & + (P_{K12} - P_{f12}) \cdot \sin(\beta + (\alpha_{12} - \delta_{12})) + \\
 & + P_{b11} \cdot \cos(\beta + \alpha_{11}) + P_{b12} \cdot \cos(\beta + \alpha_{12}) + \\
 & + (P_{K21} - P_{f21}) \cdot \sin(\beta - (\alpha_{21} - \delta_{21})) + \\
 & + (P_{K22} - P_{f22}) \cdot \sin(\beta - (\alpha_{22} - \delta_{22})) + \\
 & + P_{b21} \cdot \cos(\beta - \alpha_{21}) + P_{b22} \cdot \cos(\beta - \alpha_{22});
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 m_a \cdot \ddot{y}_C = & (P_{K11} - P_{f11}) \cdot \cos(\beta + (\alpha_{11} - \delta_{11})) + \\
 & + (P_{K12} - P_{f12}) \cdot \cos(\beta + (\alpha_{12} - \delta_{12})) - \\
 & - P_{b11} \cdot \sin(\beta + \alpha_{11}) - P_{b12} \cdot \sin(\beta + \alpha_{12}) + \\
 & + (P_{K21} - P_{f21}) \cdot \cos(\beta - (\alpha_{21} - \delta_{21})) + \\
 & + (P_{K22} - P_{f22}) \cdot \cos(\beta - (\alpha_{22} - \delta_{22})) - \\
 & - P_{b21} \cdot \sin(\beta - \alpha_{21}) - P_{b22} \cdot \sin(\beta - \alpha_{22});
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 J_Z \cdot \ddot{\beta} = & (P_{K11} - P_{f11}) \cdot \sin(\alpha_{11} - \delta_{11}) \cdot (l_2 + a \cdot \sin \alpha_{11}) + \\
 & + (P_{K12} - P_{f12}) \cdot \sin(\alpha_{12} - \delta_{12}) \cdot (l_2 - a \cdot \sin \alpha_{11}) - \\
 & - (P_{K11} - P_{f11}) \cdot \cos(\alpha_{11} - \delta_{11}) \cdot (0,5 \cdot B_h + a \cdot \cos \alpha_{11}) - \\
 & - (P_{K12} - P_{f12}) \cdot \cos(\alpha_{12} - \delta_{12}) \cdot (0,5 \cdot B_h + a \cdot \cos \alpha_{12}) + \\
 & + P_{b11} \cdot \cos \alpha_{11} \cdot (l_2 + a \cdot \sin \alpha_{11}) + \\
 & + P_{b11} \cdot \sin \alpha_{11} \cdot (0,5 \cdot B_h + a \cdot \sin \alpha_{11}) + \\
 & + P_{b12} \cdot \cos \alpha_{12} \cdot (l_2 - a \cdot \sin \alpha_{12}) + \\
 & + P_{b12} \cdot \sin \alpha_{12} \cdot (0,5 \cdot B_h + a \cdot \sin \alpha_{11}) + \\
 & + (P_{K21} - P_{f21}) \cdot \sin(\alpha_{21} - \delta_{21}) \cdot (l_1 + a \cdot \sin \alpha_{11}) + \\
 & + (P_{K22} - P_{f22}) \cdot \sin(\alpha_{22} - \delta_{22}) \cdot (l_1 - a \cdot \sin \alpha_{22}) - \\
 & - (P_{K21} - P_{f21}) \cdot \cos(\alpha_{21} - \delta_{21}) \cdot (0,5 \cdot B_h + a \cdot \cos \alpha_{21}) - \\
 & - (P_{K22} - P_{f22}) \cdot \cos(\alpha_{22} - \delta_{22}) \cdot (0,5 \cdot B_h + a \cdot \cos \alpha_{22}) + \\
 & + P_{b21} \cdot \cos \alpha_{21} \cdot (l_1 + a \cdot \sin \alpha_{21}) + \\
 & + P_{b11} \cdot \sin \alpha_{21} \cdot (0,5 \cdot B_h + a \cdot \sin \alpha_{21}) + \\
 & + P_{b22} \cdot \cos \alpha_{22} \cdot (l_1 - a \cdot \sin \alpha_{22}) + \\
 & + P_{b22} \cdot \sin \alpha_{22} \cdot (0,5 \cdot B_h + a \cdot \sin \alpha_{22}) - \sum M_{Ci},
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

где m_a – масса МЭС, кг; J_Z – момент инерции МЭС относительно вертикальной оси, проходящей через действительный центр поворота, кг·м²; β – курсовой угол движения МЭС, рад; углы бокового увода колес МЭС, рад; x_c, y_c – горизонтальные координаты центра масс МЭС, м; M_{Ci} – моменты сопротивления повороту МЭС, Н·м.

Значения углов увода шины сверхнизкого давления 1020х420-18 определены экспериментально в лабораторных условиях для различных эксплуатационных режимов с использованием стенда для испытания тракторных шин и разработанной установки для определения бокового увода шины без тяговой нагрузки и с тяговой нагрузкой (рис. 3) [8, 9].

В таблице приведены экспериментальные данные о величине коэффициента сопротивления

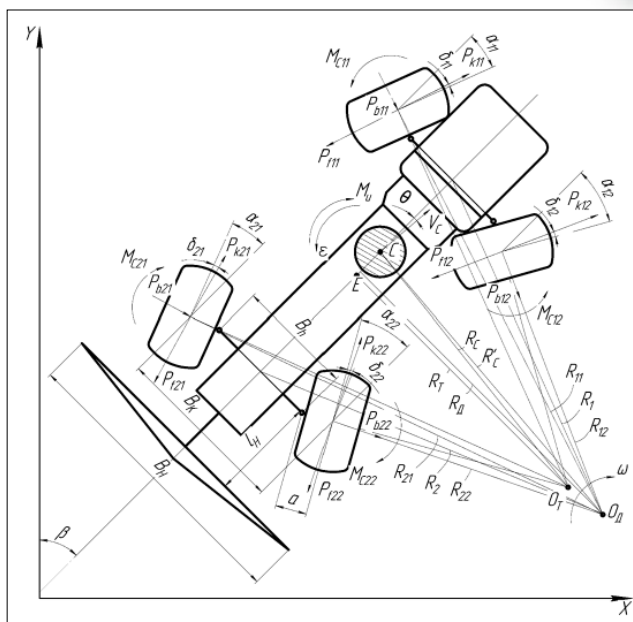


Рис. 2. Схема криволинейного движения МЭС

Fig. 2. Diagram illustrating curvilinear motion of mobile power vehicle (MPV)



Рис. 3. Определение углов увода шины сверхнизкого давления на твердом (а) и грунтовом (б) опорном основании

Fig. 3. Determination of slip angles of an ultra-low pressure tire on a solid (a) and on a soil (b) support base

шины боковому уводу и максимальном угле увода шины 1020х420-18 при различных эксплуатационных режимах. Учитывая нелинейность характеристики углов увода колес при воздействии на них боковой силы [10], численное значение угла увода, входящее в систему уравнений (1)-(3), описано аппроксимированной зависимостью вида:

$$\varphi_{yi} = \varphi_{yi}^{\max} - A \cdot e^{-B\delta_i}, \quad (4)$$

где φ_y – удельная боковая сила ($\varphi_y = P_y/G_Z$); $\varphi_y^{\max}$ – максимальное значение удельной боковой силы соответствующее коэффициенту сцепления; A, B – эмпирические коэффициенты функции.

Таблица			Table		
Влияние эксплуатационных режимов нагружения шины 1020х420-18 на показатели бокового увода			IMPACT OF LOADING OPERATING MODES ON THE LATERAL SLIP INDICATORS OF THE 1020х420-18 TIRE		
Эксплуатационный режим	Коэффициент сопротивления боковому уводу, K_{yb} , кН/рад	Максимальный угол увода δ , град			
Фон бетон					
$G_z = 3,48$ кН, $P_w = 80$ кПа	47-55	6,34			
$G_z = 4,92$ кН, $P_w = 80$ кПа	46-52	7,38			
$G_z = 4,26$ кН, $P_w = 60$ кПа	43-51	10,51			
$G_z = 3,48$ кН, $P_w = 40$ кПа	37-50	11,9			
Фон грунт					
$G_z = 3,48$ кН, $P_w = 17$ кПа	17-20	16,1			
$G_z = 4,26$ кН, $P_w = 25$ кПа	21-25	13,3			
$G_z = 4,92$ кН, $P_w = 35$ кПа	33-36	10,4			

Эмпирические коэффициенты функции (4) определены при проведении стендовых испытаний шины сверхнизкого давления 1020х420-18 при различной вертикальной нагрузке и внутришинном давлении на твердом опорном основании и фоне соответствующем почве подготовленной под посев.

Существенное влияние на процесс поворота МЭС оказывают положение центра масс и распределение нагрузки между колесами передней и задней оси (Янчевский В.А., Неклюдов А.В. Давление воздуха в шине как параметр, влияющий на увод автомобильного колеса. М.: МАДИ, 2023. С. 211-214. Гергенов С.М., Дарханов Ж.В. Моделирование шинного тестера ВСГУТУ-ИРНИТУ в программном комплексе «Универсальный механизм». Улан-Удэ: ВСГУТУ. 2022. С. 596-602).

Математическое описание изменения нагрузочных режимов работы шин передней и задней осей разработано на основании проведенных лабораторно-полевых испытаний МЭС-600. Зависимости координат центра масс от уровня технологической жидкости в баке

$$l_1 = f(m_{ж}); H_c = f(l_1), \text{ м}, \quad (5)$$

где $m_{ж}$ – масса технологической жидкости в баке, кг; H_c – вертикальная координата центра масс.

Таким образом, зная уровень заполнения бака технологической жидкостью, можно определить вертикальные реакции на колесах в ходе эксплуатации МЭС [11].

Имитационная модель криволинейного движения МЭС, оборудованного шинами сверхнизкого давления, реализована в программном комплексе Matlab/Simulink согласно структурной модели проведения численного эксперимента, представленной на рисунке 4 с учетом рекомендаций [12, 13].

При проведении теоретических исследований

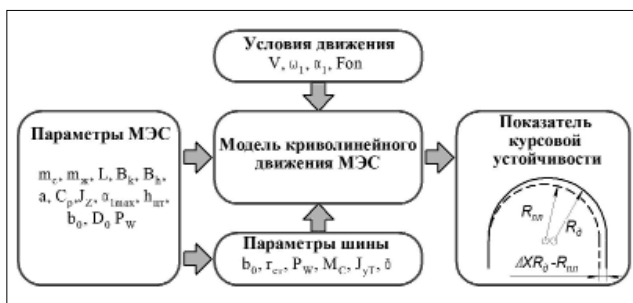


Рис. 4. Структурная модель проведения компьютерного эксперимента

Fig. 4. Structural model of conducting the computer experiment

движения МЭС на разворотной полосе с использованием разработанной математической модели оценивался характер влияния давления воздуха в шинах, весовой нагрузки и других конструктивных факторов на величину бокового смещения относительно планируемой траектории движения и величину максимального контактного давления движителя на грунт [14].

Движение МЭС на разворотной полосе моделировалось следующим образом. В начальный момент времени МЭС сообщалась заданная скорость и выдерживалась в течение всего компьютерного эксперимента [15]. Через 0,25 с после начала движения начинался поворот передних колес в соответствии с зависимостью, представленной на рисунке 5. Поворот передних колес продолжался в течение 1,75 с и достигал величины $\alpha_{\max} = 28^\circ$. По достижении максимального угла поворота колес он удерживался в течение 2 с, а затем передние колеса возвращались в исходное положение за 1,75 с.

Адекватность математической модели проверялась в ходе полевого эксперимента, заключающегося в выполнении маневра разворот при различной скорости, внутришинном давлении и уровне загрузки бака технологической жидкости [16-18]. Эксперимент проводился на участке поля озимой пшеницы. Закон изменения угла поворота управляемых колес соответствовал графику на рисунке 5.

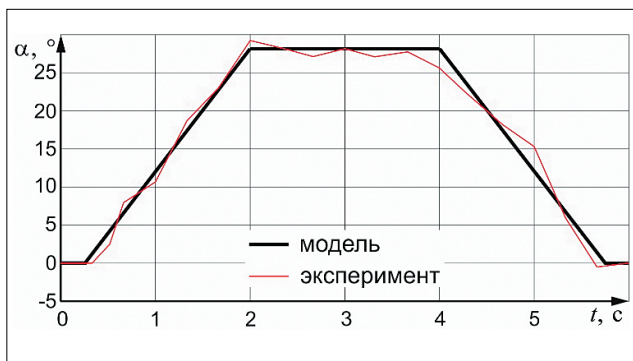


Рис. 5. График управления углом поворота колес

Fig. 5. Graph of wheel steering angle control

Результаты и обсуждение. В лабораторных испытаниях шины 1020х420-18 сверхнизкого давления и лабораторно-полевых испытаний МЭС-600 определены необходимые исходные данные для реализации модели поворота объекта исследования.

Аппроксимация функций $q_{\max}(p_w, G_z)$, $K_{yв}(p_w, G_z)$ произведена методом наименьших квадратов произведена с использованием математического комплекса *MathCAD 15* и получены формулы:

$$q_{\max}(p_w, G_z) = -8,216 \cdot 10^{-5} \cdot G_z^2 - 4,917 \cdot 10^{-3} \cdot p_w^2 + 1,064 \cdot 10^{-3} \cdot G_z \cdot p_w + 0,087 \cdot G_z + 0,644 \cdot p_w - 5,169, \text{ кПа}; \quad (6)$$

$$K_{yв}(p_w, G_z) = -8,411 \cdot 10^{-7} \cdot G_z^2 + 0,016 \cdot p_w^2 + 6,635 \cdot 10^{-4} \cdot G_z \cdot p_w + 0,0230 \cdot G_z - 0,954 \cdot p_w + 13,244. \quad (7)$$

Характеристики изменения координат центра масс от уровня загрузки бака представлены аппроксимированными линейными функциями:

$$l_1 = 0,0006 \cdot m_{ж} + 0,694, \text{ м}; H_C = 0,8286 \cdot l_1 + 0,4304, \text{ м}.$$

Результаты реализации разработанной математической модели, учитывающей особенности взаимодействия шины с опорным основанием представлены на *рисунках 6-9*.

Установлено, что на величину бокового смещения центра масс МЭС относительно планируемой траектории оказывают влияние скорость движения, угол поворота управляемых колес, давление воздуха в шинах и весовые нагрузки на колесах.

Анализ зависимостей (*рис. 7*) показывает, что при увеличении скорости движения МЭС в порож-

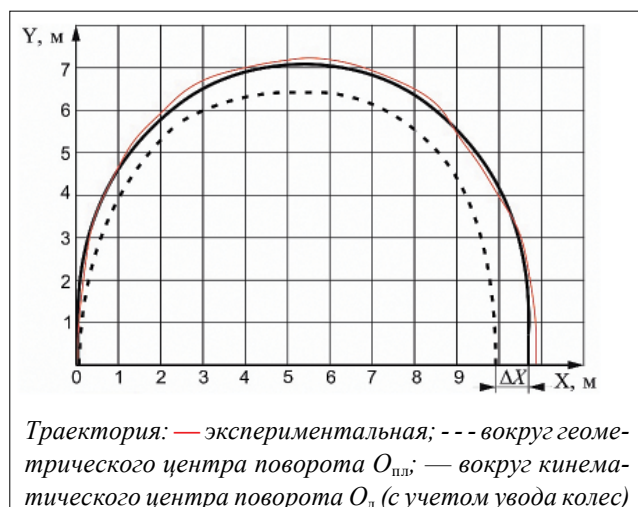


Рис. 6. Траектория поворота МЭС при скорости $v = 3 \text{ м/с}$ и угле поворота переднего наружного колеса $\alpha = 28^\circ$
Fig. 6. Trajectory of the mobile power vehicle (MPV) turn at a speed of $v = 3 \text{ m/s}$ and a steering angle of the front outer wheel of $\alpha = 28^\circ$

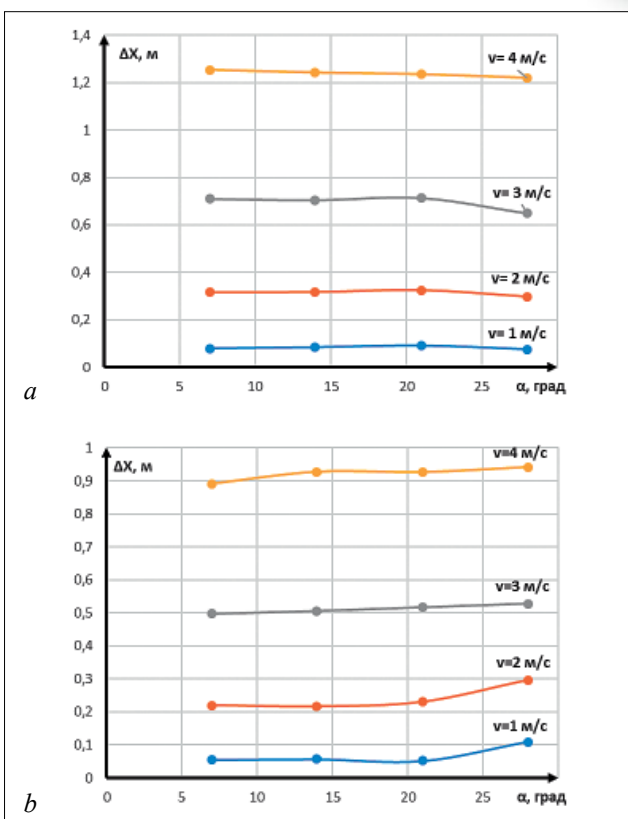


Рис. 7. Зависимость бокового смещения центра масс МЭС от угла поворота колеса: а – $P_w = 25 \text{ кПа}$, $m_a = 1485 \text{ кг}$; б – $P_w = 25 \text{ кПа}$, $m_a = 2085 \text{ кг}$

Fig. 7. The relationship between the lateral displacement of the mobile power vehicle (MPV) center of mass and the wheel steering angle: а – $P_w = 25 \text{ kPa}$, $m_a = 1485 \text{ kg}$; б – $P_w = 25 \text{ kPa}$, $m_a = 2085 \text{ kg}$

нем состоянии ($m_a = 1485 \text{ кг}$) имеет место его избыточная поворачиваемость. Однако при полной загрузке ($m_a = 2085 \text{ кг}$) поворачиваемость становится недостаточной. Учитывая, что при эксплуатации МЭС на шинах сверхнизкого давления, оборудованного штанговым опрыскивателем, масса машины изменяется в процессе технологической операции, смена типа поворачиваемости вызывает снижение курсовой устойчивости.

Величина бокового смещения на разворотной полосе (ΔX) при различных уровнях рабочей скорости значительно зависит от внутришинного давления. С увеличением давления воздуха в шинах с 10 до 40 кПа боковое смещение ΔX уменьшается в среднем на 55,5 % в порожнем состоянии ($m_a = 1485 \text{ кг}$) и на 58,33 % в полностью груженом ($m_a = 2085 \text{ кг}$).

В рамках численного эксперимента исследован режим криволинейного движения МЭС, имитирующий регулирование давления воздуха в шинах задней оси в зависимости от уровня заправки бака технологической жидкостью. Давление в шинах задней оси выбиралось с учетом равенства относительных

деформаций шин передней и задней оси согласно экспериментальным значениям радиальной жесткости шины сверхнизкого давления 1020х420-18 [8].

На основании теоретических исследований выявлено, что поддержание одинаковой радиальной деформации шин передней и задней оси позволяет исключить смену вида поворачиваемости с избыточной на недостаточную при изменении массы МЭС.

На рисунке 8 показаны зависимости бокового смещения центра масс МЭС при использовании децентрализованной системы регулирования давления воздуха в шинах.

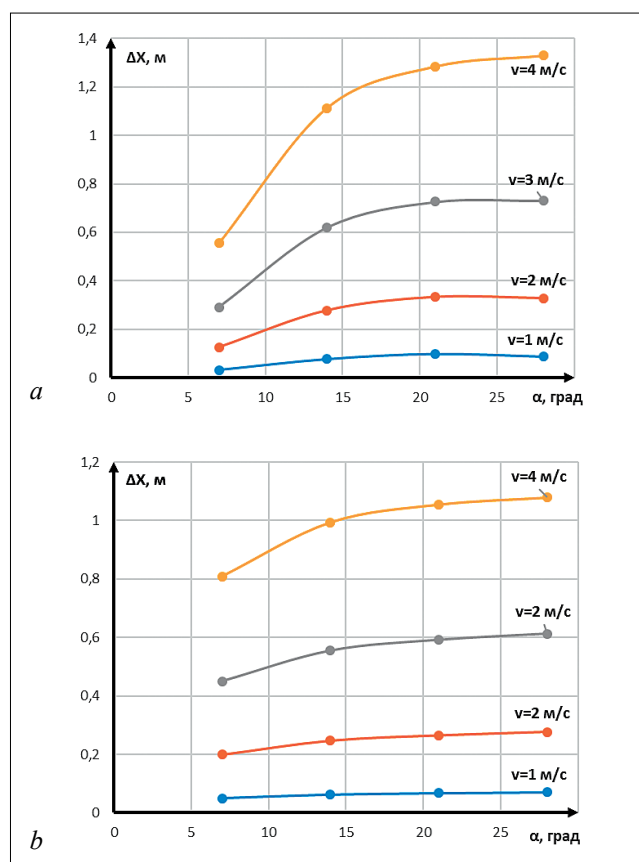


Рис. 8. Зависимость бокового смещения центра масс МЭС от угла поворота колеса при варьировании давления воздуха в шинах задней оси: а – $m_a = 1485$ кг, $P_{w1} = 25$ кПа, $P_{w2} = 10$ кПа; б – $m_a = 2085$ кг, $P_{w1} = 25$ кПа, $P_{w2} = 23,5$ кПа

Fig. 8. The relationship between the lateral displacement of the mobile power vehicle (MPV) center of mass and the wheel steering angle with varying air pressure in the rear axle tires: а – $m_a = 1485$ kg, $P_{w1} = 25$ kPa, $P_{w2} = 10$ kPa; б – $m_a = 2085$ kg, $P_{w1} = 25$ kPa, $P_{w2} = 23.5$ kPa

Характер представленных зависимостей показал, что при изменении уровня заполнения бака технологической жидкостью во всем диапазоне рабочих скоростей движения МЭС обладает недостаточной поворачиваемостью. При этом изменение величины поперечного отклонения при повороте

корпуса МЭС на 180° незначительно, разброс значений для каждого уровня рабочей скорости не превышает 8,5%.

Оценка величины контактных давлений от колес МЭС при движении на разворотной полосе показала, что наиболее нагруженным является переднее колесо, дальнее по отношению к центру поворота (рис. 9). При этом уровень загрузки бака практически не оказывает влияния на максимальное значение контактного давления под этим колесом. Максимальное давление составляет 53,2 кПа.

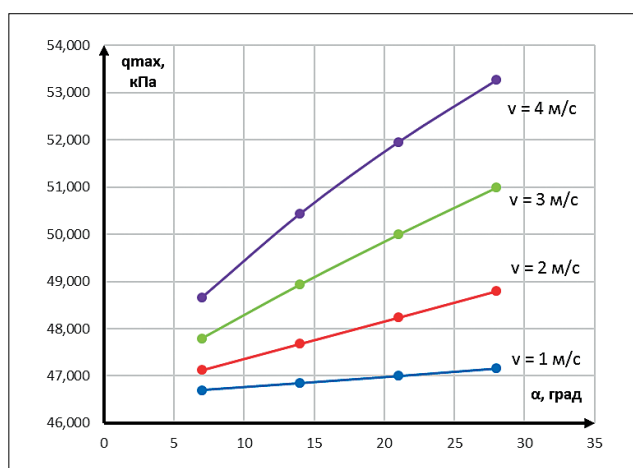


Рис. 9. Зависимость максимального контактного давления наиболее нагруженного колеса от угла поворота колеса при $P_{w1} = 25$ кПа

Fig. 9. The relationship between the maximum contact pressure of the most loaded wheel and the wheel steering angle at $P_{w1} = 25$ kPa

В результате экспериментального определения траектории движения МЭС на разворотной полосе установлено соответствие эмпирических значений траекторного смещения МЭС, полученным по разработанной модели значениям. Сравнение результатов различных исследований позволяют сделать вывод о том, что степень адекватности теоретических и аналитических исследований достаточна для решения поставленных в работе задач.

Выводы. Предложенная математическая модель криволинейного движения мобильных энергетических средств позволила описать режим движения на разворотной полосе и оценить влияние параметров шин сверхнизкого давления на размеры разворотной полосы.

Полученные впервые в ходе экспериментального исследования параметры радиальной и боковой жесткости, а также сопротивляемость боковому уводу шины сверхнизкого давления 1020х420-18 позволили добиться отклонения расчетных и экспериментальных значений ширины поворотной полосы не более 3,5%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Рожин В.Ф., Шилова Е.П. и др. Обоснование уборочно-транспортных процессов в селекционных технологиях // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N1. С. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-4-9.
2. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
3. Лобачевский Я.П., Лонин С.Э., Алексеев И.С. и др. Разработка алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного почвообрабатывающего агрегата // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N2. С. 48-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-6-48-52.
4. Горин Г.С., Годжаев З.А., Головач В.М., Кузьмин В.А. Исследования поворачиваемости трактора для построения гибридной теории поворота // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N5. С. 3-11. DOI: 10.22314/207375992016.5.311.
5. Годжаев З.А., Прядкин В.И., Колядин П.А., Артемов А.В. Перспективные мобильные средства на шинах сверхнизкого давления для сельскохозяйственного производства // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. Т. 89. N4. С. 277-286. DOI: 10.17816/0321-4443-115016.
6. Беляев А.Н., Тришина Т.В. Исследование кинематики поворота колесного трактора // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2016. N1(48). С. 115-120. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.1.115.
7. Азимов Б.М., Ихсанова Ш.З. Моделирование движения и расчета составляющих боковых сил направляющих колес хлопкоуборочной машины // *Тракторы и сельхозмашины*. 2023. Т. 90. N2. С. 107-115. DOI: 10.17816/0321-4443-107159.
8. Гончаренко С.В., Годжаев З.А., Прядкин В.И. и др. Упругие характеристики шины сверхнизкого давления. Боковые и тангенциальные нагрузки // *Автомобильная промышленность*. 2020. N10. С. 32-36. EDN: NXVSXZ.
9. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
10. Гудков В.В., Сокол П.А., Василенко А.В., Янин А.Н. Анализ влияния основных внешних сил и реакций на величину бокового увода управляемых и неуправляемых колес при криволинейном движении двухосного автомобиля // *Воронежский научно-технический вестник*. 2024. N1(47). 134-153. DOI: 10.34220/2311-8873-2024-134-153.
11. Cheng Z., Lu Z. Semi-empirical model for elastic tyre traffic ability and methods for the rapid determination of its related parameters. *Biosystems Engineering*. 2018. 174. 204-218. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.07.010.
12. Field R.V., Hurtago E.J. Modeling of dynamic forces of a tractor in the MATLAB-simulink program environment. New York: Society of Automotive Engineers. 2003. 112.
13. Xia X., Xiong L., Lin X., Yu Z. Vehicle sideslip angle estimation considering the tire pneumatic trail variation. *SAE Technical Paper*. 2018. 2018-01-0571. DOI: 10.4271/2018-01-0571.
14. Lu D., Lu L., Wu H. et al. Tire dynamics modeling method based on rapid test method. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2020. N6. 85-85. DOI: 10.1186/s10033-020-00513-8.
15. Li F., Jiang Q.W., Li Y. Study on the measurement method of tire side slip non-steady characteristic. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*. 2018. N32(9). 29-34.
16. Qiu C.F., Zhou L., Liu J.J. et al. Study on test method of tire side deviation relaxation length. *Tire Industry*. 2019. N39(10). 633-636.
17. Arslan M.S., Sever M. Vehicle stability enhancement and rollover prevention by a nonlinear predictive control method. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019. N41(8). 2135-2149. DOI: 10.1177/0142331218795200.
18. Vantsevich V., Demkiv L.I., Klos S.R. Analysis of tire relaxation constants for modeling vehicle traction performance and handling. *ASME. DSCC*. 2018. 1:113. DOI: 10.1115/DSCC2018-9026.

REFERENCES

1. Izmailov A.Yu., Rozhin V.F., Shilova E.P. et al. Substantiation of harvesting and transportation processes in selection technologies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N1. 4-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-1-4-9.
2. Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16 N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
3. Lobachevsky Ya.P., Lonin S.E., Alekseev I.S. et al. Development of algorithms and software for the movement control systems of a robotic soil cultivation unit. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N2. 48-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-6-48-52.
4. Gorin G.S., Godzhaev Z.A., Golovach V.M., Kuzmin V.A. Research of tractor turnability for construction of hybrid theory of turn. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N5. 3-11 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992016.5.311.

5. Gojaev Z.A., Pryadkin V.I., Kolyadin P.A., Artemov A.V. Promising mobile vehicles with ultra-low pressure tires for agricultural production. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022. Vol. 89. N4. 277-286 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-115016.
6. Belyaev A.N., Trishina T.V. Research on rotational kinematics of a wheel tractor. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*. 2016. N1(48). 115-120 (In Russian).
7. Azimov B.M., Ikhsanova Sh.Z. Motion simulation and calculation of the components of the lateral forces of the guiding wheels of a cotton-harvesting machine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023. Vol. 90. N2. 107-115 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-107159.
8. Goncharenko S.V., Godzhaev Z.A., Pryadkin V.I. et al. Elastic characteristics of ultra-low pressure tire. Lateral and tangential loads. *Automotive Industry*. 2020. N10. 32-36 (In Russian). EDN: NXVSXZ.
9. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
10. Gudkov V.V., Sokol P.A., Vasilenko A.V., Yanin A.N. Analysis of the influence of the main external forces and reactions on the magnitude of the lateral withdrawal of controlled and uncontrolled wheels during the curvilinear movement of a two-axle car. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2024. N1(47). 134-153 (In Russian). DOI: 10.34220/2311-8873-2024-134-153.
11. Cheng Z., Lu Z. Semi-empirical model for elastic tyre traffic ability and methods for the rapid determination of its related parameters. *Biosystems Engineering*. 2018. 174. 204-218 (In English). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.07.010.
12. Field R.V. Hurtago E.J. Modeling of dynamic forces of a tractor in the MATLAB-simulink program environment. NY: Society of Automotive Engineers. 2003. 112 (In English).
13. Xia X., Xiong L., Lin X., Yu Z. Vehicle sideslip angle estimation considering the tire pneumatic trail variation. *SAE Technical Paper*. 2018. 2018-01-0571 (In English). DOI: 10.4271/2018-01-0571.
14. Lu D., Lu L., Wu H. et al. Tire dynamics modeling method based on rapid test method. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2020. N6. 85-85 (In English). DOI: 10.1186/s10033-020-00513-8.
15. Li F., Jiang Q.W., Li Y. Study on the measurement method of tire side slip non-steady characteristic. *Journal of Chongqing University of Technology*. 2018. N32(9). 29-34 (In English).
16. Qiu C.F., Zhou L., Liu J.J. et al. Study on test method of tire side deviation relaxation length. *Tire Industry*. 2019. N39(10). 633-636 (In English).
17. Arslan M.S., Sever M. Vehicle stability enhancement and rollover prevention by a nonlinear predictive control method. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019. N41(8). 2135-2149 (In English). DOI: 10.1177/0142331218795200.
18. Vantsevich V., Demkiv L.I., Klos S.R. Analysis of tire relaxation constants for modeling vehicle traction performance and handling. *ASME. DSCC*. 2018. 1:113 (In English). DOI: 10.1115/DSCC2018-9026.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Годжаев З.А. – научное руководство, постановка проблемы, формулировка основной концепции, целей и задач исследования, доработка текста, формирование общих выводов;

Прядкин В.И. – формулирование общих целей и задач, анализ литературных источников, разработка теоретических предпосылок, формирование общих выводов;

Артёмов А.В. – анализ литературных источников, разработка конструкции устройства для испытания шин, проведение экспериментальных исследований, проведение теоретических расчетов, итоговая переработка статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Gozhaev Z.A. – scientific supervision, problem formulation, formulation of the research main concept, objectives, and tasks, manuscript refinement, formulation of general conclusions;

Pryadkin V.I. – formulation of general objectives and tasks, literature review, development of theoretical assumptions, formulation of general conclusions;

Artemov A.V. – literature review, development of the device structure for tire testing, conducting experimental research, theoretical calculations, manuscript final revision.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

01.06.2024

12.08.2024

EDN: PZWYSU

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-39-48



Научная статья

УДК 631.31



Трансформация и интеграция процессов и систем земледелия в природный ресурсооборот

Вячеслав Филиппович Федоренко,

доктор технических наук, профессор,
академик РАН, главный научный сотрудник,
e-mail: f@maro.pro

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Закономерный переход к новой стратегии земледелия – к рационализации использования доступных природных ресурсов характеризуется экономичными способами обработки почвы. Инновационные тенденции в растениеводстве предусматривают, в том числе, частичный или полный отказ от технологии отвальной вспашки, отсутствие вертикального перемешивания пахотного слоя, минимальное нарушение почвенного покрова сельскохозяйственными машинами, уменьшение деградации и эрозии почвы. (*Цель исследования*) Применение технологических подходов, процессов и технических систем, разработанных в соответствии с современными представлениями о продукционных процессах в растениеводстве. (*Материалы и методы*) Развитие технологий обработки почвы связано с переходом от экстенсивного земледелия к системам управления природными ресурсами, которые основаны на естественных или близких к ним процессах и обеспечивают меньшее производство энтропии, чем техногенные технологии. Новые подходы, в частности системы нулевой обработки почвы (*no-till*), должны базироваться на концепции симбиоза растений и почвенных микроорганизмов и их взаимодействии с условиями и факторами окружающей среды. (*Результаты и обсуждение*) Для обеспечения оптимальных условий сохранения и развития биоценозов в корнеобитаемых слоях почвы предлагается использовать погружаемые пневмогидробуры с возможностью внутripочвенной обработки, рыхления и аэрации импульсами сжатого воздуха с последующими орошением, внесением удобрений и гидрогеля. Представляются наиболее перспективными и целесообразными агротехнологии, технические системы и средства, формирующие условия для максимальной реализации генетического потенциала продуктивности растений, формирования механизмов взаимодействия биомашинных систем и процессов живой природы для получения максимального и рационального синергетического эффекта. (*Выводы*) В соответствии с современными представлениями о продукционных процессах в растениеводстве обоснованы и разработаны технологические процессы и технические системы. Предлагаемые решения базируются на концепции симбиоза растений и почвенных микроорганизмов за счет внутripочвенной обработки, рыхления и аэрации импульсами сжатого воздуха.

Ключевые слова: растениеводство, технологии земледелия, агробиоценозы, биомашинные системы, принцип производства энтропии, нулевая обработка почвы, корнеобитаемый слой, пневмогидробуры, гидрогель.

■ **Для цитирования:** Федоренко В.Ф. Трансформация и интеграция процессов и систем земледелия в природный ресурсооборот. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N3. 39-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-39-48. EDN: PZWYSU.

Scientific article

Transformation and Integration of Agricultural Processes and Systems into the Natural Resource Cycle

Vyacheslav F. Fedorenko,

Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy
of Sciences, chief researcher,
e-mail: f@maro.pro

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The natural shift towards a new agricultural strategy targeting at the rational use of available natural resources is marked by more economical soil cultivation methods. Innovative trends in crop production include, among other practices, the partial or complete elimination of moldboard plowing, the avoidance of vertical mixing of the arable layer, minimal soil disturbance by agricultural machinery, and a reduction in soil degradation and erosion. (*Research purpose*) The paper explores the application of

technological approaches, processes, and technical systems developed in accordance with contemporary concepts of production processes in crop cultivation. (*Materials and methods*) The development of soil cultivation technologies is associated with the shift from extensive agriculture to natural resource management systems that leverage natural or nature-mimicking processes, resulting in lower entropy production than technogenic methods. New approaches, such as no-till systems, should be based on the concept of symbiosis between plants and soil microorganisms, and their interaction with environmental conditions and factors. (*Results and discussion*) To ensure optimal conditions for the preservation and development of biocenoses within the root-occupied soil layers, it is proposed to use submersible pneumatic hydrodrills capable of subsoil processing, loosening, and aeration through compressed air pulses. This process is followed by irrigation, fertilizer application and hydrogel integration. The most promising and appropriate agricultural technologies, technical systems and tools are those that maximize the genetic potential of plant productivity and facilitate the interaction between biomachine systems and natural processes. These approaches aim to achieve the highest and most rational synergistic effect. (*Conclusions*) In accordance with modern concepts in crop cultivation, technological processes and technical systems have been developed and substantiated based on the concept of symbiosis between plants and soil microorganisms. These systems utilize subsoil processing, loosening, and aeration through pulses of compressed air.

Keywords: plant growing, crop cultivation, agricultural technologies, agrobiocenoses, biomachine systems, entropy production principle, zero tillage, no-tillage, root-occupied soil layer, pneumatic hydrodrills, hydrogel.

■ **For citation:** Fedorenko V.F. Transformation and integration of agricultural processes and systems into the natural resource cycle. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 39-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-39-48. EDN: PZWYSU.

Эволюцию земледелия определяли технологические процессы и технические системы, направленные на повышение эффективности использования доступных природных ресурсов для производства продуктов питания, кормов, сырья (Менделеев Д.И. С думою о благе российском: Избранные экономические произведения. Новосибирск: Наука, 1991. 231 с.). В XX веке в земледелии начался новый этап – переход к стратегии минимума производства энтропии (Глендорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М.: Мир, 1973. 280 с.). Его принцип основывается на рациональном использовании ресурсов за счет внедрения нетрадиционных (природоподобных, почвозащитных, природоохранных, адаптивных, зеленых и др.) технологических процессов и систем бесплужной обработки почвы. Такие приемы исключают чрезвычайно энергозатратный процесс отвальной вспашки, при котором происходят срезание, крошение и оборот почвенного пласта [1, 2].

Каждый почвенный слой населен колоссальным количеством и видовым разнообразием микроорганизмов [3, 4]. При обороте пласта аэробные агробиocenозы (бактерии, грибы, водоросли, простейшие животные и пр.), адаптированные к жизни в верхних слоях почвы, оказываются внизу и большинство их гибнет. Обитающие в глубине пласта анаэробные микроорганизмы попадают соответственно наверх и тоже гибнут.

Принципиально важно отметить, что агроценозы обеспечивают формирование плодородия почвы, накопление в ней гумуса (Андрианов Б.В. Земледелие наших предков. М.: Наука, 1978. 167 с.). Особенно негативно влияет на изменение агрохи-

мических показателей почвы фотохимическое воздействие солнечной энергии. Чем интенсивнее и чаще применяется поверхностная механическая обработка почвы, тем масштабнее разрушительный эффект фотохимических факторов на гумус [5].

Однако переход на альтернативные технологии не исключает основных негативных последствий отвальной вспашки. К ним относятся разрушение корнеобитаемого слоя, эрозия почвы, потеря влаги и особенно изменение условий для почвенных биocenозов, как доноров веществ и соединений, необходимых высшим растениям для питания и защиты от стрессов (Бобровский М.В., Гин А. Земледелие в Европе. Хронология с картинками. ТРИЗ-профи: Эффективные решения в сельском хозяйстве. М.: Кушнир, 2006. 220 с.). Способы повышения продуктивности почвы в любых агроэкологических условиях наиболее рациональны и эффективны при обеспечении корнеоборота почвы и растений в тесной взаимосвязи с другими компонентами биоты, воздухом и водообменом, а также с учетом взаимодействия с обрабатывающими орудиями и машинами на основе теории биомашсистем (Богатырев Л.Г. Основные концепции, законы и принципы современного почвоведения. М.: МАКСПресс. 2015. 196 с.; Генетические основы эволюции бактерий-симбионтов растений; под ред. Проворов Н.А., Тиханович И.А. СПб: Информ-Навигатор, 2016. 240 с.); [6].

Основные тенденции изменения почвенного покрова обусловлены прямым воздействием антропогенных факторов и косвенным влиянием климатических, гидрогеологических и социально-экономических условий [7]. Хозяйственная деятельность сопровождается преобразованием природной структуры почв и приводит к формированию специфи-

ческих видов организации почвенного покрова в зависимости от характера и интенсивности землепользования. При этом зачастую усугубляется исходная природная неоднородность либо, наоборот, выравнивается ряд характеристик почв [8].

Преобразования почвенного покрова могут наблюдаться в нескольких направлениях, которые в каждом ландшафте накладываются друг на друга, вызывая совокупный и не всегда положительный эффект. В первую очередь воздействию подвергаются отдельные ареалы почв. В результате изменяется строение почвенного профиля, физические, химические, биологические свойств отдельных горизонтов, тепловой, водный, газовый, трофический, окислительно-восстановительный, солевой режимы функционирования почвы (Землепользование России в условиях изменения глобального климата и беспрецедентных социально-экономических вызовов: состояние почвенного (земельного) покрова, тенденции изменения, деградация, методология учета, прогнозы. М.: МБА, 2022. 100 с.).

В результате исследований, полевых испытаний разработаны природоподобные технологические процессы, технические системы и средства внутрипочвенной обработки, аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы с применением гидрогеля, которые защищены патентами на изобретение: «Пневмогидробур» (RU 2740805), «Пневмогидробур с защитным устройством» (RU 2802309), «Устройство для внутрипочвенных обработки, аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы и способ внутрипочвенных обработки аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы таким устройством» (RU 2807342), «Устройство для обработки корнеобитаемых горизонтов почв и способ обработки корнеобитаемых горизонтов почв таким устройством» (RU 2807736), «Способ и устройство определения границ распределения влаги в почве при внутрипочвенном точечном ее внесении» (RU 2812537).

Указанные изобретения в полной мере соответствуют стратегии развития биосферы земледелия, базирующей на фундаментальном принципе минимума производства энтропии (Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. М.: Мир, 1966. 136 с.). Процессы и устройства обеспечивают повышение продуктивности корнеобитаемых слоев почвы, достижение максимальных биологических и экологических параметров при высоком качестве, мобильности, энергоэффективности (Коммонер Б. Замыкающийся круг. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 274 с.). Особый эффект обеспечивает внесение в корнеобитаемые слои почвы раствора гидрогеля, обладающего высокими абсорбирующими свойствами. Гидрогель в сочетании с раство-

рами микробных биопрепаратов и удобрений создает оптимальный режим увлажнения и питания корневой системы растений. При пересыхании почвы гидрогель отдает влагу, при переувлажнении – впитывает ее [8].

Цель исследования: обоснование концептуальных принципов трансформации и интеграции в природный ресурсооборот технологических процессов и технических систем обработки почвы, повышающих ее плодородие и предотвращающих деградацию путем оптимизации условий симбиоза растений и почвенных микроорганизмов. Оценка возможностей применения предлагаемых способов и устройств для внутрипочвенного рыхления, аэрации импульсами сжатого воздуха корнеобитаемых слоев почвы, последующего орошения, удобрения, внесения гидрогеля.

Материалы и методы. Проведен анализ теоретических и практических результатов изучения и оценки закономерностей трансформации технологических процессов, технических систем обработки почвы и интеграции их в природный ресурсооборот, формирования и развития деградации и эрозии сельскохозяйственных земель. Современные представления о физиологии растительных и почвенных организмов базируются на концепции симбиоза растений и почвенных биоценозов. Это создает предпосылки для разработки технологических параметров, технических характеристик, потребительских свойств, технических систем и средств для внутрипочвенных операций обработки, рыхления, аэрации, орошения, внесения удобрений и гидрогеля в корнеобитаемые слои почвы.

По результатам лабораторных и полевых исследований с применением универсального пневмогидробура и лабораторного стенда (рис. 1) предложена система раздельной подачи импульсов сжатого воздуха и воды или аэрозоля (смесь воздуха, растворов удобрений и/или гидрогеля) в требуемых пропорциях при использовании комбинированных наконечников.

В состав лабораторного стенда входят пневмогидробур 1 со сменными наконечниками 2, крестовина, на которой с трех сторон монтируются шаровые краны 3, бункер для сухих компонентов 4. К боковому входу присоединен трубопровод для подачи растворов, ко второму – шланг импульсной подачи сжатого воздуха. В трубопроводы вмонтированы датчики расхода жидкости 5 и воздуха 6 с цифровыми индикаторами расхода 7, 8 и блоком питания 13. Ствол пневмогидробура встроен в накопительную емкость 9 с конусным днищем, шаровым краном, ротаметром поплавкового типа 10, пробоотборником 11 и лабораторными весами 12.

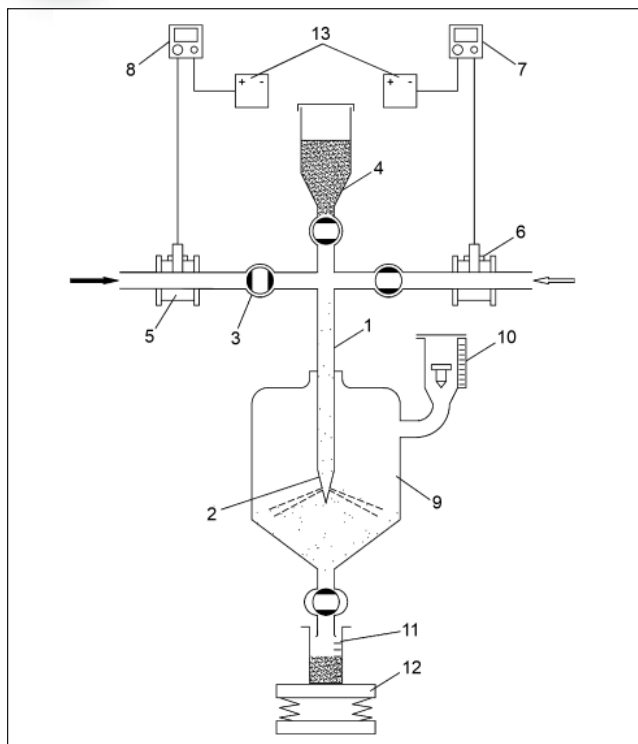


Рис. 1. Схема стенда для отработки режимов работы универсального пневмогидробура

Fig. 1. Diagram of the test bench for tuning operating modes of the universal pneumatic-hydraulic drill

Оценку эффективности внутрипочвенной подачи импульсов сжатого воздуха в корнеобитаемые горизонты почвы с последующим внесением через универсальные пневмогидробуры воды, водно-воздушных смесей и водных растворов удобрений или гидрогеля проводили в мобильной лаборатории (рис. 2).

В лабораторную установку входят: трехканальный пневмогидробур 1, бункер 2 с порошковыми компонентами, краны шаровые 3, клапаны ручные 4, насос роликовый 5, регулятор расхода с манометром 6, электродвигатель привода насоса 7, клиноременная передача 8, бак для растворов 9, компрессор с ресивером 10, электрогенератор 11 (220 В), жидкостный расходомер 12, блок управления расходомером 13, расходомер воздушный 14, блок управления 15, источник постоянного тока 16 (12 В).

Результаты и обсуждение. Анализ эволюции технологий обработки почвы свидетельствует о необходимости увеличения объемов производства продовольствия с ростом численности населения, которое можно было обеспечить за счет увеличения площадей угодий и повышения урожайности посевов. Это требовало более совершенной производительной и эффективной технологии обработки почвы [9, 10].

В наибольшей степени соответствовали этим требованиям появившиеся еще до нашей эры плу-

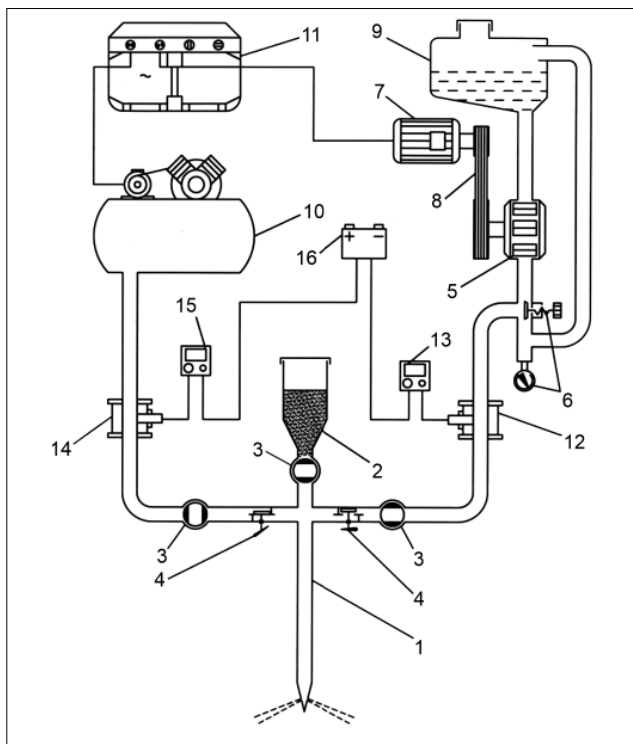


Рис. 2. Схема мобильной лаборатории

Fig. 2. Diagram of the mobile laboratory

ги. Их конструкция совершенствовалась, и к концу XVIII века был создан отвальный плуг. С его помощью верхняя часть пахотного слоя переворачивалась и укладывалась в борозду, а на поверхности оказывался нижний, рыхлый плодородный слой. На первых порах отвальная вспашка способствовала пополнению в почве влаги, уничтожению сорняков и вредителей растений, жизнедеятельности в почве полезных микроорганизмов, что обусловлено во многом высоким содержанием гумуса [11].

Плужная обработка почвы требовала значительного увеличения энергетических затрат за счет использования энергии тягловых животных, а затем тракторов. Повышение урожайности осталось важнейшим требованием, и экстенсивный путь развития земледелия, основанный на типично технократических подходах, казался единственно правильным. Работал принцип максимума производства энтропии, требующий использования в сельском хозяйстве все больших энергетических, почвенных, водных ресурсов.

Применявшаяся в середине XX века технология включала вспашку, несколько культиваций, боронование, предпосевное выравнивание, посев и дополнительное прикатывание почвы. Мощность тракторов, глубина вспашки и ширина захвата плугов постоянно росли (Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2022 году. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 372 с.).

В этот период эволюция земледелия развивалась по пути все большего использования свободной энергии, поступающей с солнечным излучением и запасенной в элементах окружающей среды (газ, нефть, уголь, сапропель, гумус). Возможности использования свободной энергии, особенно за счет природных ресурсов, подошли к своему пределу. Постепенно возникало понимание о необходимости ориентации земледелия на технологии, основанные на использовании природных или природоподобных процессов.

Одним из основоположников почвозащитной системы земледелия, показавших ненужность и вредность плуга, был русский ученый-агроном Иван Евгеньевич Овсинский. Еще в 1899 году он указывал, что при глубокой вспашке затрачиваются громадные суммы на увеличение тягового усилия, удобрения, количество которых при рациональной обработке можно значительно уменьшить или совсем не применять, теряются миллиарды рублей вследствие неурожая при засухе, которая разоряет хозяйство при глубокой вспашке (Овсинский И.Е. Новая система земледелия / Перепечатка публикации 1909 г. М.: Агро-Сибирь, 2004. 47 с.). Он сравнивал разрушительный эффект от плуга для отвальной вспашки с разрушением от артиллерийских снарядов: «Знаменитый Крупп своими снарядами военного разрушения не принес столько вреда человечеству, сколько принесла одна фабрика плугов для глубокой вспашки».

На Западе развитие ресурсосберегающего земледелия начинается в 1930-е годы с опытов, которые показали прекрасные результаты в улучшении структуры и повышении плодородия почвы. В 1943 г. вышла книга «Безумие пахаря», в которой Э. Фолкнер (Faulkner E.N. Plowman's Folly. Norman. University of Oklahoma Press. 1943. 174) критикует плужную обработку почвы, считая ее вреднейшим приемом, приведшим земледелие США и других стран к упадку, бесплодию почв и многим другим бедам. В СССР аналогичные идеи получили отражение в системах земледелия, разработанных Т.С. Мальцевым для Зауралья, А.И. Бараевым для Казахстана и Сибири (Бараев А.И. и др. Почвозащитное земледелие. М.: Колос, 1995. 574 с.).

С этих исследований начался поворот в земледелии на так называемые нетрадиционные технологии обработки почвы: адаптивные, почвозащитные, природоохранные, минимальные, нулевые, зеленые. Эти агротехнологии характеризуются более экономичными способами обработки почвы: частичным или полным отказом от отвальной вспашки, отсутствием вертикального перемешивания пахотного слоя, минимальным нарушением почвенного покрова сельскохозяйственными машинами и обязательным мульчированием почвы с целью со-

хранения влаги и уменьшения эрозии почвы [12].

Система нулевой обработки почвы – современная система земледелия, при которой почва не обрабатывается, а ее поверхность укрывается специально измельченными остатками растений – мульчей. В различных регионах планеты внедряется технология прямого посева (*no-till*) и мульчирования (*mulch tillage*) при мелком, поверхностном рыхлении или даже полном отказе от обработки почвы. Также в целях экономии энергии операции совмещаются во времени [13, 14].

При безотвальной обработке, согласно экспериментальным данным ряда исследований, смыв почвы в период таяния снега снижается более чем в 2 раза, а ливневыми стоками в 1,5 раза. Мульчирование соломой в количестве 5-6 т/га в 8-10 раз снижает эрозию. В процессе формирования мульчирующего слоя из пожнивных остатков за несколько лет постепенно восстанавливается биоценоз в почве. Обеспечивается воспроизводство плодородия естественным путем за счет высокого кругооборота питательных элементов, активизации агробиоценозов, накопления почвенного углерода, минимизации внесения минеральных удобрений и практически полного предотвращения почвенной эрозии [15, 16].

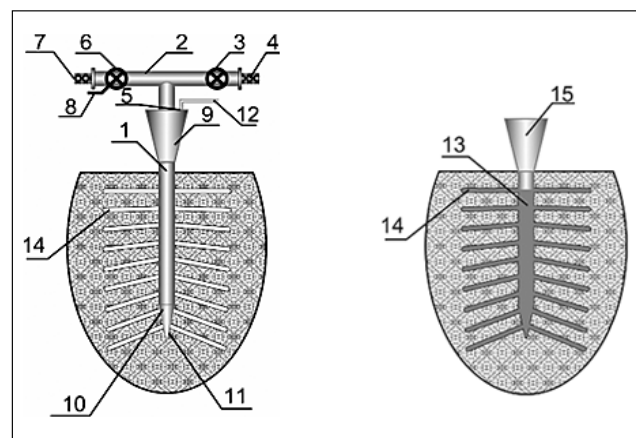


Рис. 3. Разрез корнеобитаемого горизонта почвы при подаче через пневмогидробур импульса сжатого воздуха (слева) или аэрозоля и гидрогеля (справа): 1 – ствол; 2 – полая рукоятка; 3, 6 – вентили; 4 – шланг с водой или растворами под давлением; 5 – форсунка; 7 – шланг сжатого воздуха; 8 – рычаг ручной подачи сжатого воздуха; 9 – смесительная камера; 10 – наконечник с перфорацией; 11, 12 – инжекторы; 13 – скважины; 14 – каналы; 15 – воронка (Патент RU2740805)

Fig. 3. Section of the root-occupied soil horizon during the supply of compressed air pulse (left view) or aerosol and hydrogel (right) by pneumatic hydraulic drill: 1 – stem; 2 – hollow handle; 3, 6 – valves; 4 – hose carrying pressurized water or solutions; 5 – nozzle; 7 – compressed air hose; 8 – manual compressed air feed lever; 9 – mixing chamber; 10 – perforated tip; 11, 12 – injectors; 13 – boreholes; 14 – channels; 15 – funnel (Patent RU2740805)

Разработан и изготовлен пневмогидробур (рис. 3) с возможностью раздельной подачи под давлением воздуха, воды или аэрозоля в виде смеси воздуха, растворов удобрений и гидрогеля (при использовании комбинированных наконечников) в требуемых пропорциях.

Подача импульсов сжатого воздуха через пневмогидробуры, вертикально погружаемые в корнеобитаемые слои почвы, способствуют рыхлению, аэрированию, насыщению корнеобитаемых слоев воздухом. При этом в почве формируются полости, поры и микропустоты. Затем подача сжатого воздуха прекращается и через пневмогидробур в образовавшиеся полости под давлением подаются непосредственно к корневой системе растений водные растворы гидрогеля, микробных биопрепаратов, удобрений.

Наиболее рациональным решением является разработанный и изготовленный на опытном заводе ВИМ роботизированный пневмогидробур (рис. 4). Модуль можно настроить на внутрпочвенный полив и подкормку определенных плодово-ягодных культур на больших площадях в любое время суток. Точное и аккуратное внесение воды, растворов, гидрогеля, удобрений снижает воздействие на почву и корни растений, сокращается время выполнения операции и увеличивается производительность.

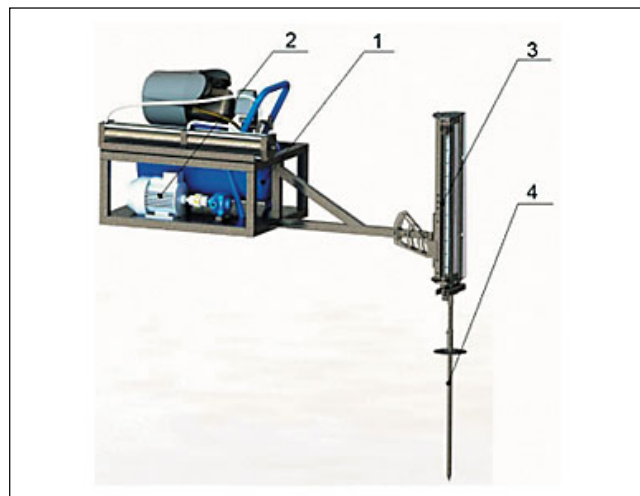


Рис. 4. Роботизированный модуль – пневмогидробур
Fig. 4. Robotic module, or the pneumo-hydraulic drill

При включении компрессора 1 воздух под давлением из ресивера посредством пневматических рукавов поступает по стреле с пневмоцилиндром и линейными направляющими 3 в одну из рабочих полостей пневмоцилиндра, что приводит к заглублению остроконечной трубы гидробура. Затем включается гидронасос 2 и по рукавам высокого давления рабочая жидкость поступает в остроконечную трубку 4 и далее в почву. Происходит про-

цесс прикорневого полива или подкормки. После окончания полива (подкормки) электродвигатель прекращает работу, включается компрессор и воздух под давлением поступает в другую область пневмоцилиндра, при этом остроконечная труба извлекается из почвы. Управление включением и отключением компрессора, а также электродвигателя насоса осуществляется электронным блоком управления с помощью датчиков, установленных в местах соединения гидравлических и пневматических рукавов.

На основании результатов лабораторных и полевых опытов установлены зависимости расхода и давления воздуха, воды или растворов от диаметра отверстий в наконечниках пневмогидробура и давления в системе. Эти зависимости имеют экспоненциальный характер и аппроксимируются в уравнение:

$$M_b = aebd,$$

где a , b – коэффициенты, определяются экспериментально; e – число Эйлера (2,718...); d – диаметр сопла.

При обработке результатов экспериментальных исследований получены зависимости расхода воды от диаметра сопла при различном давлении:

$$0,5 \text{ бара } M_b = 0,31e^{0,79d} (a = 0,31, b = 0,79);$$

$$1 \text{ бар } M_b = 0,42e^{0,768d} (a = 0,42, b = 0,768);$$

$$1,5 \text{ бара } M_b = 0,567e^{0,707d} (a = 0,567, b = 0,707);$$

$$2 \text{ бара } M_b = 0,68e^{0,67d} (a = 0,68, b = 0,67).$$

Обработка данных по расходу воздуха в зависимости от диаметра отверстия наконечника при различных величинах давления в системе позволила получить зависимость:

$$M_b = ad^2 - bd + g,$$

где a , b , g – постоянные коэффициенты.

$$\text{Для давления 1 бар: } M_b = 4,86d^2 - 11,06d + 8;$$

$$2 \text{ бара: } M_b = 7,21d^2 - 16,01d + 10,6;$$

$$3 \text{ бара: } M_b = 9,64d^2 - 21,24d + 13,4;$$

$$4 \text{ бара: } M_b = 11,93d^2 - 25,93d + 16,8.$$

В экспериментах в полевых условиях с применением универсальных пневмогидробуров при выращивании подвоев яблони и на виноградниках установлено, что наиболее эффективным режимом для внутрпочвенной конденсации является введение в корнеобитаемые слои почвы смеси воздуха и воды. Через двое суток влажность почвы на глубине 0,2, 0,4 и 0,6 м увеличилась соответственно на 13,1, 16,6 и 17,3%. Первоначальная подача сжатого воздуха обеспечила улучшение структуры почвы, расширение каналов, значительно увеличился коэффициент аэрации, а введение воды привело к увлажнению стенок каналов и пор, понижению температуры и увеличению влагосодержания почвы за счет конденсации.

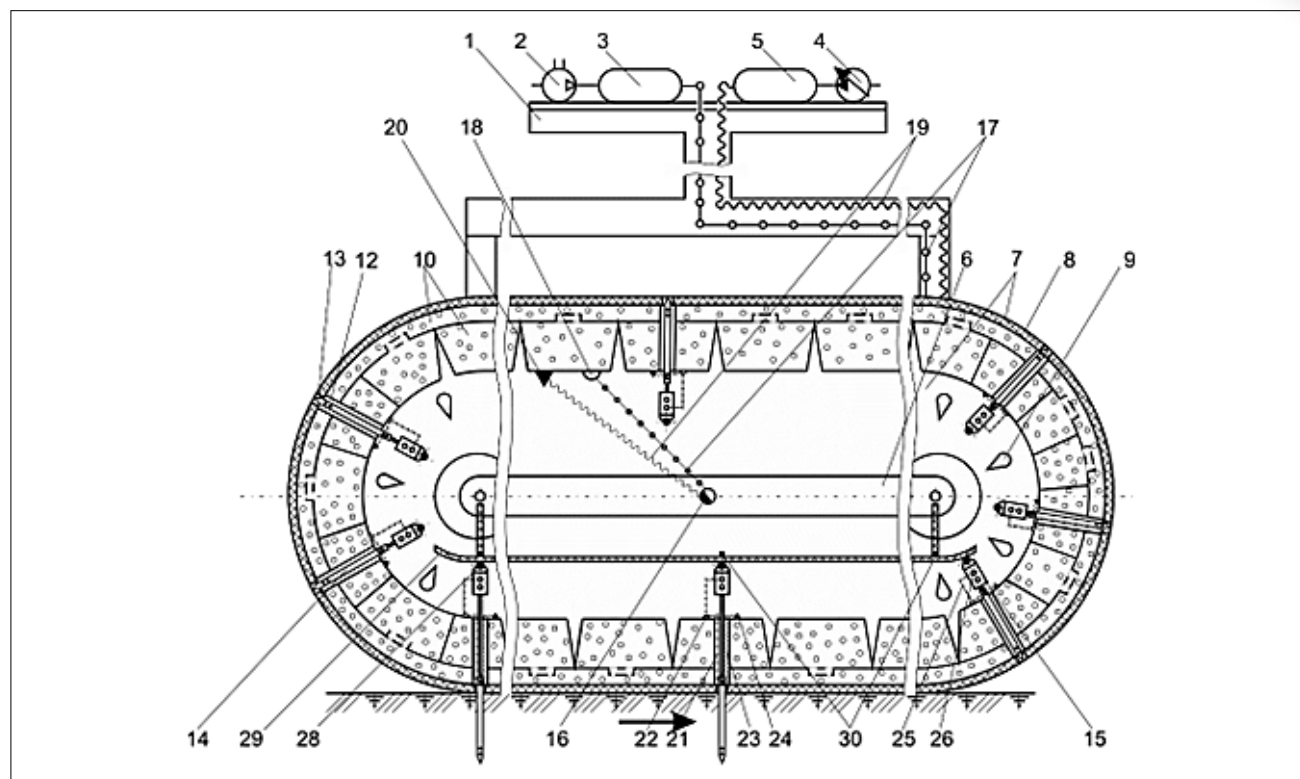


Рис. 5. Схема устройства для внутрипочвенной обработки, аэрации, орошения, удобрения корнеобитаемых слоев почвы (Патент RU2807342)

Fig. 5. Device for in-soil treatment, aeration, irrigation, and fertilization of root-occupied soil layers (Patent RU2807342)

Разработанный технологический процесс осуществляется с помощью устройства, схема которого представлена на рисунке 5.

На раме 1 с элементами навески установлены компрессор 2, ресивер 3, насос 4 и закрытые баки 5 с гидрогелем, растворами микробных биопрепаратов и/или удобрений. Снизу к раме шарнирно присоединены рамные элементы 6 с двигателем 7 в виде замкнутой сплошной эластичной ленты 8, внутри которой установлены поддерживающие колеса 9 с натяжителем ленты. Внутренняя поверхность ленты выполнена в виде гофрированных эластичных герметичных емкостей-распределителей сжатого воздуха 10 и растворов 11 (на схеме не показаны), между которыми размещены пазухи 12. Все герметичные емкости-распределители сжатого воздуха и растворов связаны между собой. По периметру в ленте равномерно выполнены отверстия 13, сопряженные с пазухами, в которых установлены пневмогидробуры 14, соединенные с пневмоцилиндрами 15.

В центре двигателя установлены регулятор-стабилизатор давления 16, который связывает шлангами 17 и электропневмоклапаном 18 ресивер 3 с емкостью-распределителем сжатого воздуха и закрытые баки 5 шлангами 19 и электропневмоклапаном 20 – с емкостями-распределителями растворов. Каждый пневмогидробур связан шлангами 21

и электропневмоклапаном 22 с емкостью-распределителем сжатого воздуха, а шлангами 23 и дополнительными электропневмоклапанами 24 – с емкостями-распределителями растворов 11. Каждый пневмоцилиндр связан шлангом 25 и электропневмоклапаном 26 с емкостью-распределителем сжатого воздуха и оснащен выключателем 27 (на схеме не показан) электропневмоклапана и роликом 28, взаимодействующим с жестко закрепленным в нижней части рамного элемента ограничителем нагрузки 29 на ленту. В начале, конце и в средней части ограничителя нагрузки установлены переключатели 30.

На краю поля двигатель опускают на поверхность почвы, включают подачу электроэнергии и электропневмоклапаны 26, открывают подачу сжатого воздуха по шлангам 25 из емкости-распределителя. Пневмоцилиндры погружают пневмогидробуры, находящиеся в нижней рабочей зоне ленты, вертикально в почву. При движении ленты очередной пневмоцилиндр достигает переключателя, цикл повторяется, погружая следующий пневмогидробур в почву.

При достижении нижней точки открывается электропневмоклапан 22 и по шлангам 21 через погруженные в почву пневмогидробуры подают в импульсном режиме сжатый воздух, что способствует аэрации корнеобитаемых слоев почвы, формированию почвенных пор, полостей и микропустот.

Когда пневмоцилиндр достигает средней части ограничителя нагрузки, очередной переключатель воздействует на выключатель, который открывает электромагнитный клапан 24 и по шлангам 23 через пневмогидробуры подает в образовавшиеся почвенные поры, полости и микропустоты растворы гидрогеля, микробных биопрепаратов и/или удобрений.

Лента, двигаясь, достигает точки подъема, выключатель очередного пневмоцилиндра взаимодействует с переключателем, подача сжатого воздуха и растворов прекращается, пневмогидробуры поднимают, извлекают из почвы и размещают в пазухах.

В процессе обработки давление сжатого воздуха и растворов в емкостях распределителях падает. При достижении критического уровня открывается электроклапан, из ресивера по шлангам 17 регулятор-стабилизатор подает сжатый воздух в емкость-распределитель до достижения соответствующего давления. В емкостях-распределителях раствора открываются электропневмоклапаны 20, из закрытых баков по шлангам 19 через регулятор-стабилизатор подаются под давлением растворы до достижения соответствующего давления.

Длину пассивного движителя, глубину погружения пневмогидробуров в корнеобитаемые слои почвы, давление в емкостях-распределителях регулируют и устанавливают в зависимости от характеристики почвы и вида растений (толщины корнеобитаемого слоя). При работе с плотными почвами целесообразно использовать составной пневмогидробур со сменными стволами разного диаметра, а воду, растворы (удобрений и средств защиты растений) и сжатый воздух подавать как раздельно, так и одновременно. Агрохимикаты могут вноситься в почву поярусно (на разную глубину).

Предлагаемая природоподобная технология позволяет:

- формировать оптимальные условия для жизнедеятельности агроценозов (корнеобитаемые слои почвы не подвергаются механическому воздействию традиционных технических систем и средств);
- повысить продуктивность почвы, максимально сохранить ее биологические и экологические параметры при высоком качестве, мобильности и энергоэффективности процессов обработки.

В верхнем слое почвы формируется оптимальный воздушно-водный режим, что в полной мере соответствует естественному природному ресурсообороту растительно-почвенных микробных взаимодействий и обеспечивает реализацию системы экологически устойчивого растениеводства.

Установлено, что посадка виноградников с помощью пневмогидробура обходится в 4 раза дешевле, а приживаемость растений значительно выше. Достоверно установлена высокая эффективность

технологии посадки эфиромасличных культур с использованием пневмогидробура и гидрогеля [8].

Результаты исследований технологии внутрипочвенного минерального питания растений яблоны с использованием гидрогеля подтвердили эффективность его применения. Прирост центрального и боковых побегов увеличился соответственно на 25-30 и до 40% по сравнению с контролем.

Показатели продуктивности по урожайности и сбору эфирного масла лаванды узколистной сорта Синева первого года вегетации при внесении в зону корневой системы воды в смеси с воздухом в количестве 2 л на одно растение и 2 л гидрогеля под давлением 2 бара значительно превышают контроль. В варианте с внесением смеси воздуха и воды превышение над контролем по урожайности составило 14,8%, по сбору эфирного масла – на 68,5%. В варианте опыта с внесением гидрогеля превышение над контролем по урожайности составило 106,8%, по сбору эфирного масла – 154,9%.

Выводы. Большинство сельскохозяйственных угодий, прежде всего почв, оценивается как посредственное, плохое или очень плохое. Вследствие этого необходимы и целесообразны принципиально новые пути и методы трансформации технологических процессов и технических систем с интеграцией в природный ресурсооборот.

Сформированы концептуальные подходы по созданию природоподобных технологических процессов и технических систем в соответствии с современными представлениями о продукционных процессах в растениеводстве, симбиозе растений и микроорганизмов почвы, оценке факторов, влияющих на процессы деградации и эрозии плодородных слоев земли.

Главнейшая задача современной агротехники – крошение пласта различной толщины в разных условиях посредством клиньев всевозможной формы. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют, что именно такие процессы и технические системы оказывают наиболее значимое негативное влияние на земледелие в целом. Чем интенсивнее и чаще происходит поверхностная, механическая обработка почвы, тем масштабнее разрушительные воздействия фотохимических факторов на жизнедеятельность агроценозов, которые обеспечивают формирование плодородия почвы, накопление в ней гумуса.

Разработанные технологические процессы, технические системы и средства базируются на принципиально отличных от подходов земледельческой механики физических принципах, физиологических представлениях о продукционных процессах в растениеводстве, направлены на обеспечение оптимальных условий сохранения и развития агробиоценозов, сформировавшихся при возделывании

сельскохозяйственных культур в корнеобитаемых слоях почвы без их оборота и разрушения за счет внутрипочвенной обработки, рыхления, аэрации, создания полостей, микропустот импульсами сжатого воздуха посредством погружения в почву пневмогидробуров, последующего орошения, внесения удобрений, пестицидов, гидрогеля.

Получены эффективные практические результаты и дана положительная оценка возможности и целесообразности применения предлагаемых способов и устройств для внутрипочвенного рыхления, аэрации импульсами сжатого воздуха корнеобитаемых слоев почвы, последующего орошения, удобрения, внесения гидрогеля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грошева О.А. Развитие теоретических идей и практических приемов почвозащитного земледелия: отечественный и зарубежный опыт // *Успехи современного естествознания*. 2021. N11. С. 13-18. DOI: 10.17513/use.37706.
2. Бородычев В.В., Шевченко В.А., Лытов М.Н. Концептуальные подходы к оценке и выделению участков неиспользуемых земель для создания проектов органического сельского хозяйства // *Новые технологии*. 2020. Т. 16. N6. С. 58-69. DOI: 10.47370/2072-0920-16-6-58-69.
3. Михайлушкин П.В., Алиева А.П. Органическое земледелие – направление перехода к «зеленой» экономике России // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. N2 (374). С. 17-19. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12022.
4. Семиченко Е.В. Урожайность севооборотов в зависимости от приемов биологизации // *Аграрная наука*. 2021. N344 (1). С. 121-124. DOI: 10.32634/0869-8155-2021-344-1-121-124.
5. Новоселов С.И. Влияние фотохимического воздействия света на подвижность гумусовых веществ и свойств почвы // *Агрохимия*. 2021. N12. С. 37-41. DOI: 10.31857/50002188121120097.
6. Гладышева О.В., Свирина В.А., Артюхова О.А. Влияние разных по интенсивности приемов основной обработки оподзоленного чернозема на состояние плодородия и продуктивность культур // *Аграрная наука*. 2020. N7-8. С. 99-102. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-340-7-99-102.
7. Денисов К.Е., Полетаев И.С., Гераскина А.А. Влияние различных схем питания на урожайность яровой твердой пшеницы при разных способах основной обработки почвы // *Аграрный научный журнал*. 2022. N 5. С. 10-12. DOI: 10.28983/asjy2022i5pp10-12.
8. Мишуrow Н.П., Федоренко В.Ф., Аристов Э.Г. и др. Результаты исследований подпочвенного орошения многолетних эфиромасличных культур с использованием гидрогеля // *Техника и оборудование для села*. 2022. N11. С. 11-15. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-11-11-15.
9. Черногаев В.Г., Свирина В.А. Сравнительный анализ эффективности применения различных способов обработки почвы в системе ресурсосберегающих технологий земледелия // *Аграрная наука*. 2020. N11-12. С. 105-107. DOI: 10.32634/0869-8155-2020-343-11-105-107.
10. Рзалиев А.С., Голобородько В.П., Чирков А.Г., Сопов Ю.В. Влияние различных способов обработки почвы на ее агрофизические показатели // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2013. N12. С. 105-109. EDN: RTFEVD.
11. Пуртова Л.Н., Шапова Л.Н., Полохин О.В. Влияние различных способов обработки почвы и норм внесения удобрений на гумусное состояние и микрофлору агрогенных почв Приморья // *Научное обозрение. Биологические науки*. 2017. N5. С. 23-27. EDN: YMWCID.
12. Ялалетдинов Д.А., Рахимов И.Р., Куликова А.П. и др. Моделирование процессов рыхления почвы сжатым воздухом // *Челябинский физико-математический журнал*. 2024. Т. 9. Вып. 1. С. 160-168. DOI: 10.47475/2500-0101-2024-9-1-160-168.
13. Feklistova P. Optimization of composition of complex biopreparations for plants yield increasing. *Biologically Active Preparations for Plant Growing*. 2020. 189-191. EDN: PPNBAA.
14. Jin H., Zhong Y., Shi D. et al. Quantifying the impact of tillage measures on the cultivated-layer soil quality in the red soil hilly region: Establishing the thresholds of the minimum data set. *Ecological Indicators*. 2021. 130:1080 i 3. DOI: 10.1016/ecolind.2021.108013.
15. Young M.D., Ros G., deVries W. Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021. 319:107551. DOI: 10.1016/j.agee.2021.107551.
16. He J., Li H., Wang X. et al. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil and Tillage Research*. 2007. 94(2).493-502. DOI: 10.1016/j.still.2006.10.005.

REFERENCES

1. Grosheva O.A. Development of theoretical ideas and practical methods of soil-protective agriculture: domestic and foreign experience. *Successes of Modern Natural Science*. 2021. N11. 13-18 (In Russian). DOI: 10.17513/use.37706.
2. Borodychev V.V., Shevchenko V.A., Lytov M.N. Conceptual approaches to assessment and allocation of unused lands for organic agriculture projects. *New Technologies (Majkop)*. 2020. Vol. 16. N6. 58-69 (In Russian). DOI:

- 10.47370/2072-0920-16-6-58-69.
3. Mikhaylushkin P.V., Alieva A.R. Organic agriculture — direction of transition to the green economy in Russia. *International Agricultural Journal*. 2020. N2 (374). 17-19 (In Russian). DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12022.
4. Semichenko E.V. Crop rotation yield depending on from the receptions of biologization. *Agrarian Science*. 2021. N344 (1). 121-124 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2021-344-1-121-124.
5. Novoselov S.I. Effect of photochemical exposure light on the mobility of humus substances and soil properties. *Agrohimia*. 2021. N12. 37-41 (In Russian). DOI: 10.31857/50002188121120097.
6. Gladysheva O.V., Svirina V.A., Artyukhova O.A. Influence of different intensity methods of basic processing of podzolized chernozem on the state of fertility and productivity of crops. *Agrarian Science*. 2020. N7-8. 99-102 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2020-340-7-99-102.
7. Denisov K.E., Poletaev I.S., Geraskina A.A. The influence of different nutrition schemes on the yield of spring durum wheat with different methods of basic tillage. *Agrarian Scientific Journal*. 2022. N5. 10-12 (In Russian). DOI: 10.28983/asjy2022i5pp10-12.
8. Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Aristov E.G. et al. Results of studies of subsoil irrigation of perennial essential oil crops using hydrogel. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N11. 11-15 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-11-11-15.
9. Chernogaev V.G., Svirina V.A. Comparative analysis of the efficiency of application of different methods of tillage in the system of resource-saving agriculture technologies. *Agrarian Science*. 2020. N11-12. 105-107 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2020-343-11-105-107.
10. Rzaev A.S., Goloborodko V.P., Chirkov A.G. Effect of different soil cultivation on its agrophysical performance. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2013. N12. 105-109 (In Russian). EDN: RTFEVD.
11. Purtova L.N., Shchapova L.N. Polokhin O.V. Influence of various methods of soil treatment and norm of fertilization on humus state and microflora of agricultural soils of the Primorsky territory. *Scientific Review. Biological Sciences*. 2017. N5. 23-27 (In Russian). EDN: YMWCID.
12. Yalaletdinov D.A., Rahimov I.R., Kulikova A.P. et al. Simulation of soil loosening processes with compressed air. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*. 2024. T. 9. N1. 160-168 (In Russian). DOI: 10.47475/2500-0101-2024-9-1-160-168.
13. Feklistova P. Optimization of composition of complex biopreparations for plants yield increasing. *Biologically Active Preparations for Plant Growing*. 2020. 189-191 (In English). EDN: PPNBAA.
14. Jin H., Zhong Y., Shi D. et al. Quantifying the impact of tillage measures on the cultivated-layer soil quality in the red soil hilly region: Establishing the thresholds of the minimum data set. *Ecological Indicators*. 2021. 130:108013 (In English). DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108013.
15. Young M.D., Ros G., de Vries W. Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021.319:107551. DOI: 10.1016/j.agee.2021.107551.
16. He J., Li H., Wang X. et al. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil and Tillage Research*. 2007. 94(2). 493-502 (In English). DOI: 10.1016/j.still.2006.10.005.

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

01.06.2024
30.08.2024

EDN: IELMLB

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-49-55



Научная статья

УДК 631.171



Подтверждение адекватности вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке

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

Станислав Александрович Герасименко,
младший научный сотрудник,
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com;
Сергей Игоревич Борзенко,
младший научный сотрудник,
e-mail: serzhbk@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. При математическом моделировании процесса сепарации в гравитационной колонке зачастую не учитывается коэффициент вибрации прутков при движении семян и примеси по криволинейной поверхности гравитационной гребенки. Это, в свою очередь, влияет на качество разделения. Важно отметить, что коэффициент вибрации напрямую зависит от конструктивных параметров прутков гребенки в гравитационной колонке. (*Цель исследования*) Экспериментальное подтверждение теоретических результатов вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке. (*Материалы и методы*) Для лабораторных исследований разработан макетный образец гравитационной колонки с единичной гребенкой. Определяли эффективную длину прутков гребенки, диаметр сечения прутка, угол наклона гребенки. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что из условия самоочищаемости гребенок коэффициент сепарации составляет $\mu = 3,6$ метра в минус первой степени. При вибрации прутков функции изгибающего момента со значениями вертикальных и горизонтальных коэффициентов $a = -30$, $b = -31,9$ и $\tilde{a} = -0,58$, $\tilde{b} = -1,47$ паскаля в минус первой степени на метр в минус первой степени достигается довольно высокая статистическая корреляция между разработанной математической моделью и экспериментальными значениями (коэффициент детерминации 0,96). Определены эффективная длина прутков в диапазоне от 125 до 150 миллиметров гребенки, диаметр сечения прутков 1,5 миллиметра. (*Выводы*) Экспериментально подтверждены результаты вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке. Дальнейшие пути интенсификации процесса сепарации направлены на поиск нового конструктивного решения формы прутков гребенки.

Ключевые слова: семена сои, очистка семян, сортировка семян, сепарация семян, гравитационная колонка, вероятностная математическая модель.

■ **Для цитирования:** Хамуев В.Г., Герасименко С.А., Борзенко С.И. Подтверждение адекватности вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 49-55. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-49-55. EDN: IELMLB.

Scientific article

Validation of a Probabilistic Mathematical Model for Soybean Seed Separation in a Gravity Column

Viktor G. Khamuev,
Ph.D.(Eng), leading researcher,
e-mail: victor250476@yandex.ru;
Stanislav A. Gerasimenko,
junior researcher,
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com;

Sergey I. Borzenko
junior researcher,
e-mail: serzhbk@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. In mathematical models of the separation process in a gravity column, the coefficient of bar vibration is frequently disregarded as seeds and impurities move along the curved surface of the gravity column, which, in turn, affects the quality of separation. It is important to note that the vibration coefficient directly depends on the design parameters of the comb bars in the

gravity column. (*Research purpose*) The research aims to experimentally validate the theoretical findings from a probabilistic mathematical model elucidating the process of soybean seed separation within a gravity column. (*Materials and methods*) For laboratory research, a gravity column prototype with a single comb was developed. Parameters such as the effective length of the comb bars, the cross-sectional diameter of the bar, and the comb angle inclination were determined. (*Results and discussion*) It was found out that, under the condition of self-cleaning combs, the separation coefficient $\mu = 3.6$ meters to the power of negative one. During bar vibration, the functions of the bending moment with vertical coefficients $a = -30$, $b = -31.9$, and horizontal coefficients $\tilde{a} = -0.58$, $\tilde{b} = -1.47$ Pascal to the power of negative one per meter to the power of negative one, yield a fairly high statistical correlation between the developed mathematical model and experimental values (coefficient of determination 0.96). The effective length of the bars was determined to be within the range from 125 to 150 millimeters of the comb, with a cross-sectional diameter of the bars measuring 1.5 millimeters. (*Conclusions*) Experimental validation of the probabilistic mathematical model regarding the process of soybean seed separation in the gravity column was conducted. Further ways to intensify the separation process are aimed at finding a new design solution for the shape of the comb bars.

Keywords: soybean seeds, seed cleaning, seed sorting, seed separation, gravity column, probabilistic mathematical model.

■ **For citation:** Khamuev V.G., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I. Validation of a probabilistic mathematical model for soybean seed separation in a gravity column. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 49-55 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-49-55. EDN: IELMLB.

Актуальным в сельскохозяйственном производстве является разработка способов повышения качества и уменьшения потерь семян в процессе послеуборочной обработки [1], в частности при сепарации. При математическом моделировании процесса сепарации в гравитационной колонке зачастую не учитывается коэффициент вибрации прутков при движении семян и примеси по криволинейной поверхности гравитационной гребенки [2]. Это обстоятельство в свою очередь влияет на качество разделения исходного материала [3, 4]. Важно отметить, что коэффициент вибрации прутков напрямую зависит от конструктивных параметров прутков гребенки в гравитационной колонке [5, 6].

Цель исследования – сравнение теоретических и экспериментальных результатов вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке.

Материалы и методы. Исследования проводили в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Для проведения опыта была разработана лабораторная установка гравитационной колонки прямоугольного сечения 84×345 мм высотой 600 мм с единичной гребенкой (рис. 1). Три стенки колонки изготовлены из ДСП, а четвертая из прозрачного органического стекла для наблюдения за процессом сепарации. Гребенка представляет собой консольно-закрепленные с одной стороны на общей поверхности в ряд металлические прутки. На раме из стальных уголков крепятся приемный бункер, а в нижней части колонки установлено устройство для вывода фракций. На приемном бункере объемом 5 дм^3 имеется заслонка для регулировки подачи материала в колонку.

Исходный материал самотеком движется вниз по гребенке. Частицы, размер которых $z < w - d$ (рис. 2), проходят через зазоры между прутками и выводят-

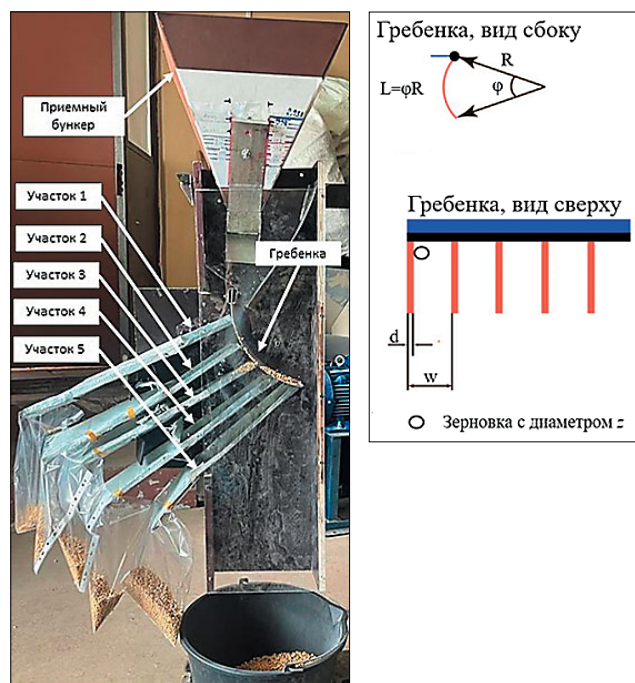


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки с гравитационной гребенкой для сепарации семян (слева); вид гребенки и прутка (справа)

Fig. 1. General view of the experimental installation with a gravity comb (left); view of the comb and a single bar (right)

ся в фракцию «проход», а крупные размером $z > w - d$, скользя по гребенке, опускаются в приемник материала (фракция «сход»).

Длина прутков гребенки L влияет на качество разделения по толщине частиц. Расстояние на конце гребенки относительно ее верхней части между прутками увеличивается под давлением движущегося материала. По этой причине гребенка условно разделена на пять равных участков, под каждым установлен контейнер для оценки качества разде-

ления по всей длине прутков в зависимости от их длины и толщины (диаметра сечения), угла наклона гребенки и производительности.

В гравитационную колонку устанавливали поочередно гребенки с зазорами 4 и 6 мм, прутки диаметром сечения 1, 2, 3 мм, также в опытах варьировали наклон гребенки 0° (минимальный), 20° (средний), 40° (максимальный) и удельную зерновую нагрузку 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч). Площадь сепарирующей (рабочей) поверхности гребенок 215 см², длина прутков 253 мм.

Качество разделения оценивали по показателю полноты выделения ϵ [7]. Для этого массу, накопленную в каждом из пяти участков фракции «проход» при каждом варианте опыта, взвешивали на лабораторных весах [8], разделяли с помощью лабораторных решет с продолговатыми отверстиями. Далее составляли системы уравнений и вычисляли методом наименьших квадратов наиболее подходящие эмпирические коэффициенты [9, 10]. Продолговатые отверстия 4 мм в решетке соответствовали зазору между прутками гребенки 4 мм, в решетке с отверстиями 6 мм – зазору 6 мм.

Пробу исходного материала сои массой 5 кг предварительно разделяли на решетке с продолговатыми отверстиями 4 и 6 мм. Массы фракций «сход» и «проход» взвешивали на лабораторных весах. Масса «схода» на решетке 4 мм составила 4455,8 г, «прохода» – 554,2 г, на решетке 6 мм соответственно 254,3 и 4745,7 г.

Гребенку с зазором 4 мм и диаметром сечения прутка 1 мм устанавливали под углом 0° и засыпали исходный материал в колонку при удельной зерновой нагрузке 2,32 кг/(см²·ч). Затем накопленный в каждом из пяти контейнеров материал пропускали через решетку с отверстиями 4 мм, чтобы определить полноту выделения материала на каждом участке гребенки.

Далее материал смешивали, засыпали в колонку, увеличивали зерновую нагрузку до 7,61 кг/(см²·ч) и накопленный в каждом контейнере снова материал пропускали через решетку 4 мм. Снова смешивали, засыпали в колонку при нагрузке 11,95 кг/(см²·ч) и материал из каждого контейнера пропускали через решетку 4 мм.

Аналогично, при наклоне гребенки 20° пропускали материал при нагрузках 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч), подсчитывали полученные фракции, смешивали, подавали в колонку при наклоне гребенки 40° и пропускали материал при трех режимах нагрузки. Устанавливали гребенку с зазором 6 мм и диаметром прутка 1 мм, повторяли опыт при углах наклона гребенки 0, 20, 40° и нагрузках 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч) соответственно.

Устанавливали гребенку с зазором 4 мм и диаметром прутка 2 мм повторяли опыт при углах на-

клона гребенки 0, 20, 40° и нагрузках 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч) соответственно. Используя гребенку с зазором 6 мм и диаметром прутка 2 мм, повторяли опыт при углах наклона гребенки 0, 20, 40° и удельной зерновой нагрузке 2,32, 7,61 и 11,95 кг/(см²·ч).

Далее устанавливали гребенку с зазором 4 мм и диаметром прутка 3 мм и повторяли опыт при наклоне гребенки 0, 20, 40° и нагрузке 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч) соответственно. Так же повторяли опыт при гребенке с зазором между прутьями сечением 6 мм (рис. 2).

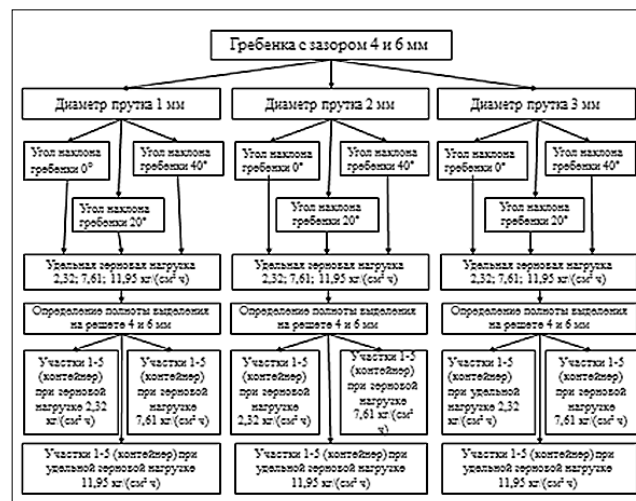


Рис. 2. Схема опытов при гребенке с зазором между прутьями 4 и 6 мм

Fig. 2. Diagram of experiments with combs having gaps of 4 and 6 mm

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В проведенном ранее исследовании [11] при разработке вероятностной математической модели было получено неравенство (1), в котором обратный переход в неравенство (2) происходит при стремлении жесткости на изгиб к бесконечности [12].

$$\left(1 - \left(\frac{w-d-z}{w}\right) \left(1 - e^{-\left(\mu(L-z) + \frac{a(L-z)^4}{4EJL} + \frac{b(L-z)^5}{5EJL^2}\right)}\right)\right)^N < \delta, (1)$$

$$\left(1 - \left(\frac{w-d-z}{w}\right) (1 - e^{-\mu L_{эфф}})\right)^N < \delta. (2)$$

Для условия (1) эмпирические параметры (μ , a , b) были найдены при натурном эксперименте с одиночной гребенкой длиной $L = 0,25$ м. Через каждые отрезки 0,025 м (фактически $L_{i+1} - L_i$, где $i = 1-9$) вдоль длины гребенки собирали просеявшийся (прошедший через гребенку) материал. При этом расстояние между прутками гребенки было 0,004 м, диаметр прутка $d = 0,002$ м (период $w = 0,006$ м). Гребенка была изготовлена из стали 65Г (модуль нормальной упругости E выбран равным 215 ГПа), по форме прутья гребенки представляли собой дугу окружности [13]. Схематично вид сбоку конструк-

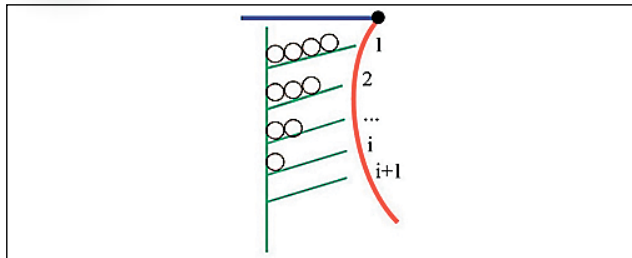


Рис. 3. Схема гребенки (вид сбоку)

Fig. 3. Side view of a single comb

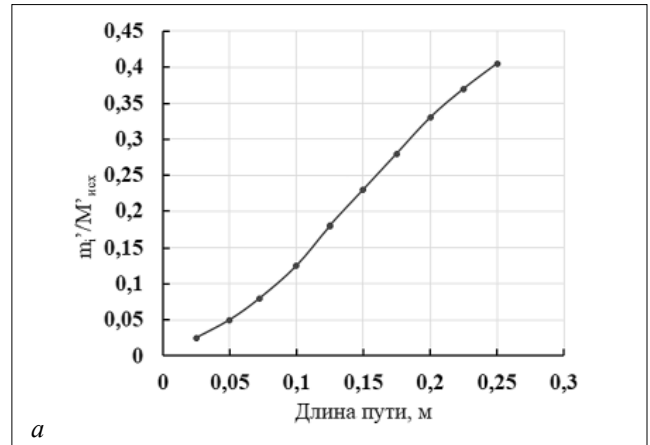
ции изображен на рисунке 3. Красным цветом отмечена гребенка, фиолетовым – консольное закрепление, зеленым – схематическое представление контейнеров для сборки просеянного, черные круги – просеянный материал. Нумерация отрезков 1, 2, i , $i+1$ соответствует нумерации контейнеров.

Следует отметить, что в просеянном материале были как мелкие примеси, так и семена сои. Относительное число семян увеличивалось по мере приближения к свободному краю прутка, что может являться следствием все большего увеличения амплитуды колебаний прутьев гребенки [14, 15]. Это требует отдельного модельного рассмотрения уменьшения числа примесей (характерный размер от 0 до 0,003 м со средним значением около 0,0015 м) и числа зерен (размер 0,004-0,008 м со средним значением 0,006 м). Дополнительное просеивание через решетку с калибровочными отверстиями тестовой исходной массы $M_{исх} = 3,107$ кг позволило определить исходную массу примеси ($M'_{исх} = 0,146$ кг) и оставшуюся исходную массу зерен ($M''_{исх} = 2,962$ кг). После этого подсчитывали накопившую массу просеявшейся примеси (m'_i) и просеявшегося зерна (m''_i) при прохождении расстояния (отрезков) по гребенке по отношению к исходным массам $M'_{исх}$ и $M''_{исх}$, т.е. $m'_i/M'_{исх}$ и $m''_i/M''_{исх}$ (рис. 4).

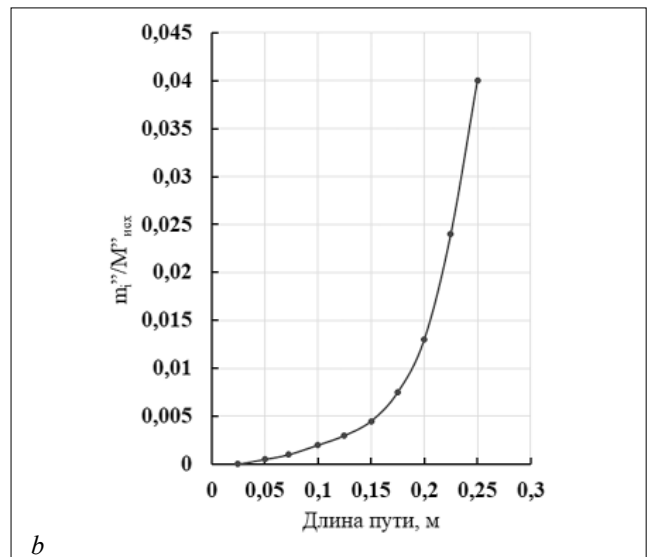
Как видно, зависимость изменения $m'_i/M'_{исх}$ от длины пройденного пути близка к прямой, но вблизи краев отмечаются наибольшие отклонения (рис. 4а). При этом точка перегиба располагается около 0,13-0,14 м, а после нее происходит изменение выпуклости функции, что соответствует началу уменьшения скорости просеивания примеси: до точки перегиба производная функции (скорость просеивания примеси) растет, после нее начинает уменьшаться [16].

Для сопоставления с модельным подходом была рассмотрена преобразованная зависимость, происходящая из зависимости при $N = 1$ с учетом равенства (1), а также того, что $L - z \approx L$:

$$m'_i/M'_{исх} = P_x P_y = \left(\frac{w-d-z}{w} \right) \times \left(1 - e^{\left(-\mu(L_i) + \frac{a(L_i)^4}{4EJL} + \frac{b(L_i)^5}{5EJL^2} \right)} \right), \quad (3)$$



а



б

Рис. 4. Зависимость накопившейся зерновой массы от длины пройденного пути: а – просеявшейся примеси $m'_i/M'_{исх}$; б – просеявшегося зерна $m''_i/M''_{исх}$

Fig. 4. Dependence of the accumulated grain mass on the length of the traveled path: а – sifted impurity $m'_i/M'_{исх}$; б – sifted grain $m''_i/M''_{исх}$

$$\ln \left(1 - \frac{m'_i}{M'_{исх}} \left(\frac{w}{w-d-z} \right) \right) = -\mu(L_i) + \frac{a(L_i)^4}{4EJL} + \frac{b(L_i)^5}{5EJL^2}. \quad (4)$$

Введем условные обозначения для левой и правой частей соответственно:

$$LP = \ln \left(1 - \frac{m'_i}{M'_{исх}} \left(\frac{w}{w-d-z} \right) \right);$$

$$RP = -\mu(L_i) + \frac{a(L_i)^4}{4EJL} + \frac{b(L_i)^5}{5EJL^2}.$$

На рисунке 5 представлено сравнение экспериментальных данных с аппроксимированной полиномиальной зависимостью вида RP с подобранными методом наименьших квадратов параметрами a и b .

Зависимость LP от длины пути L_i имеет нелинейный характер. Диапазон линейности отмечает-

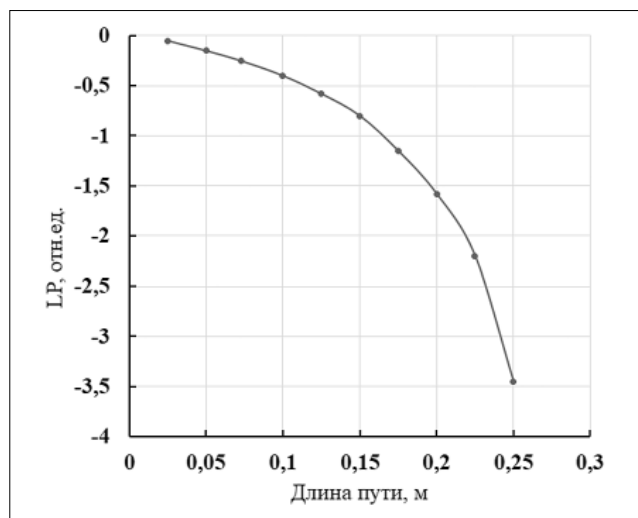


Рис. 5. Зависимость величины $LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}} \left(\frac{w}{w-d-z}\right)\right)$ от длины пути L_i

Fig. 5. The dependence of $LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}} \left(\frac{w}{w-d-z}\right)\right)$ on the path length L_i

ся примерно до 0,14 м. После начинаются существенные отклонения, которые, по-видимому, связаны с нарастающим влиянием колебаний решет (отклонение от статического случая, который соответствует линейной зависимости).

При этом значения определенных величин параметров $\mu = 3,6 \text{ м}^{-1}$, $a = -30 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $b = -31,9 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Достигается довольно хорошая статистическая корреляция между предсказываемым теорией зависимостью вида (4) и экспериментальными значениями, что подтверждается близким к единице значением скорректированного коэффициента детерминации, равным 0,96.

Как упоминалось выше, помимо просеивания примеси по мере удаления от точки закрепления гребенки из-за нарастающей амплитуды колебаний прутков отмечалось также просеивание зерен. Это является негативным фактором, приводящим к потере зерна [17]. Выбор оптимальных параметров установки, прежде всего за счет длины гребенки, может снизить такого рода потери. На рисунке 4б резкое увеличение начинается после 0,125-0,15 м. Качественно схожим образом с примесями можно объяснить и данную зависимость $(m_i''/M''_{исх}(L_i))$. Для этого по аналогии рассмотрим изменение массы по мере прохождения вдоль прутка. Считая, что в статическом варианте прохода сквозь прутья решетки не должно быть, будем рассматривать изменение массы зерен только зависящими от амплитуды колебаний, что приводит к уравнению:

$$dM = M \left(\frac{1}{EJ} \left(\frac{\tilde{a}L^2}{1} \left(\frac{y}{L} \right)^3 + \frac{\tilde{b}L^2}{2} \left(\frac{y}{L} \right)^4 \right) \right) dy. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (5), получаем величину массы зерна, которая остается на гребенке

$$M = M_0 e^{\left(\frac{\tilde{a}y^4}{4EJL} + \frac{\tilde{b}y^5}{5EJL^2} \right)}, \text{ где } y \in (0, L). \quad (6)$$

Соответственно доля просеявшегося зерна $m_i''/M''_{исх}$, попадающего в первые контейнеры i за путь L_i

$$\begin{aligned} m_i''/M''_{исх}(L_i) &= P = (1 - M/M_0) = \\ &= 1 - e^{\left(\frac{\tilde{a}(L_i)^4}{4EJL} + \frac{\tilde{b}(L_i)^5}{5EJL^2} \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Как и в случае примеси для проверки эта зависимость модифицирована в следующий вид:

$$LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}}\right) = \frac{\tilde{a}(L_i)^4}{4EJL} + \frac{\tilde{b}(L_i)^5}{5EJL^2}. \quad (8)$$

Представленная на рисунке 6 зависимость имеет явно выраженный нелинейный характер и хорошо согласуется с зависимостью вида

$$\frac{\tilde{a}(L_i)^4}{4EJL} + \frac{\tilde{b}(L_i)^5}{5EJL^2}.$$

Диапазон слабого отклонения от нуля по оси ординат простирается примерно до 0,125 м. После 0,15 м начинаются существенные отклонения, связанные, по-видимому, с нарастающим влиянием колебаний решет (отклонение от статического случая, который соответствует линейной зависимости).

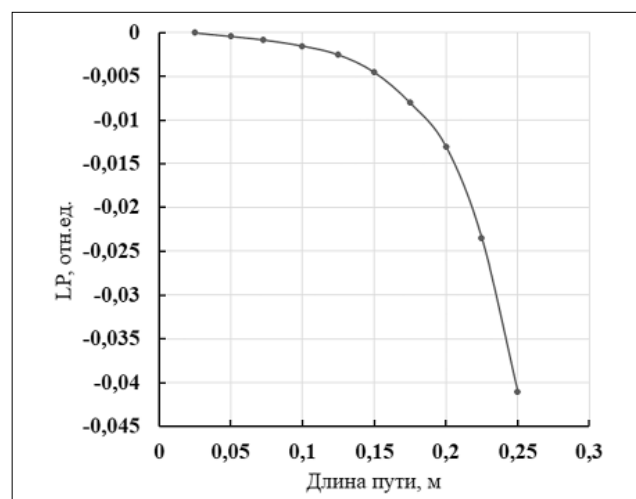


Рис. 6. Зависимость величины $LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}}\right)$ от длины пути L_i

Fig. 6. Dependence of the value $LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}}\right)$ on the path length L_i

Выводы. Данный подход к определению оптимальных параметров гравитационной колонки позволяет учитывать нарастающую амплитуду колебаний прутков как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении в нижней части рабочей поверхности гребенки. Определена эффективная длина изготовленной из стали 65Г прутков гребенки в диапазоне от 125 до 150 мм при оптимальном диаметре сечения 1,5 мм. Значения определенных величин параметров $\mu = 3,6 \text{ м}^{-1}$, $a = -3053 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, b

$= -31,9 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\tilde{a} = -0,58 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\tilde{b} = -1,47 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. При этом достигается довольно хорошая статистическая корреляция между предсказываемым теорией зависимостью и экспериментальными значениями, что подтверждается близким к единице значением скорректированного коэффициента детерминации, равным 0,96.

Дальнейшие пути интенсификации процесса сепарации направлены на новое конструктивное решение формы прутков гребенки, при которых процесс сепарации и калибровки семян будет осуществляться не только по их толщине, но также длине, ширине и другим формам семян.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
- Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Интенсивные машинные технологии и техника нового поколения для производства основных групп сельскохозяйственной продукции // *Техника и оборудование для села*. 2017. N7. С. 2-6. EDN: ZBMMSL.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве (окончание) // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4 (298). С. 2-6. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
- Спирина Н.Г., Попов А.Е., Шацкий В.П. О форме решет гравитационных сепараторов // *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2016. N1-4. С. 125-128. EDN: VKNGOP.
- Леканов С.В., Стрикунов Н.И., Куницын Р.А. Совершенствование технологии очистки семян зерновых и технических культур // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2021. N7 (201). С. 110-116. EDN: BWLLBP.
- Krzysiak Z., Samociuk W., Skic A. et al. Effect of sieve drum inclination angle on wheat grain cleaning in a novel rotary clear. *Transactions of the ASABE*. 2020. N60 (5). 1751-1758. DOI: 10.13031/trans.12110.
- Gievskiy A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P. et al. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2017. N327 (4). 042035. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042035.
- Малюков С.В., Князев А.В., Аксенов А.А. и др. Обзор конструкций машин для обескряливания, очистки и сортировки семян // *Воронежский научно-технический вестник*. 2019. Т. 2. N2 (28). С. 61-72. EDN: VUMXUB.
- Кабашов В.Ю., Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г. Экспериментальное исследование зерноочистительной машины с решетным станом продольно-поперечного колебания // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2019. N2 (50). С. 115-120. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-115-120.
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Разработка вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2023. N4(72). С. 555-566. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-56.
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Обоснование основных параметров гравитационной колонки при очистке семян сои // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2022. N3(67). С. 574-583. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-65.
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы гравитационно-пневматического очистителя семян сои // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N3. С. 27-32. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-27-32.
- Zhe Qu, Qi Lu, Haihao Shao et al. Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester. *Agriculture*. 2024. 14. DOI: 671. 10.3390/agriculture14050671.
- Ефимов Д.С., Кротова О.Е., Челбин С.М. Сравнительная эффективность аспирационного оборудования при пылезашите элеваторных комплексов вместимостью 20000 тонн // *Современная наука и инновации*. 2022. N3(39). С. 128-139. DOI: 10.37493/2307-910X.2022.3.11.
- Panasiewicz M., Mazur J., Zawislak K., Kulig R., Łysiak G. the process of separation of husked soybean in oblique airflow. *Sustainability*. 2020. 12. 7566. DOI: 10.3390/su12187566.
- Галкин В.Д., Хандриков В.А., Федосеев А.Ф. и др. Исследование процесса разделения семян на пневмосортировальном столе с усовершенствованным рабочим процессом // *Пермский аграрный вестник*. 2023. N1(41). С. 4-12. DOI: 10.47737/2307-2873_2023_41_4.
- Badredtinov I., Mudarisov S., Tuktarov M. et al. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. 17. 529-534. DOI: 10.5937/jaes17-22640.

REFERENCES

- Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
- Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Intensive machine

- technologies and new generation machinery for manufacturing main groups of agricultural produce. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017. N7. 2-6 (In Russian). EDN: ZBMMSL.
3. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogenov Yu.Kh. The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N 4 (298). 2-6 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
 4. Spirina N.G., Popov A.E., Shatsky V.P. On the shape of gravity separator sieves. *Modern Trends in the Development of Science and Technology*. 2016. N1-4. 125-128 (In Russian). EDN: VKNGOP.
 5. Lekanov S.V., Strikunov N.I., Kunitsyn R.A. Improving the technology of cleaning seeds of grain and industrial crops. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2021. N7 (201). 110-116 (In Russian). EDN: BWLLBP.
 6. Krzysiak Z., Samociuk W., Skic A. et al. Effect of sieve drum inclination angle on wheat grain cleaning in a novel rotary clear. *Transactions of the ASABE*. 2020. N60 (5). 1751-1758 (In English). DOI: 10.13031/trans.12110.
 7. Giyevskiy A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Chernyshov A.V., Kurilov D.O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2017. N327 (4). 042035 (In English). DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042035.
 8. Malyukov S.V., Knyazev A.V., Aksenov A.A. et al. Design review of machines for de-spraying, cleaning and sorting of seeds. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2019. Vol. 2. No. 2 (28). 61-72 (In Russian). EDN: VUMXUB.
 9. Kabashov V., Tuktarov M., Baynazarov V. Experimental study of grain cleaner with a longitudinal-transverse vibration sieve pan. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2019. N2 (50). 115-120 (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-115-120.
 10. Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Development of a probabilistic mathematical model of the soybean seed separation process in a gravity column. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023. 4(72). 555-566 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-56.
 11. Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Substantiation of the main parameters of a gravity column when cleaning soybean seeds. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2022. N3(67). 574-583 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-65.
 12. Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Substantiation of the design and layout scheme for the gravity-pneumatic soybean seed cleaner. *Agricultural Machinery and Technology*. 2022. Vol. 16. N3. 27-32 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-27-32.
 13. Zhe Qu, Qi Lu, Haihao Shao et al. Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester. *Agriculture*. 2024. 14. 671 (In English). DOI: 10.3390/agriculture14050671.
 14. Efimov D.S., Krotova O.E., Chelbin S.M. et al. The comparative efficiency of aspiration equipment for dust protection of elevator complexes with a capacity of 20,000 tons. *Modern Science and Innovations*. 2022. N3(39). 128-139 (In Russian). DOI: 10.37493/2307-910X.2022.3.11.
 15. Panasiewicz M., Mazur J., Zawi'slak K. et al. The process of separation of husked soybean in oblique airflow. *Sustainability*. 2020. N12. 7566 (In English). DOI: 10.3390/sul2187566.
 16. Galkin V.D., Khandrikov V.A., Fedoseev A.F. et al. Investigation of the seed separation process on a pneumatic sorting table with an improved workflow. *Perm Agrarian Journal*. 2023. N1 (41). 4-12 (In Russian). DOI: 10.47737/2307-2873_2023_41_4.
 17. Badretdinov I., Mudarisov S., Tuktarov M., Dick E., Arslanbekova S. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. 17. 529-534 (In English). DOI: 10.5937/jaes17-22640.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Хамуев В.Г. – научное руководство, обобщение данных литературы, итоговая переработка статьи;
 Герасименко С.А. – проведение опыта, обработка данных опыта, составление начального варианта статьи, литературный анализ, формирование общих выводов, доработка текста;
 Борзенко С.И. – проведение опыта, литературный анализ.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант

Coauthors' contribution:

Khamuev V.G. – scientific supervision, literature review, final revision of the manuscript;
 Gerasimenko S.A. – conducting the experiment, processing experimental data, drafting the manuscript, literature review, formulation of general conclusions, manuscript revision;
 Borzenko S.I. – conducting the experiment, literature review.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2024

27.05.2024



Особенности технологии посева семян на лентах и жгутах

Алексей Викторович Подзоров¹, Людмила Сергеевна Шибряева^{1,2}, Михаил Евгеньевич Чаплыгин¹,
научный сотрудник, доктор химических наук, кандидат технических наук,
e-mail: alexvp900@yandex.ru; ведущий научный сотрудник, ведущий научный сотрудник,
e-mail: lyudmila.shibryaeva@yandex.ru; e-mail: misha2728@yandex.ru

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

²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим преимущества посева семян в ленте (жгуте): точное соблюдение заданной нормы высева, оптимизация внесения удобрений и химических веществ, быстрый переход при высеве от культуры к культуре (от сорта к сорту). Положительный эффект технологии наблюдается в отношении практически всех сельскохозяйственных культур. (*Цель исследования*) Проследить историю появления и применения семенных лент (жгутов), их конструктивные особенности и технологии производства. (*Материалы и методы*) Работа выполнена на основе историко-аналитического метода. Исследовались публикации в научных журналах, документы патентных баз Espacenet и Федерального института промышленной собственности, фотоматериалы. (*Результаты и обсуждение*) Приведена информация о появлении первых носителей семян в виде жгутов, разработке и развитии данной технологии посева, использовании семенных лент, наиболее популярных в настоящее время. Универсальные или комбинированные ленты и жгуты могут быть носителями наряду с семенами удобрений, пестицидов, гербицидов, других веществ в разных сочетаниях. Рассмотрены изобретения за период 1898-2023 годов, относящиеся к видам и способам изготовления семенных лент и жгутов, предложенные в разных странах. (*Выводы*) Отличия семенных лент и жгутов заключаются главным образом в механизации их изготовления. Носителем семян может быть практически любой биоразлагаемый материал – бумага, полотно из растительных волокон, полимеры или другие. При изготовлении лент необходимо обеспечивать минимальное травмирование семян. Проведенный авторами анализ позволил сформулировать принципы подбора биodeградируемых полимерных материалов для технологии проращивания семян в семенной ленте (жгуте). Это высокие диффузионные параметры, набухаемость, обеспечение баланса между реакциями биоразложения лент и биохимическими реакциями в клетках растений.

Ключевые слова: семена, технология посева, семенной жгут, семенная лента, биоразлагаемые полимеры, альтернативные носители, инновационные сельскохозяйственные материалы.

■ **Для цитирования:** Подзоров А.В., Шибряева Л.С., Чаплыгин М.Е. Особенности технологии посева семян на лентах и жгутах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 56-62. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-56-62. EDN: IYIUWE.

Scientific article

Specific Characteristics of Seed Tape and Seed Rope Planting

Aleksey V. Podzorov¹,
researcher,
e-mail: alexvp900@yandex.ru;

Lyudmila S. Shibryaeva^{1,2},
Dr.Sc.(Chem.), leading researcher,
e-mail: lyudmila.shibryaeva@yandex.ru;

Mikhail E. Chaplygin¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: misha2728@yandex.ru

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

²Emanuel Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences (IBCP RAS), Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights the benefits of using seed tape planting technology, which include reduced seeding rate, optimized application of fertilizers and chemicals, and the ability to quickly switch between different crops or seed varieties. This technology shows positive effects on nearly all agricultural crops. (*Research purpose*) The study aims to explore the history of the emergence and application of seed tapes (seed ropes) for planting, detailing their design features and production technologies. (*Materials and methods*) The research employs a historical-analytical method, examining scientific publications, patent databases, such as

Espacenet and the Federal Institute of Industrial Property, as well as photographic materials. (*Results and discussion*) The paper provides information on the origin of the first seed carriers which were flexible holding strips of paper or similar material that enclosed seeds. It covers the development and advancement of this planting technology, highlighting the use of currently most popular seed tapes. Universal or combined tapes and twisted seed strands can serve as carriers of fertilizers, pesticides, herbicides, and other substances in various combinations, in addition to seeds themselves. The paper reviews inventions related to the types and manufacturing methods of seed tapes and seed ropes proposed in different countries from 1898 to 2023. (*Conclusions*) The differences between seed tapes and seed ropes primarily lie in the mechanization of their production. The seed carrier can be made from various biodegradable materials, such as paper, plant fiber cloth, polymers or others. When manufacturing these tapes, it is necessary to minimize seed damage. The present research results in the formulation of principles for selecting biodegradable polymeric materials for seed tape planting technology. These principles include high diffusion rates, swelling properties, and maintaining a balance between tape biodegradation and biochemical reactions in plant cells.

Keywords: seeds, planting technology, seed ropes, seed tapes, biodegradable polymers, alternative seed carriers, innovative agricultural materials.

■ **For citation:** Podzorov A.V., Shibryaeva L.S., Chaplygin M.E. Specific characteristics of seed tape and seed rope planting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 56-62 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-56-62. EDN: IYIUWE.

Семенной материал относится к важнейшим ресурсам, используемым в сельскохозяйственном производстве. Обеспечение нормы высева – главный показатель качества посевных работ и рационального использования посевного материала. В конце XIX века были предприняты первые попытки создать систему, обеспечивающую фиксированную норму высева семян, с которых зародилась технология посева на ленте. В основном для этого применялись жгуты (трубки) и ленты из природных водоразлагаемых материалов, таких как конопляное и льняное волокно, целлюлоза (бумага). С тех пор технологии и приемы семеноводства активно развиваются и пополняются за счет новых научных исследований и практических разработок [1, 2].

Цель исследования. Проследить историю развития и технологии производства семенных жгутов и лент.

Материалы и методы. Работа выполнена на основе литературных и иных источников информации с использованием историко-аналитического метода. Исследовали работы отечественных и зарубежных авторов: статьи в научных журналах, монографии, материалы конференций, фотоматериалы, патентные документы международной патентной базы Espacenet и патентной базы Федерального института промышленной собственности (ФИПС).

Результаты и обсуждение. Ленты как носитель семян не так популярны из-за особенностей технологии их изготовления и подготовки к посеву. Из-за достаточно высоких затрат не каждый сельхозпроизводитель готов применять такой способ. Однако значительное снижение нормы высева, точное и точечное дозирование семян, возможность быстрой смены культуры (сорта) при посеве дают положи-

тельный эффект в овощеводстве и селекции. Кроме того, современные «универсальные» или «комбинированные» ленты и жгуты позволяют одновременно с семенами вносить удобрения, пестициды, гербициды, другие добавки или их композиции.

Первоначально для фиксирования отдельных семян применялись жгуты. Семенной жгут имеет простую конструкцию, вариантов его изготовления было предложено немного и, как правило, длительное время они практически не изменялись.

Первые способы размещения семян на биоразлагаемом материале были запатентованы в США. В 1898 г. Л.Дж. Дженкинс запатентовал «Метод посева семян» (патент *US614002*). Семенной жгут, сотканный из нитей, напоминал чулок (*рис. 1а*). Также автор изобретения предлагал объединить жгуты в полотно для покрытия засеваемой площади. Семена могли располагаться как произвольно, так и в геометрическом порядке.

В 1907 г. Р.К. Израэль предложил использовать для семенного жгута скрученную полосу бумаги (патент *US851171*). Этот простой и достаточно эффективный способ (*рис. 1б*) был взят за основу многими изобретателями, отличались жгуты лишь по материалу и способу изготовления.

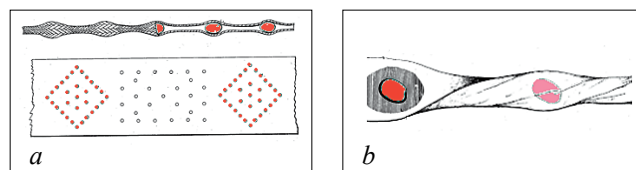


Рис. 1. Первые семенные жгуты: а – метод посева семян Л.Дж. Дженкинса; б – средство для посадки семян Р.К. Израэля (<https://ru-i.espacenet.com>)

Fig. 1. First seed planting means: a – L.J. Jenkins' tubular casing method; b – R.C. Israel's seed carrying strips (<https://ru-i.espacenet.com>)

В изобретении Альберта С. Фичера в 1944 г. «Желатинизированный семенной канат» (патент *US2338103*) носитель семян представлял собой скорее не классический жгут, а многослойную трубку (рис. 2). В такой конструкции центральный шнур или бечевка 1 заключен в коллоидную оболочку 2, на которой с определенным интервалом расположены семена 3. При этом семена могут свободно прорасти во всех направлениях. Следующий слой коллоидной оболочки 4 содержит удобрения, а внешняя оболочка 5 – инсектицид либо другое средство от вредителей. Технология производства этого носителя напоминает приготовление чурчхелы: центральный жгут последовательно погружают в соответствующие растворы, при подсыхании образуются слои различной структуры и назначения.

Оригинальный способ получения носителя се-

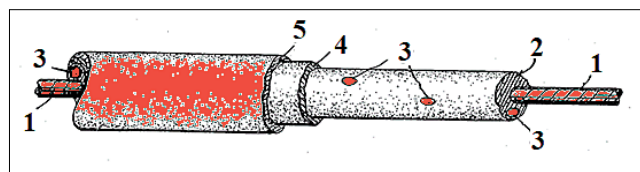


Рис. 2. Желатинизированный семенной канат Альберта С. Фичера (<https://ru-i.espacenet.com>)

Fig. 2. Albert C. Fischer's gelatinized seed bearing cord (<https://ru-i.espacenet.com>)

мян в 1971 г. предложил Масаказу Накаяма (патент *US3623266*). Лента-носитель семян больше похожа на трубку (рис. 3). Способ ее получения механизирован и предусматривает пропускание сложенной ленты 1 с семенами 2 сквозь вращающуюся бобину 3, на которой закреплены катушки 4 с ниткой. Вращаясь вместе с бобиной, катушки обматывают и стягивают нитками 5 сложенную ленту с семенами, формируя подобие трубки 6. Нитки, как и лента, из разлагаемого материала предотвращают раскрытие ленты, не препятствуя прорастанию семян.

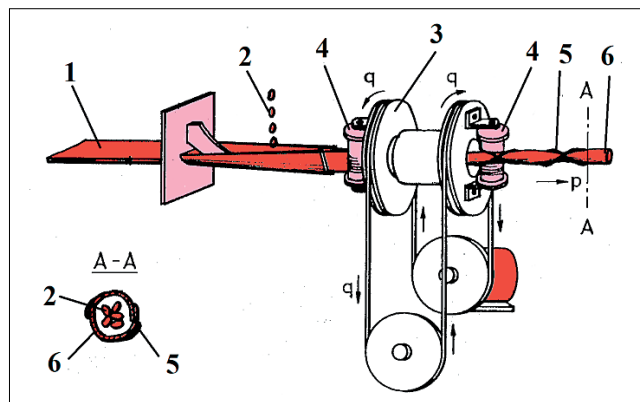


Рис. 3. Высеваящая лента Масаказу Накаямы (<https://ru-i.espacenet.com>)

Fig. 3. Seed tape invented by Masakazu Nakayama (<https://ru-i.espacenet.com>)

В 1983 г. В.А. Бахмутов и В.А. Любич предложили способ изготовления семенных лент (патент *SU986312*) наподобие классического крученого жгута 1 (рис. 4). Особенность заключалась в том, что в механизированной установке лента 2 с заложенными в нее семенами 3 скручивалась при проходе через вращающуюся полую втулку 4 с трубкой и специальным приспособлением 5 и наматывалась послойно на катушку 6. За счет плотного скручивания предотвращается раскрытие жгута при дальнейшей работе без использования дополнительных средств фиксации семян.

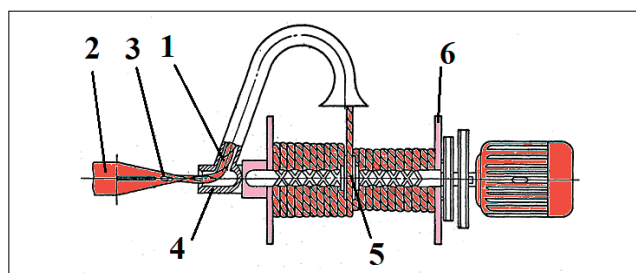


Рис. 4. Способ изготовления семенных лент В.А.Бахмутова и В.А.Любича (<https://patents.su>)

Fig. 4. The method of seed tape production invented by V.A. Bakhmutov and V.A. Lyubich (<https://patents.su>)

Параллельно с семенными жгутами развивались семенные ленты, и на определенном этапе они заняли лидирующее положение. Первые семенные ленты появились в начале XX века. Рассмотрим некоторые из них.

Лента для упаковки семян была разработана в 1915 г. Эдвардом и Дэвидом Грей (патент *US1160279*). В центре волокнистой влагопроницаемой ленты 1 клеем 2 закреплялись семена 3 (рис. 5). В первом варианте сверху к ленте приклеивается второй слой такой же ленты, во втором – лента сворачивается вдвое и край склеивается, в третьем – края ленты складываются внахлест и склеиваются. Во всех случаях внутрь ленты закладывается армирующая нить 4.

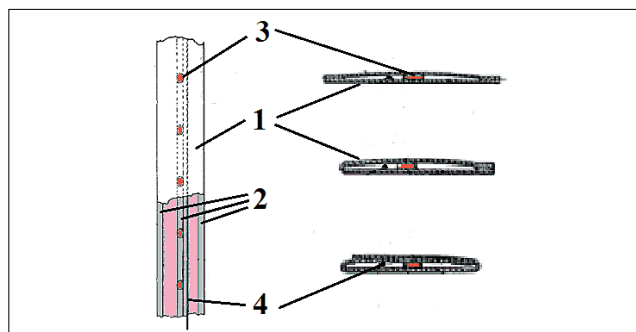


Рис. 5. Семенная упаковка Эдварда и Дэвида Грей (<https://patents.google.com>)

Fig. 5. Seed package invented by Edward and David Gray (<https://patents.google.com>)

С развитием методов ленточного посева и механизации появлялись новые типы и технологии производства лент. Одним из примеров механизированной промышленной установки по производству семенных лент можно привести изобретение Клода Лефевра, относящееся к 1955 г. (патент *FR1098668*). Процесс изготовления ленты включает несколько этапов (рис. 6): нанесение порции клея 1 на основную ленту 2, подача семян 3 из лотка 4 в бункер 5, устройство подачи бсемян на основную ленту из бункера 5, сброс 7 неприсоединенных семян в лоток 4 и приклеивание закрывающей ленты 8. При необходимости на ленте можно расположить несколько семенных дорожек, а сами ленты пропитать средствами защиты от вредителей.

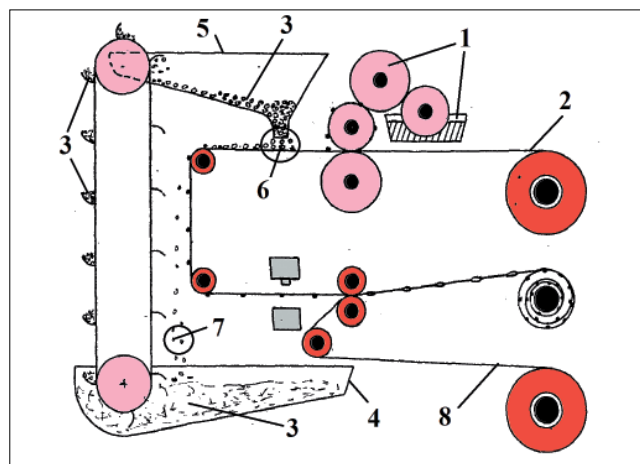


Рис. 6. Улучшение посева технических и овощных семян Клода Лефевра (<https://ru-i.espacenet.com>)

Fig. 6. Improvements to the sowing of industrial and vegetable seeds invented by Claude Lefebvre (<https://ru-i.espacenet.com>)

В 1961 г. коллективом авторов под руководством Пола И. Хансена было создано полотно для выращивания трав (патент *US2976646*). Особенность изобретения заключается в том, что сложенные ленты с семенами пропитываются наносимым под давлением водорастворимым клеем. После этого полотно высушивается на специальном транспортере. Ширина ленты и количество семян устанавливаются по необходимости.

Примером «универсальной» ленты служит изобретение в 1986 г. под руководством Л.И. Бирюкова (патент *SU1209059*). Лента для посева семян (рис. 7а) состоит из двух полос 1 из водовпитывающего материала, наружные поверхности которых покрыты смесью 2, состоящей из жидкого или порошкообразного гербицида с водорастворимым клеем. Внутренние поверхности полос склеены между собой и с семенами 3 смесью 4 удобрения с водорастворимым клеем. Семена внутри полос с определенным интервалом расположены по осевой линии ленты и на нее последовательно наносятся удобрения, семена и гербициды.

На механическом устройстве (рис. 7б) на полосу материала 1, поступающего с рулона 5, валиком 6 наносят смесь 4 и укладывателем 7 распределяют семена. Поступающие с рулонов 5 и 9 полосы склеиваются с помощью валиков 8, и на их наружные поверхности наносится гербицидная смесь 2. После сушильной камеры 10 лента сматывается в рулон 11 и хранится до посева.

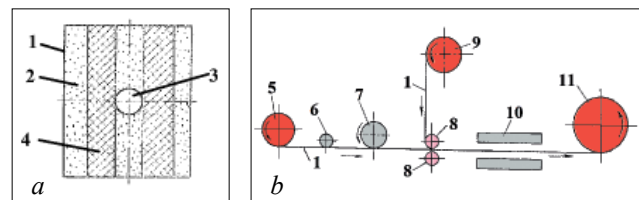


Рис. 7. Лента для посева семян Л.И. Бирюкова: а – семенная лента в разрезе, б – схема установки для создания семенной ленты (<https://patents.su>)

Fig. 7. Seed panting tape by L.I Biryukov: a – a sectional view of the seed tape; b – a diagram of the device for seed tape production (<https://patents.su>)

При тщательном рассмотрении представленных выше изобретений можно отметить, что во многих из них вызывает затруднение возможность обеспечить равномерность расположения семян по длине ленты. Кроме того, рядом могут оказаться несколько семян, что нежелательно для их развития при прорастании. Решая эту проблему, Джоэл Кудрио и Жан-Марк Ланшье в 1999 г. разработали способ и устройство для сеялок точного высева прямого внесения с заглаживанием (патент *EP0953280*). Основным элементом установки является полый диск (барaban) 1, внутри которого создается вакуум (рис. 8).

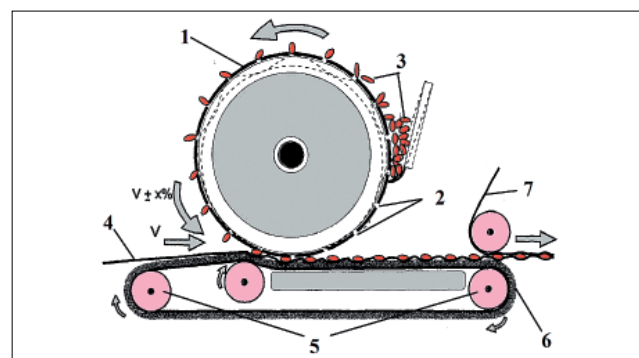


Рис. 8. Способ и устройство для сеялок точного высева прямого внесения с заглаживанием Джоэла Кудрио и Жан-Марка Ланшье (<https://patents.google.com>)

Fig. 8. Method and device for precise sowing by direct application and smoothing invented by Joel Coudrieau and Jean-Marc Lanchier (<https://patents.google.com>)

На поверхности диска с установленным шагом расположены отверстия 2, и к ним за счет разряжения внутри диска прикрепляются семена 3 таким

образом, чтобы одно отверстие соответствовало одному семени. Диск вращается и сбрасывает в определенный момент (за счет внутренней конструкции диска) семена на ленту 4 и одновременно вдавливают в нее семена. Лента 4 располагается на конвейере 5 с мягкой подложкой 6, и при вдавлении семян образуются углубления, не позволяя семенам скатываться. В конце конвейера 5 накладывается покрывная лента 7. За счет прикрепления друг к другу ленты образуют единый носитель семян.

Похожую систему с вакуумным диском для точной подачи семян (в данном случае гранулированных) в 2011 г. продемонстрировала при производстве семенной водорастворимой ленты словацкая фирма *SEDOS* (рис. 9). Используется одна лента, которая после подачи семян сворачивается пополам и склеивается (спаивается), запечатывая семена. В некоторых вариантах исполнения ленты семена чередуются с гранулированными удобрениями.



Рис. 9. Производство семенной ленты на фирме *SEDOS* (<https://www.sedos.sk>)

Fig. 9. Seed tape production at *SEDOS* (<https://www.sedos.sk>)

Для японской сеялки *TSA-7* компания из Воротнежа ООО «Ньютехагро» предлагает специальные семенные ленты (рис. 10а) [3]. Для их производства используются два основных вида материала: водорастворимая лента *Holceron* (рис. 10б) или биоразлагаемый нетканый материал *Meshron* (рис. 10с). Водорастворимая лента для предотвращения обрывов усилена биоразлагаемой нитью.

Многие из представленных носителей семян позиционируются как универсальные или комбинированные. Выбор доз внесения любых химических веществ очень важен. Передозировка негативно сказывается на развитии культурных растений и состоянии почвы. Во избежание таких проблем перед созданием «универсального» семенного носителя необходимо ознакомиться с профильной литературой и правильно рассчитать дозы химических компонентов [4, 5].

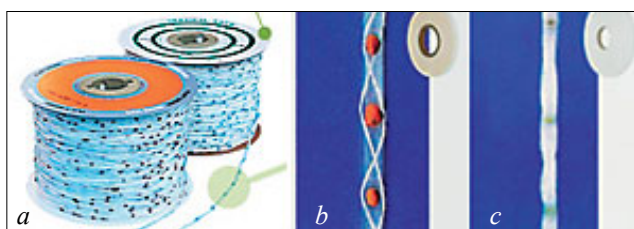


Рис. 10. Семенные ленты для сеялки *TSA-7*: а – семенные ленты; б – водорастворимая лента *Holceron*; с – биоразлагаемый нетканый материал *Meshron* (<https://seialka.ru>)
Fig. 10. Seed tapes for *TSA-7* seeders: а – special seed tapes; б – water-soluble *Holceron* tape; с – biodegradable non-woven *Meshron* tape (<https://seialka.ru>)

На наш взгляд, в России уделяется недостаточное внимание технологии посева семян на ленте. Вместе с тем ее перспективы и возможности очень широки [6]. Современная наука позволяет создавать безопасные для окружающей среды материалы, которые можно использовать в массовом производстве семенных носителей [7, 8].

Все больше для упаковки семян применяют биodeградируемые полилактиды (ПЛА), полигидроксibuтираты (ПГБ) и их композиции [9]. Преимущество таких материалов заключается в их способности стимулировать прорастание, рост и развитие растений в результате образования при биоразложении углекислого газа и воды с выделением тепла.

На рисунке 11 представлены варианты лент на основе полимеров, разработанных в 2023 г. в Институте биохимической физики им. Н.М. Эммануэля. Проведенные в ИБХФ им. Н.М. Эммануэля совместно с лабораторией ФНАЦ ВИМ исследования показали, что эффективность развития семян в основном зависит от структуры материала ленты. Структура определяет скорость подачи воды, питательных веществ, тепла к семени и зародышу. Разработанные образцы носителей семян из ПЛА, ПГБ и их композиций созданы в виде лент из нетканого материала или тонких прессованных пленок толщиной 80-120 мкм [10]. Нетканый материал изготовлен из нановолокон, полученных методом электроформования [11, 12], и отличается высокой пористостью.

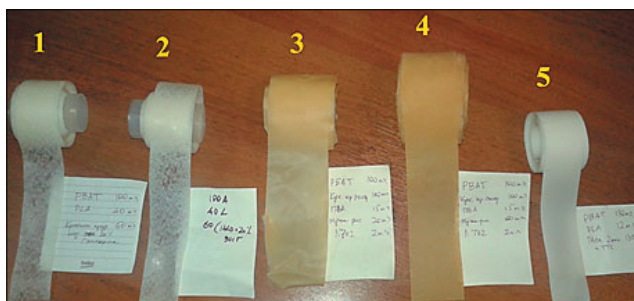


Рис. 11. Семенные ленты на основе биodeградируемых полимеров

Fig. 11. Seed tapes based on biodegradable polymers

Для создания материалов были использованы полимеры: полигидроксibuтират (ПГБ), синтезированный микробиологическим методом производства фирмы *Biomer* (Германия); полилактид (ПЛА) и полибутенадипинаттерефталат (ПБАТ) производства «СК Сибур», (Россия); сополимер этилена и винилацетата (СЭВА) производства «Руспласт» (Россия).

Композиции для лент, содержащих полимерные модификаторы, изготавливали путем смешивания компонентов на экструдере с щелевой головкой, формирующей ленты необходимого размера и толщины. Условия смешивания и температурные режимы предусматривали равномерное распределение компонентов и отсутствие процесса термодеструкции [11, 13]. При этом состав композиций варьировался, чтобы получить физико-механические параметры, необходимые для технологических режимов посадки семян на ленте [14].

Выводы. Каждый представленный в исследовании тип семенной ленты или жгута имеет право на существование. Изготовление жгута, как правило, связано со скручиванием материала, в который помещены се-

мена. Семенная лента состоит из двух склеенных (спаянных) слоев с семенами между ними. Отличия наблюдаются лишь в предлагаемом способе механизации процесса изготовления. Основным требованием при изготовлении носителей должно быть минимальное травмирование семян. Также необходимо соблюдать условия хранения семенной ленты (жгута).

Рассмотренные материалы и методы изготовления семенных лент и жгутов, анализ факторов, определяющих эффективность работы полимерных пленок, проведенный в ИБХФ им. Н.М. Эмануэля совместно с ФНАЦ ВИМ в 2021-2023 гг., позволили сформулировать принципы подбора биodeградируемых полимерных материалов для технологии проращивания семян в семенной ленте (жгуте). К этим принципам относятся: высокие показатели диффузии и набухаемости, обеспечивающие подачу влаги к прорастающему семени. Помимо этого, энергия разложения полимерного материала должна быть такого уровня, чтобы обеспечивать баланс между реакциями деструкции полимера и биохимическими реакциями в клетках растений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Несмиян А.Ю., Ценч Ю.С. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 45-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52.
2. Ценч Ю.С., Несмиян А.Ю., Хомутова Н.С. История развития конструкции высевальных аппаратов зерновых сеялок // *Вопросы истории естествознания и техники*. 2020. Т. 41. N1. С. 102-117. DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
3. Zhang B., Liu D., Xi X. et al. The analysis on the applications of crop seed tape sowing technology and equipment: A Review. *Applied Sciences*. 2021. N11. 11228. DOI: 10.3390/app112311228.
4. Вильданов Ф.Ш., Латыпова Ф.Н., Красуцкий П.А., Чанышев Р.Р. Биоразлагаемые полимеры – современное состояние и перспективы использования // *Бакинский химический журнал*. 2012. Т. 19. N1. С. 135-139. EDN: NLJRBV.
5. Yeo J.C.C., Muiruri J.K., Thitsartarn W. et al. Recent advances in the development of biodegradable phb-based toughening materials: approaches, advantages and applications. *Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 92. 1092-1116. DOI: 10.1016/j.msec.2017.11.006.
6. Тертышная Ю.В., Шибряева Л.С. Биоразлагаемые полимеры: перспективы их масштабного применения в промышленности России // *Экология и промышленность России*. 2015. Т. 19. N8. С. 20-25. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-8-20-25.
7. Kumar R., Yakubu M.K., Anandjiwala R.D. Biodegradation of flax fiber reinforced poly lactic acid. *Express Polymer Letters*. 2010. Vol. 4. N7. 423-430. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2010.53.
8. Шибряева Л.С., Тертышная Ю.В., Пальмина Д.Д., Левина Н.С. Биodeградируемые полимеры как материалы для высевания семян зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N6. С. 14-18. EDN: VBETEZ.
9. Tertysnaya Y., Zakharov M., Ivanitskikh A., Popov A. Impact of environmental agents on non-woven polylactide/natural rubber agrofibre. *E3S Web*. 2021. 285. 07034. DOI: 10.1051/e3sconf/202128507034.
10. Millington S.M. Research for alternative material and its effect on seed germination in seed tapes products. (Thesis). University of the West of England. Bristol. UK. 2018. 101. <https://uwe-repository.worktribe.com/output/863239>.
11. Tertysnaya Y., Shibryaeva L., Olkhov A. Thermal oxidation and degradation of poly-3-hydroxybutyrate nonwoven materials. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2015. Vol. 9. N3. 498-503. DOI: 10.1134/S1990793115030112.
12. Ольхов А.А., Склянчук Е.Д., Аббасов Т.А. и др. Регенерационный потенциал нановолоконного сухожильного имплантата из полигидроксibuтирата // *Технологии живых систем*. 2015. Т. 12. N2. С. 3-11. EDN: UAHCVT.
13. Кочеткова В.А., Сафиева Р.З., Ольхов А.А., Станишевский Я.М. Ультраволокнистые биополимерные материалы на основе полилактида и озонида // *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина*. 2024. N1(314). С. 98-107. EDN : WUNSSZ.
14. Thompson A.A., Samuelson M.B., Kadoma I. et al. Degradation rate of bio-based agricultural mulch is influenced by mulch composition and biostimulant application. *Journal of Polymers and the Environment*. 2019. N27. 498-509. DOI: 10.1007/s10924-019-01371-9.

REFERENCES

1. Nesmiyan A.Yu., Tsench Yu.S. Tendencies and prospects for the development of domestic machinery for sowing grain crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 45-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-45-52.
2. Tsench Yu., Nesmiyan A., Khomutova N. The history of development of seed-feeding devices on grain drills. *Studies in the History of Science and Technology*. 2020. Vol. 41. N1. 102-117 (In Russian). DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
3. Zhang B., Liu D., Xi X. et al. The analysis on the applications of crop seed tape sowing technology and equipment: A Review. *Applied Sciences*. 2021. N11. 11228 (In English). DOI: 10.3390/app112311228.
4. Vildanov F.Sh., Latypova F.N., Krasutskii P.A., Chanyshiev R.R. Biodecomposed polymers – a current state and use prospects. *Bashkir Chemistry Journal*. 2012. Vol. 19. N1. 135-139 (In Russian). EDN: NLJRBV.
5. Yeo J.C.C., Muiruri J.K., Thitsartarn W. et al. Recent advances in the development of biodegradable PHB-based toughening materials: approaches, advantages and applications. *Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 92. 1092-1116 (In English). DOI: 10.1016/j.msec.2017.11.006.
6. Tertyshnaya Yu., Shibryaeva L. Biodegradable polymers: prospects of their large-scale application in industry of Russia. *Ecology and Industry of Russia*. 2015. Vol. 19. N8. 20-25 (In Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2015-8-20-25.
7. Kumar R., Yakubu M.K., Anandjiwala R.D. Biodegradation of flax fiber reinforced poly lactic acid. *Express Polymer Letters*. 2010. Vol. 4. N7. 423-430 (In English). DOI: 10.3144/expresspolymlett.2010.53.
8. Shibryaeva L.S., Tertyshnaya Yu.V., Pal'mina D.D., Levi-na N.S. Biodegraded polymers as materials for sowing of grain crops seeds. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N6. 14-18 (In Russian). EDN: VBETEZ.
9. Tertyshnaya Y., Zakharov M., Ivanitskikh A., Popov A. Impact of environmental agents on non-woven polylactide/natural rubber agrofiber. *E3S Web*. 2021. 285. 07034 (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202128507034.
10. Millington S.M. Research for alternative material and its effect on seed germination in seed tapes products. (Thesis). University of the West of England. Bristol. UK. 2018. 101 (In English). <https://uwe-repository.worktribe.com/output/863239>.
11. Tertyshnaya Yu., Shibryaeva L., Olkhov A. Thermal oxidation and degradation of poly-3-hydroxybutyrate nonwoven materials. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2015. Vol. 9. N3. 498-503 (In English). DOI: 10.1134/S1990793115030112.
12. Ol'khov A.A., Sklyanchuk E.D., Abbasov T.A. et al. Regeneration potential of a new tendon implant made of polyhydroxybutyrate nanofibres. *Technologies of Living Systems*. 2015. Vol. 12. N2. 3-11 (In Russian). EDN: UAHCVT.
13. Kochetkova V.A., Safieva R.Z., Olkhov A.A., Stanishevsky Ya.M. Ultrafibre biopolymer materials based on polylactide and ozonide. *Proceedings of Gubkin University*. 2024. N1(314). 98-107 (In Russian). EDN: WUNSSZ.
14. Thompson A.A., Samuelson M.B., Kadoma I. et al. Degradation rate of bio-based agricultural mulch is influenced by mulch composition and biostimulant application. *Journal of Polymers and the Environment*. 2019. N27. 498-509 (In English). DOI: 10.1007/s10924-019-01371-9.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Подзоров А.В. – поиск аналитических материалов в отечественных и зарубежных источниках, первичный анализ полученных данных, подготовка текста, визуализация материалов;
 Шибряева Л.С. – научное руководство, формулирование направления, цели и задачи исследования, анализ и доработка текста, формирование общих выводов;
 Чаплыгин М.Е. – участие в критическом анализе данных, обобщении и описании результатов, формирование общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Podzorov A.V. – reviewing domestic and foreign analytical publications, primary analysis of the obtained data, manuscript preparation, visualization of materials;
 Shibryaeva L.S. – scientific supervision, formulation of the direction, goals and objectives of the study, analysis and revision of the manuscript, formulating general conclusions;
 Chaplygin M.E. – data analysis, generalization and description of the results, formulating general conclusions.

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

01.06.2024

15.08.2024

EDN: FNNREO

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-63-74



Научная статья

УДК 631.171



Численное моделирование защитного опрыскивания беспилотными воздушными судами вертолетного типа

Валерий Павлович Асовский¹,
доктор технических наук, ученый секретарь,
e-mail: asovsky@panh.ru;

Алла Сергеевна Кузьменко²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: all7212@mail.ru

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

²Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация

Реферат. Показали общие перспективы использования беспилотных воздушных судов для внесения пестицидов и агрохимикатов. Отметим актуальные проблемы внедрения таких воздушных судов, в том числе создание и использование средств адекватного моделирования процессов и показателей внесения препаратов мультикоптерами, а также особенности выполненных исследований в этой области. (*Цель исследований*) Разработать и апробировать прикладные программные средства численного моделирования процессов и показателей защитного опрыскивания мультикоптерами сельскохозяйственных объектов. (*Материалы и методы*) Использовали научно-техническую информацию, экспериментальные данные, методы системного анализа, прикладной статистики, математического моделирования физических объектов и процессов, решения дифференциальных и интегральных уравнений для описания процессов с применением отработанных ранее методических подходов к изучению авиационного распределения веществ. (*Результаты и обсуждение*) Разработан расчетно-программный комплекс моделирования процессов и показателей опрыскивания мультикоптерами, представлена его укрупненная функциональная блок-схема. Показали особенности реализации основных блоков и модулей комплекса по моделированию индуктивного следа мультикоптера, осаждению капель, показателей внесения рабочих жидкостей и сплошной обработки участков. Подтвердили адекватность, достоверность и приемлемую точность результатов моделирования в сравнении с экспериментальными данными. Представили данные корреляционного и множественного регрессионного анализа полученного массива результатов многовариантного численного моделирования защитного опрыскивания на примере гексакоптера *DJI Agras T20*. (*Выводы*) Подтвердили работоспособность и возможность использования разработанного и апробированного расчетно-программного комплекса численного моделирования защитного опрыскивания для решения научно-практических задач, связанных с внедрением мультикоптеров в агропроизводство. Определили качественные и количественные соотношения между отдельными параметрами и целевыми показателями защитного опрыскивания с мультикоптеров, а также значимые многопараметрические степенные регрессии для оценки целевых показателей опрыскивания.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, сельскохозяйственное производство, защитное опрыскивание, моделирование процессов, норма внесения, качество внесения, эффективность обработки.

■ **Для цитирования:** Асовский В.П., Кузьменко А.С. Численное моделирование защитного опрыскивания беспилотными воздушными судами вертолетного типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 63-74. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-63-74. EDN: FNNREO.

Scientific article

Numerical Simulation of Protective Spraying by Helicopter-Type Unmanned Aerial Vehicles

Valery P. Asovsky¹,
Dr.Sc.(Eng.), scientific secretary,
e-mail: asovsky@panh.ru;

Alla S. Kuzmenko²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: all7212@mail.ru

¹PANH Helicopters, Krasnodar, Russian Federation;

²Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

Abstract. The paper outlines the potential applications of unmanned aerial vehicles for the delivery of pesticides and agrochemicals. It addresses key challenges in implementing UAV technology, particularly the development and use of accurate modeling tools for

predicting application processes and indicators. Additionally, the paper discusses the unique aspects of research conducted in this field. (*Research purpose*) The study aims to develop and test application software for numerical modeling of the processes and indicators involved in protective spraying of agricultural targets using multicopters. (*Materials and methods*) The paper integrates scientific and technical information, experimental data, system analysis methods, applied statistics, mathematical modeling of physical objects and processes, and solutions to differential and integral equations. These tools are used to describe the processes, building on previously developed methodological approaches for studying the aerial distribution of substances. (*Results and discussion*) A software package for modeling the processes and parameters of spraying by multicopters has been developed, with its detailed functional block diagram provided. The paper illustrates the implementation features of the system's main blocks and modules, including modeling the inductive wave of a multicopter, droplet deposition, working fluid application indicators and full-area coverage. The adequacy, reliability, and acceptable accuracy of the modeling results are validated through comparison with experimental data. The paper presents the results of correlation and multiple regression analyses obtained through multivariate numerical modeling, using the *DJI Agras T20* hexacopter as an example for protective spraying. (*Conclusions*) The paper confirms the functionality and potential of the developed and tested computational and software system for numerical modeling of protective spraying. This system is designed to address both scientific and practical challenges related to the implementation of multicopters in agricultural production. The study identifies qualitative and quantitative relationships between individual parameters and target indicators of protective spraying from multicopters. Additionally, significant multi-parameter power regressions are determined for assessing the target indicators of spraying.

Keywords: unmanned aerial vehicle, agricultural production, protective spraying, process modeling, application rate, application quality, processing efficiency.

For citation: Asovsky V.P., Kuzmenko A.S. Numerical simulation of protective spraying by helicopter-type unmanned aerial vehicles. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 63-74 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-63-74. EDN: FNNREO.

Одним из наиболее перспективных направлений развития гражданских беспилотных систем и технологий во всем мире считается использование беспилотных воздушных судов (БВС) в отраслях агропромышленного комплекса. В этой сфере в ближайшие годы может быть задействовано до 80-90% всех коммерческих БВС, из них 30-40% для внесения пестицидов и агрохимикатов [1].

Приоритетными для целей защитного опрыскивания в силу особенностей летно-технических и функциональных характеристик являются беспилотные системы вертолетного типа, прежде всего мультироторной схемы – мультикоптеры (МК) [2]. В настоящее время расширяются масштабы преимущественно экспериментальных исследований аспектов применения разнообразных типов БВС, обрабатываемых культур, рабочих режимов полета, параметров внесения веществ, внешних условий обработки агрохимикатами и других факторов.

Анализ многочисленных исследований по вопросам обработки агрообъектов с помощью БВС показал в значительной степени бессистемность, ограниченный характер и во многих случаях противоречивость использованных методов и полученных результатов [3]. В связи с этим одной из важнейших задач для внедрения БВС в массовое сельскохозяйственное производство определена необходимость создания средств адекватного моделирования процессов и показателей внесения пестицидов и агрохимикатов, учитывающих множество значимых факторов.

Основными для исследования различных процессов являются методы физического и численного (математического) моделирования. Использование методов физического моделирования внесения БВС рабочих веществ ввиду его сложного многофакторного характера, как показывает анализ, ограничивается преимущественно изучением отдельных элементов или процессов внесения: например, скоростей потока винтов БВС [4], работы вращающихся распылителей жидкости в потоке [5], распределения капель для реального мультикоптера в закрытом пространстве [6] и т.д. К сожалению, физическое моделирование достаточно затратно и не позволяет системно описать процесс обработки беспилотными воздушными судами, однако дает возможность решать узкоспециальные задачи, результаты которых могут использоваться, в том числе для численного моделирования внесения веществ.

В части математического моделирования до настоящего времени практиковались в основном упрощенные подходы описания индуктивного следа пилотируемых воздушных судов и движения в нем частиц вещества, которые могут быть адаптированы и для БВС [7]. Вместе с тем в последние годы за рубежом выполнен ряд работ, базирующихся на более мощных и точных специальных сеточных методах решения полной системы уравнений Навье-Стокса для моделирования некоторых элементов внесения рабочих веществ, например, описания поля скоростей мультикоптера в ближ-

нем следе [8] и динамики движения облака распыленных с БВС частиц [9]. Однако такие подходы ввиду сложности и трудоемкости ограничивают возможности полномасштабного моделирования внесения веществ в процессе практической обработки регламентов авиационного применения пестицидов и агрохимикатов в отношении БВС.

В России, в частности НПК «ПАНХ» (АО НПК «Применение авиации в народном хозяйстве»), сформирован значительный задел по математическому моделированию внесения веществ и обработок сельскохозяйственных угодий с использованием различных видов пилотируемой (изложены, в частности, в монографии В.П. Асовского «Теория и практика авиационного распределения веществ». М.: Воздушный транспорт. 2008. 580 с.) и беспилотной, например, авиационной, техники [10]. Данные наработки можно использовать для решения актуальных научно-практических задач, в том числе в рамках принятой «Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» (принята Распоряжением Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р).

Цель исследований – разработать и апробировать прикладные программные средства численного моделирования процессов и показателей защит-

ного опрыскивания мультикоптерами в сельскохозяйственном производстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследования проводились на базе имеющейся научно-технической информации и полученных экспериментальных данных с использованием методов системного анализа, прикладной статистики, математического моделирования физических объектов и процессов, численных методов решения дифференциальных и интегральных уравнений описания процессов с применением отработанных ранее методических подходов описания авиационного распределения веществ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для решения специальных научно-практических задач в среде программирования *DELPHI* сформирован и апробирован универсальный расчетно-программный комплекс моделирования процессов и показателей внесения рабочих жидкостей (опрыскивания) с применением БВС вертолетного типа, включая МК (рис. 1).

Блок ввода исходных данных комплекса обеспечивает ввод значимых параметров задачи и проведение предварительных расчетов вспомогательных показателей, необходимых для моделирования внесения БВС (МК) рабочих веществ в ожидаемых условиях обработок на базе сформированной в исследованиях системы математических моделей.

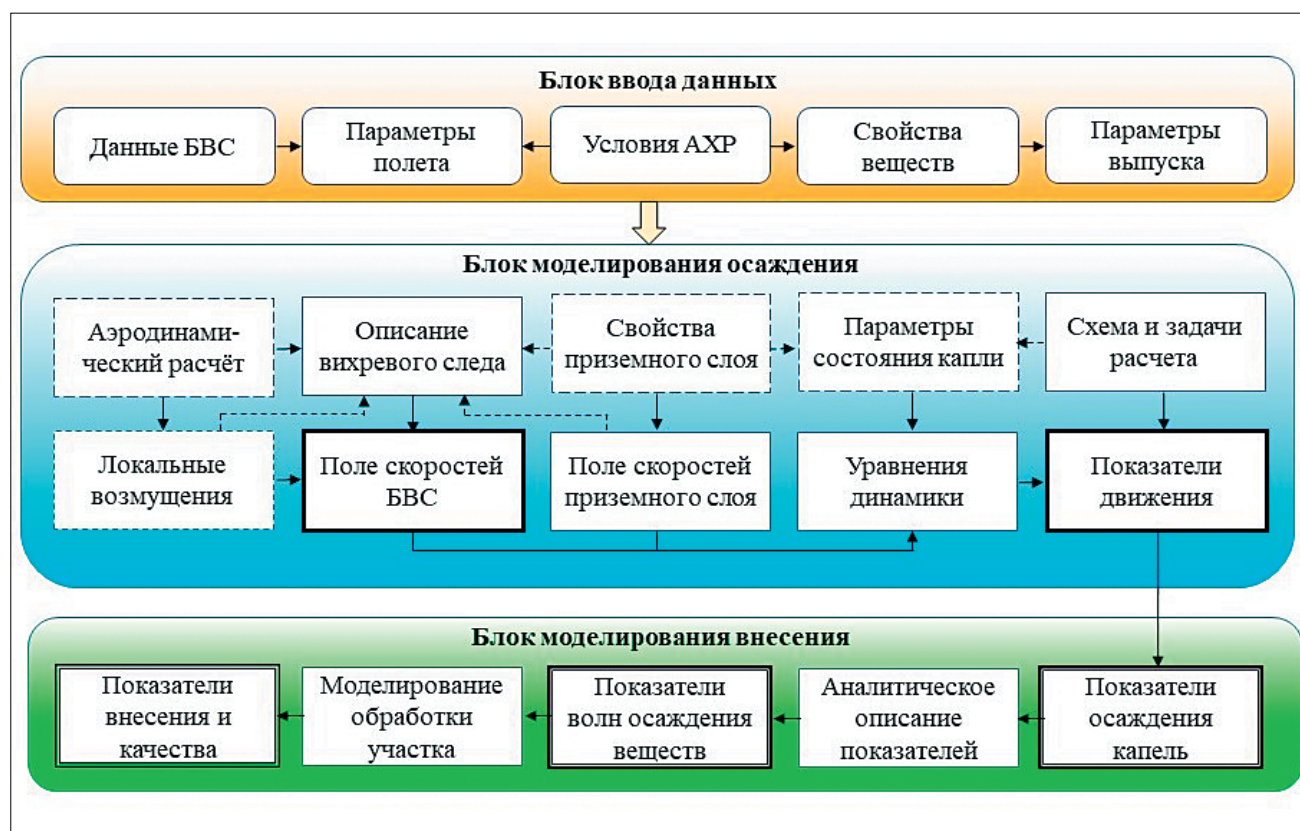


Рис. 1. Общая функциональная блок-схема программного комплекса моделирования внесения мультикоптерами рабочих жидкостей

Fig. 1. General functional block diagram of the software package for simulating the application of working fluids by multicopters

К исходным данным программного комплекса относятся:

- основные летно-технические характеристики рассматриваемого БВС (массовые, геометрические, аэродинамические, количество и параметры несущих винтов (НВ), эксплуатационные ограничения и т.д.);
- принятые с учетом ограничений параметры полета БВС (полетная масса, скорость и высота полета) в процессе опрыскивания;
- внешние условия выполнения обработок (температура T_H , давление P_H и влажность B наружного воздуха, направление и скорость ветра, уклон Ag и характер растительности обрабатываемой поверхности, параметры приземного слоя атмосферы и т.д.);
- показатели (свойства) вносимой рабочей жидкости (состав, физико-химические свойства компонентов и др.);
- параметры выпуска жидкости при обработке (количество, положение, ориентация и типоразмер распылителей (форсунок), секундный выпуск жидкости и т.д.).

Блок моделирования осаждения капель рабочей жидкости программного комплекса (рис. 1) оперирует введенными исходными данными и предусматривает реализацию вспомогательных и основных расчетных модулей.

Вспомогательные модули предназначены для обеспечения функционирования общих и итерационных процедур основных модулей. В частности, модуль аэродинамических расчетов определяет ориентацию и специальные показатели БВС при выполнении полета с заданными параметрами (крен, тангаж, рыскание, координаты несущих винтов и форсунок, начальная циркуляция связанных вихрей и др.), влияющих на конфигурацию и интенсивность вихревого следа. При этом модуль оценки локальных возмущений потока от элементов конструкции позволяет учесть данные эффекты на начальном этапе формирования вихревого следа и движения выпущенных капель.

Определяющим для моделирования движения выпущенных с БВС частиц (капель) является модуль формирования вихревого следа. Показатели этого модуля с использованием известных расчетных процедур оценки индуктивных скоростей интегрированием по элементарным отрезкам системы вихрей следа определенной конфигурации на базе формулы Био-Савара позволяют однозначно описать поле индуктивных скоростей. Модуль построен с применением метода дискретных вихрей, который при построении дальнего вихревого следа требует в 10^3 - 10^4 меньше вычислительных ресурсов в сравнении с отмеченным ранее сеточным методом (по данным А.С.Гиневского, А.И. Желаннико-

ва А.И. «Вихревые следы самолетов». М.: Физматлит, 2008. 170 с.). В нем реализована итерационная процедура оценки координат распространения свободных вихрей, связанных с параметрами несущих винтов (НВ) мультикоптера П-образных вихревых комбинаций, в которой учитываются влияние ветра и потоков в приземном слое, локальные возмущения конструкции БВС, взаимная индукция вихрей и экраный эффект подстилающей поверхности.

Для примера моделирования вихревого следа БВС на рисунке 2 показана его расчетная конфигурация (скриншот, вид спереди) для полета гексакоптера DJI Agras T20 с полетной массой 42 кг на высоте 5 м со скоростью 5 м/с в типовых для утренних обработок условиях ($T_H = 20^\circ\text{C}$, $B = 80\%$, $P_H = 760$ мм рт. ст.) при слабой неустойчивости атмосферы и безветрии соответственно для горизонтальной поверхности ($Ag = 0$) и склона при $Ag = 15^\circ$.

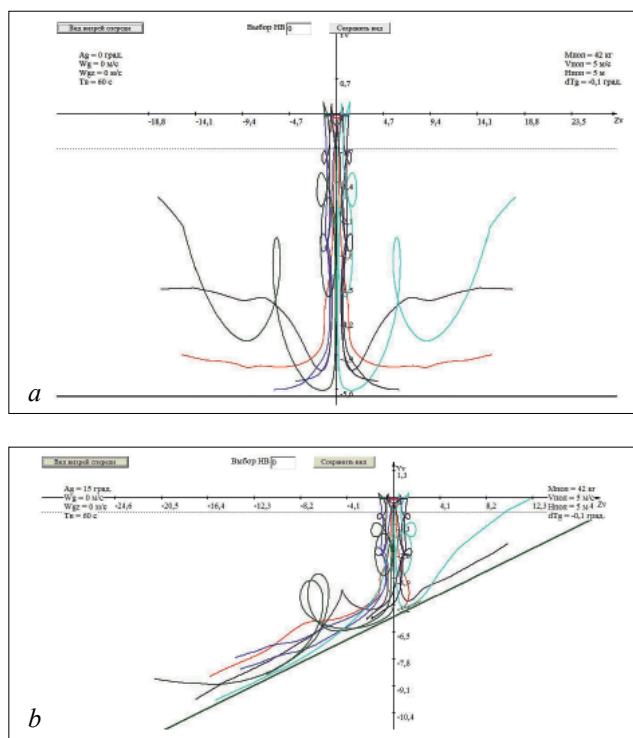


Рис. 2. Расчетная конфигурация вихревого следа гексакоптера DJI Agras T20 при полете на скорости 5 м/с и высоте 5 м в условиях слабой неустойчивости атмосферы (безветрие): а – над горизонтальной поверхностью; б – вдоль склона 15°

Fig. 2. Calculated vortex wake configuration of the DJI Agras T20 hexacopter during flight at a speed of 5 m/s and an altitude of 5 m under conditions of slight atmospheric instability (windlessness): a – above the horizontal surface; b – along a 15° slope

Расчеты вихревого следа МК показали высокую чувствительность его конфигурации и параметров к указанным исходным данным БВС, режиму и внешним условиям полета, особенно связанным с асим-

метричностью следа параметрам бокового ветра и поперечного склона, что оказывает значительное влияние на поле индуктивных скоростей в следе БВС и показатели движения (внесения) частиц в нем.

Работу модуля определения поля скоростей в следе БВС иллюстрирует **рисунок 3**. На нем представлены расчетная векторная диаграмма индуктивных скоростей в поперечной плоскости в 2 м за легким агрокоптером при полете над горизонтальной поверхностью на высоте 2 м при скорости 4 м/с и безветрии, а также и его экспериментальная визуализация.

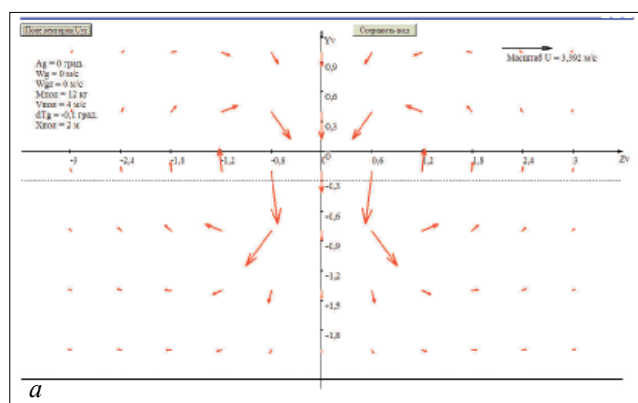


Рис. 3. Расчетное поле индуктивных скоростей (а) и его визуализация (б) для агрокоптера при полете над горизонтальной поверхностью на высоте 2 м при скорости 4 м/с и безветрии

Fig. 3. Calculated induced velocity field (a) and its visualization (b) for an agrocopter during flight above a horizontal surface at a altitude of 2 m at a speed of 4 m/s, in calm windless conditions

Как видно из этого рисунка, расчетные и экспериментальные данные поля индуктивных скоростей в следе МК для типового режима внесения веществ качественно идентичны и примечательны наличием двух мощных центров вращения воздушной среды, что характерно для известных видов летательных аппаратов с аэродинамическим принципом обеспечения полета. Такая особенность следа

за пролетающим воздушным судном, в том числе МК, при полетах на малых высотах (вблизи экрана) связана с формированием в зоне осаждения веществ расходящихся от линии пролета преимущественно горизонтальных потоков воздуха, которые определяют присущую авиационному способу внесения веществ ширину захвата, во много раз превышающую поперечные габариты воздушного судна, что физически не достижимо для традиционной наземной техники.

Сравнительные расчеты с использованием комплекса для имеющихся экспериментальных и расчетных на базе сеточных методов данных, например [8], подтвердили качественную и количественную общность соответствующих показателей, в частности по распределению в пространстве и величинам векторов индуктивных скоростей в следе тестовых МК. Расчеты показывают, что в следе наиболее распространенных средних и тяжелых МК на режимах опрыскивания локальные скорости в следе могут достигать 10-15 м/с, что, несмотря на меньшие масштабы БВС, сопоставимо с показателями тяжелых пилотируемых самолетов и вертолетов.

Известное поле скоростей в зоне полета БВС совместно с начальными параметрами выпуска каплей позволяют в рамках комплекса сформировать систему дифференциальных уравнений изменения значимых показателей каплей в процессе осаждения. Совместное решение этой системы в рамках пошаговых итерационных процедур с учетом начальных и конечных условий, а также принятых физических и расчетных ограничений дает возможность получить в соответствующем модуле численные данные показателей движения заданной капли с момента ее выпуска до осаждения или прекращения расчетов, например при полном испарении. К основным показателям движения рассмотренной капли во временном разрезе относятся ее базовые координаты в земной системе координат и накопленные в процессе движения среднеквадратические отклонения от базовой траектории по соответствующим осям, мгновенные скорости частицы и ее вращения, текущие диаметр капли с учетом испарения и дробления и объем компонентов в ней.

Для примера моделирования движения частиц в следе БВС показаны расчетные базовые траектории движения каплей 10%-го водного раствора «среднего» пестицида с начальным диаметром 200 мкм, выпущенных из ориентированной вниз поперек потока задней внешней щелевой форсунки с расчетным углом раскрытия факела 120° (давление 0,3 МПа) гексакоптера *DJI Agras T20* с полетной массой 42 кг при опрыскивании в указанных выше типовых условиях на скорости 5 м/с и рабо-

чей высоте 5 м (рис. 4а) и 3 м (боковой ветер 2 м/с (рис. 4б) горизонтальной растительной поверхности при слабой неустойчивости атмосферы.

Из рисунка 4 можно отметить серьезные отличия характера движения капель при изменении лишь двух параметров (высота полета, ветер) при неизменных прочих условиях, что также указывает на высокую чувствительность показателей движения выпущенных микрооптером капель рабочей жидкости к выделенным ранее параметрам. Примечательно, что, как показывают расчеты, при опрыскивании с использованием БВС крупные капли с начальным диаметром более 300 мкм движут-

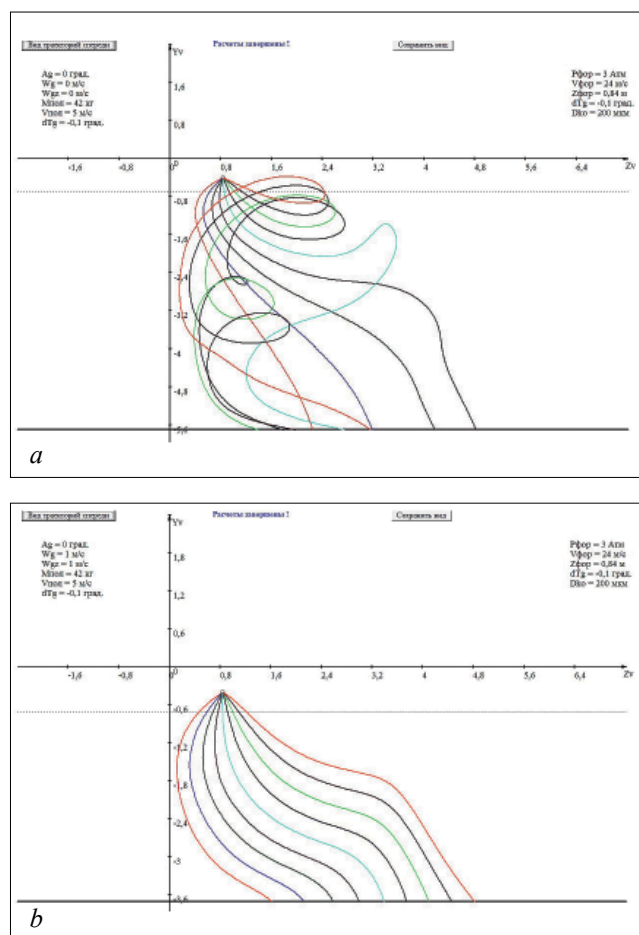


Рис. 4. Расчетные траектории движения капель водного раствора пестицида с начальным диаметром 200 мкм, выпущенных из задней внешней щелевой форсунки гексакоптера DJI Agras T20 при полете в типовых условиях на скорости: а – 5 м/с и рабочей высоте 5 м (безветрие); б – 3 м (боковой ветер 1 м/с) над горизонтальной растительной поверхностью

Fig. 4. Calculated trajectories of pesticide water solution droplets with an initial diameter of 200 μm , released from the rear external slit nozzle of the DJI Agras T20 hexacopter during flight under typical conditions: а – at a speed of 5 m/s and an operating altitude of 5 m (windlessness); б – at a speed of 3 m (side wind of 1 m/s) above a horizontal plant surface

ся преимущественно по массово-инерционному механизму с минимальными изменениями размеров и состава, времени осаждения и смещения от линии пролета. В то же время для более мелких капель преобладают уже аэродинамические воздействия, особенно при размерах до 100 мкм, с нелинейным ростом длительности осаждения, потерь из-за испарения и сноса капель и возможного размаха волны осаждения рабочей жидкости.

Необходимая схема вариантов расчетов показателей движения (по дисперсности капель, параметрам задействованных форсунок, учету отдельных процессов и т.д.) в блоке моделирования уточняется при реализации соответствующего модуля (см. рис. 1), который позволяет для заданного режима полета МК проводить дополнительный анализ и выбор технологических параметров опрыскивания (норма внесения, исходная концентрация препаратов, типоразмер форсунок и т.д.).

Конечные результаты моделирования показателей движения частиц для заданного режима (координаты осаждения на обрабатываемую поверхность и параметры осевших капель) являются входной информацией для блока моделирования внесения веществ.

В рамках начальных модулей этого блока осуществляется первичный анализ совокупности полученных расчетных данных и их аппроксимация полиномами 3-5 порядка для упрощения и ускорения дальнейших процедур моделирования, а также уточнение на этой базе параметров учетного полигона внесения по размаху, количеству, шагу и размерам учетных площадок на нем.

Модуль оценки показателей волны осаждения жидкости на базе сформированных аппроксимационных выражений с учетом решаемой задачи реализует многоуровневые процедуры перебора выпущенной в полете БВС рабочей жидкости по задействованным форсункам, начальному спектру диспергирования капель и параметрам их выпуска с оценкой попадания соответствующих капель на учетные площадки полигона с последующим суммированием и выделением на них количества, размеров, объема рабочей жидкости и ее компонентов для осевших капель, что обеспечивает построение соответствующих эпюр волны осаждения по ее размаху.

На рисунке 5 для примера реализации этого модуля показаны расчетные величины счетного (а) и объемного (б) распределения (по форсункам и в целом) на горизонтальном участке при внесении рабочей жидкости (водный 10%-ный раствор пестицида) с нормой 10 л/га для расчетной ширины захвата 6 м гексакоптером DJI Agras T20 (четыре задние форсунки Tee Jet XR 110-01) на скорости 5 м/с и высоте 5 м в отмеченных ранее характерных условиях (штиль).

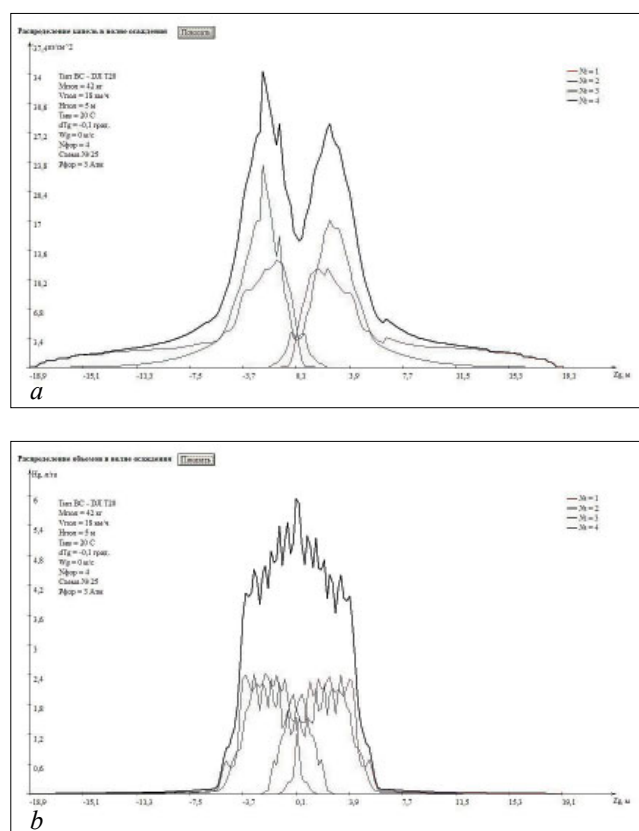


Рис. 5. Расчетное счетное (а) и объемное (б) распределение рабочей жидкости при ее внесении с нормой 10 л/га гексакоптером DJI Agras T20

Fig. 5. Calculated numerical (a) and volumetric (b) distribution of the working fluid when applied at a rate of 10 l/ha by the DJI Agras T20 hexacopter

Оценка адекватности и достоверности результатов моделирования проводилась сравнением расчетных и экспериментальных данных. На **рисунке 6** приведены показатели плотности покрытия каплями в волне осаждения рассмотренного выше расчетного варианта опрыскивания (**рис. 5а**) и полученные в эксперименте в сопоставимых внешних условиях данные замеров по бумажным (БК, 3 повторности) и стеклянным (СК) учетным коллекторам.

Можно отметить близость качественных и количественных показателей экспериментальных и расчетных данных (наличие и положение на эпюре локальных экстремумов – «пиков» и «впадин», уровень плотности капель и т.д.). Выполненный с использованием критериев согласия Фишера (F) и Пирсона (χ^2) анализ соответствия этих показателей подтвердил случайный характер отличий между ними:

$$F_{1/18} = 152,70 - 188,65 > F_{\text{табл}} = 4,42$$

$$\text{и } \chi^2_{19} = 22,51 - 28,21 < \chi^2_{\text{табл}} = 30,14$$

для уровня значимости 0,05 при коэффициенте детерминации около 90%. Это позволяет считать адекватным и достоверным модельное описание

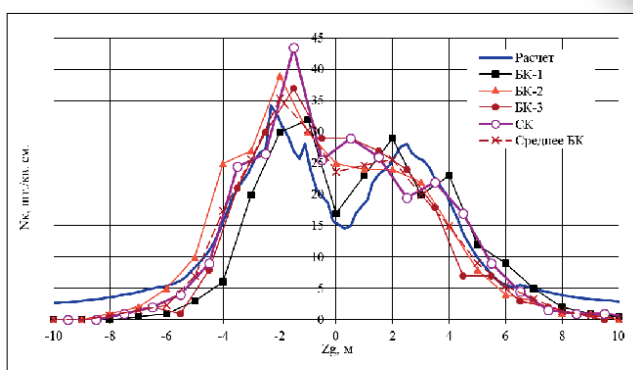


Рис. 6. Расчетное и экспериментальное распределение плотности покрытия каплями при опрыскивании гексакоптером DJI Agras T20 горизонтального участка с нормой 10 л/га при скорости 5 м/с и высоте 5 м при слабой неустойчивости атмосферы и безветрии

Fig. 6. Calculated and experimental distribution of droplet coverage density during spraying by the DJI Agras T20 hexacopter over a horizontal area at a rate of 10 l/ha, at a speed of 5 m/s and an altitude of 5 m under conditions of slight atmospheric instability and windlessness

процесса внесения жидкости. В отношении адекватности программного комплекса следует отметить, что ввиду стохастического характера осаждения капель при авиационном опрыскивании даже полученные одновременно различные экспериментальные данные, например, распределения плотности покрытия каплями (**рис. 6**), отличаются разбросом своих значений. При этом степень корреляции экспериментальных распределений между собой примерно соответствует отмеченному выше уровню для экспериментальных и расчетных показателей.

Моделирование сплошной обработки участка реализовано в программном комплексе последовательным наложением полученных ранее волн осаждения для соответствующей расчетной рабочей ширины захвата (перехода) Z_p с последующим анализом интегральных показателей по участку и выделением значимых показателей внесения жидкости и качества проведенной БВС обработки. Для примера реализации этих модулей рассмотренного выше варианта опрыскивания показаны модельные зависимости от перехода Z_p средних по обработанному участку плотности капель и нормы внесения рабочей жидкости (**рис. 7а**) и коэффициентов вариации (неравномерности) этих показателей (**рис. 7б**) для экспериментальных и расчетных данных.

Как видно из этих графиков, зависимости экспериментальных и расчетных средних и коэффициентов неравномерности показателей внесения рабочей жидкости идентичны и качественно не отличаются от аналогичных зависимостей для других видов авиационной техники. Примечательно,

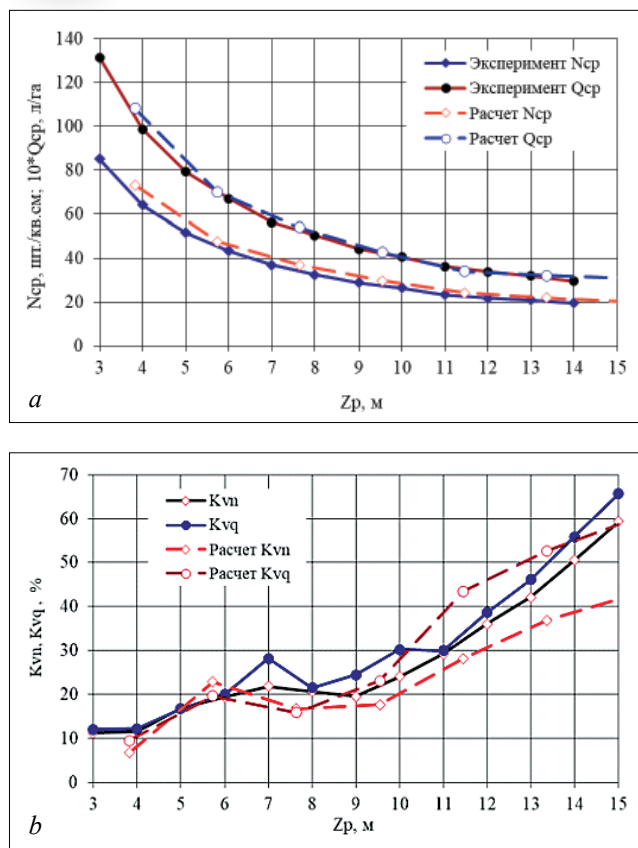


Рис. 7. Модельные зависимости средних плотностей капель и нормы внесения рабочей жидкости (а) и их коэффициентов вариации (б) от рабочей ширины захвата для экспериментальных и расчетных данных опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20

Fig. 7. Model dependences of average droplet densities and working fluid application rates (a) and their coefficients of variation (b) on the working width for experimental and calculated data of spraying by the DJI Agras T20 hexacopter

что для перехода 6 м отличия средних величин плотности капель N_{cp} , нормы внесения Q_{cp} и коэффициентов вариации этих показателей K_{vn} и K_{vq} для расчетов и экспериментов не превышают 3%. То есть, моделирование внесения МК рабочих жидкостей с использованием сформированного программного комплекса обеспечивает приемлемую адекватность и точность определения основных интегральных показателей такого внесения и может использоваться для оценки обработки сельскохозяйственных угодий по биологической эффективности $P_{эф}$ и ожидаемой экономической эффективности $K_{эф}$. Под биологической эффективностью подразумевается интегральная вероятность превышения по участку показателей внесения над требуемыми для достижения необходимого воздействия препарата на целевые объекты с учетом случайного характера процесса. Экономическая эффективность обработки – отношение стоимости прибавки урожая к полным затратам на ее проведение.

На сегодняшний день для уточнения рациональных режимов (регламентов) БВС обработок сельскохозяйственных культур пестицидами во всем мире выполняются десятки многовариантных экспериментальных работ по определению в разных условиях влияния на показатели внесения и эффективность таких значимых параметров, как скорость и высота опрыскивания [11], норма внесения [12], тип форсунок (дисперсность распыла) и рабочая скорость [13], скорость полета и норма внесения [14] и других сочетаний. Разработанный расчетно-программный комплекс с учетом реализованного в нем функционала позволяет оперативно и с меньшими затратами проводить такие оценки и существенно расширить диапазон соответствующего анализа, в частности, для решения таких актуальных научно-практических задач, как выбор рациональных параметров защитного опрыскивания [15] и комплексная оценка показателей сноса рабочей жидкости (препаратов) за пределы обрабатываемого участка [16].

В процессе исследований для оценки влияния параметров и условий обработки БВС на показатели внесения рабочих жидкостей и обработки сельскохозяйственных культур с использованием разработанного программного комплекса проведены многовариантные расчеты опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20 горизонтальных участков водным раствором типовых пестицидов с нормой их внесения 1 л/га при рабочей ширине захвата 6 м, характерном для этого МК варьировании рабочей скорости (V_p) и высоты (H_p) полета, нормы внесения рабочей жидкости ($H_{вн}$) и степени ее начального диспергирования (медианно-объемный диаметр капель D_m) используемыми при этом штатными форсунками типа Tee Jet XR 110 с учетом взаимосвязей их расходных и дисперсных характеристик, условий стратификации приземного слоя атмосферы (параметр Тернера) и боковой составляющей ветра (W_{2z}) в нем и некоторых других параметров.

Для полученных при моделировании данных проведен корреляционный анализ связей параметров и показателей опрыскивания. Некоторые результаты (парные коэффициенты корреляции r_{xy}) для указанных выше параметров с отдельными показателями (размах волны осаждения Z_{go} ; степень осаждения выпущенных капель K_k и объема препарата K_p ; средняя дозировка препарата C_{cp} и плотность покрытия каплями N_{cp} при сплошной обработке и их коэффициенты вариации K_{vc} и K_{vn} ; расчетная биологическая эффективность внесения рабочей жидкости для обработки гербицидами пшеницы $P_{эфгп}$ и риса $P_{эфгр}$, фунгицидом риса $P_{эффр}$, а также средняя экономическая эффективность указанной обработки фунгицидом $K_{эффр}$) с соответствующими диапазонами изменчивости представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПРЫСКИВАНИЯ ГЕКСАКОПТЕРОМ DJI AGRAS T20
CORRELATION COEFFICIENTS BETWEEN PARAMETERS AND THE SPRAYING PERFORMANCE OF THE DJI AGRAS T20 HEXACOPTER

Параметр, показатель	V_p (5-7 м/с)	H_p (3-5 м)	$H_{вн}$ (5-20 л/га)	D_M (170-250 мкм)	P_T (0,2-5,8)	W_{2Z} (0-2 м/с)
<i>Показатели волны осаджения</i>						
Z_{go} (34-48 м)	-0,331	0,170	0,019	-0,263	-0,763	0,636
K_k (9,6-34,4%)	-0,485	-0,301	0,202	0,093	0,223	-0,507
K_p (70,5-96,3%)	-0,083	-0,051	0,160	0,174	0,162	-0,619
<i>Показатели сплошной обработки</i>						
C_{cp} (765-922 мл/га)	0,025	-0,065	0,127	0,282	0,193	-0,578
N_{cp} (7,3-86,2 см ²)	-0,537	-0,060	0,859	-0,429	0,320	-0,328
$K_{вн}$ (8,6-98,1%)	0,835	0,093	-0,293	0,601	0,445	-0,219
$K_{вс}$ (7,8-46,2%)	0,701	0,133	-0,184	0,386	0,382	0,186
<i>Показатели эффективности обработки</i>						
$P_{эфгл}$ (0,2879-0,9992)	-0,876	-0,245	0,470	-0,553	0,180	-0,309
$P_{эфгр}$ (0,2467-0,9992)	-0,728	-0,137	0,518	-0,491	0,264	-0,496
$P_{эффр}$ (0,2401-0,9901)	-0,611	-0,055	0,620	-0,466	0,321	-0,495
$K_{эффр}$ (1,238-4,803)	-0,575	-0,007	0,474	-0,457	0,240	-0,432

В частности, можно отметить следующее.

- Ни один из параметров внесения рабочих жидкостей не определяет прямо и однозначно рассмотренные целевые показатели опрыскивания БВС (в среднем $|r_{xy}| \approx 0,35$), т.е. такие показатели являются многофакторными и обусловлены комплексом параметров внесения.

- Рост рабочей скорости и высоты полета МК в рассмотренном диапазоне их вариаций в целом ухудшает качественные показатели сплошной обработки (уменьшение средних и равномерности внесения) и ее эффективности на характерных видах работ ($r_{xy} < 0$).

- Увеличение норм опрыскивания ($H_{вн}$) до 20 л/га, напротив, благотворно и серьезно сказывается на целевых показателях качества и эффективности обработок, несмотря на некоторое снижение их производительности для больших норм внесения.

- Укрупнение выпуска жидкости (D_M) для больших норм внесения МК положительно сказывается на объеме осевших на участок веществ и негативно на плотность капель при падении равномерности внесения, что отрицательно влияет на эффективность обработок.

- Рост параметра P_T (устойчивости приземного слоя) благоприятно сказывается на степени осадения капель и объемов препарата при некотором ухудшении равномерности их внесения и в целом повышает расчетную эффективность рассмотренных видов обработок БВС.

- Усиление бокового ветра W_{2Z} приводит к росту поперечного размаха волны осадения жидкостей с БВС при перераспределении параметров ее эюры и в конечном итоге отрицательно влияет на эффективность обработок, что требует использования ограничений по этому параметру.

С целью оценки многофакторности процессов и показателей авиационного внесения веществ БВС для полученного при моделировании массива данных дополнительно выполнен его регрессионный анализ для принятых выше параметров (факторов) с построением множественных степенных регрессий. Параметры некоторых выявленных при этом регрессий оценки показателей опрыскивания гексакоптером *DJI Agras T20* и их статистической значимости (коэффициент детерминации R^2 и критерий Фишера $F_{6/15}$) для примера показаны в [таблице 2](#), где параметр W_{2Z} с учетом физической природы процесса заменен на комбинацию $1+|W_{2Z}|$.

Из представленных в таблице данных можно отметить высокую статистическую значимость полученных многопараметрических регрессий (для значимости $0,05 F_{6/15} > F_{табл} = 2,79$), которые для шести характерных параметров описывают примерно 90% изменчивости оцениваемых показателей и могут быть использованы для решения практических задач, например, выбора параметров и ограничений обработок с применением БВС. Показатели степеней указанных регрессий не противоречат сделанным ранее выводам о качественном влиянии отдельных параметров опрыскивания на его целевые показатели, при этом данные выражения позволяют уточнить количественные аспекты такого влияния. В частности, увеличение в сопоставимых условиях рабочей скорости мультикоптера на 1 м/с для повышения летной производительности и снижения себестоимости обработок примерно на 5% приводит к падению уровня осадения капель и внесения фунгицида и его неравномерности, что в комплексе более чем на 25% уменьшает ожидаемую биологическую и экономическую эффективность

Таблица 2

Table 2

ПАРАМЕТРЫ МНОЖЕСТВЕННЫХ СТЕПЕННЫХ РЕГРЕССИЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПРЫСКИВАНИЯ DJI AGRAS T20
PARAMETERS OF MULTIPLE POWER REGRESSIONS FOR EVALUATING THE SPRAYING PERFORMANCE OF THE DJI AGRAS T20

Показатель	A	V_p	H_p	$H_{вн}$	D_m	P_T	$1+ W_{2z} $	$R^2/F_{6/15}$
$Z_{го}, \text{м}$	39,36	-0,405	0,210	-0,004	0,081	-0,045	0,166	0,892/20,68
$K_k, \%$	0,59	-2,550	-0,117	-0,016	1,508	0,039	-0,769	0,910/25,18
$N_{ср}, \text{см}^{-2}$	4025,90	-2,419	-0,008	0,964	-0,555	0,066	-0,693	0,955/52,59
$K_{вн}, \%$	0,0017	3,416	-0,607	-0,149	0,937	0,492	0,054	0,914/26,68
$P_{эффр}$	20,30	-1,996	-0,011	0,527	-0,240	0,031	-0,880	0,929/32,68
$K_{эффр}$	114,58	-1,963	-0,025	0,439	-0,238	0,029	-0,881	0,915/26,92

обработки, т.е. локальный рост производительности может вызвать ухудшение целевых показателей обработки. В свою очередь, повышение нормы внесения, например, с 10 до 20 л/га, уменьшает производительность обработок примерно на 30%, однако существенное улучшение при этом качественных показателей внесения и распределения фунгицида определяет в конечном итоге рост расчетной эффективности такой обработки на 35%. Характерно, что для этого случая использование с целью обеспечения большего выпуска форсунок следующей ступени принятого типоразмерного ряда (рост D_m на 30 мкм) может уменьшить эффективность обработки примерно на 5%. Эти обстоятельства определяют высокую значимость выбора системы технологических параметров внесения при формировании регламента применения препаратов для соответствующих обработок. Примечательно, что период выполнения обработок с рациональными параметрами внесения оказывает существенное влияние на их эффективность, например, эффективность дневных обработок риса фунгицидом (сильная неустойчивость атмосферы при $P_T = 0,2$) может быть ниже утренней и вечерней (нейтральная стратификация, $P_T \approx 2,5$) примерно на 7%, а ночных (сильная устойчивость), наоборот, выше на 2%.

Выводы. Разработанный и апробированный в процессе исследований расчетно-программный комплекс численного моделирования защитного опрыскивания мультикоптерами обеспечивает общую адекватность и приемлемую точность комплексной оценки значимых показателей защитных обработок и может быть использован для решения актуальных научно-практических задач перспективного внедрения таких БВС.

Внесение пестицидов БВС осуществляется в его индуктивном следе, что принципиально отличает его от наземного метода и является сложным многофакторным процессом, показатели которого определяются комплексом характеристик БВС и режимом его полета, данными и конфигурацией системы опрыскивания, свойствами рабочих веществ и требованиями их выпуска, параметрами обрабатываемого участка и приземного слоя атмосферы.

Для рассмотренного типового случая защитного опрыскивания гексакоптером *DJI Agras T20* горизонтальных сельскохозяйственных участков водным раствором пестицида изменчивость значимых показателей внесения жидкости и обработки участков примерно на 90% описывается влиянием комплекса шести условно независимых параметров режима полета БВС (V_p , H_p), выпуска рабочей жидкости ($H_{вн}$, D_m) и внешних условий обработки (P_T , W_{2z}), каждый из которых по отдельности влияет на целевые показатели опрыскивания, однако не определяет их единственным образом.

Полученные с использованием результатов численного моделирования защитного опрыскивания характерного МК общие и частные качественные и количественные соотношения между параметрами и целевыми показателями внесения и обработок совместно с выделенными при этом коэффициентами корреляции и множественных степенных регрессий позволяют более объективно формировать базовые регламенты авиационного применения пестицидов с использованием разных типоразмеров БВС вертолетного типа и выполнять их корректировку в зависимости от условий выполнения различных защитных обработок в сельскохозяйственном производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Del Cerro J., Cruz Ulloa C., Barrientos A. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. *Agronomy*. 2021. 11(2). 203. DOI: 10.3390/agronomy11020203.
2. Chen H.B., Lan Y.B., Fritz B.K. et al. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(1). 38-49. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211401.5714.
3. State of the knowledge literature review on Unmanned Aerial spray systems in agri-culture. OECD Working Party on Pesticides (WPP), OECD Drone Sub-Group Bonds Consulting Group LLC. *Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority*. 2021. June. 34. DOI: 10.1787/9240f8eb-en.

4. Liu X., Zhang W., Fu H.B. et al. Distribution regularity of downwash airflow under rotors of agricultural UAV for plant protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(3). 46-57. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211403.4036.
5. Zhu H., Jiang Y., Li H.Z. et al. Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2019. 2(1). 18-25. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20190201.0025.
6. Hanif A.S., Han X., Yu S.-H. et al. Modeling of the control logic of a UASS based on coefficient of variation spraying distribution analysis in an indoor flight simulator. *Frontiers in Plant Science*. 2013. 14:1235548. DOI: 10.3389/fpls.2023.1235548.
7. Teske M.E., Wachspress D.A., Thistle H.W. Prediction of aerial spray release from UAVs. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2018. Vol. 61(3). 909-918. DOI: 10.13031/trans.12701.
8. Zhang H.Y., Lan Y.B., Shen N.W. et al. Numerical analysis of downwash flow field from quad-rotor unmanned aerial vehicles. *Int J Precis Agric Aviat*. 2020. 3(4). 1-7. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200304.138.
9. Zhang R.R., Chen L.P., Wen Y. et al. Key technologies for testing and analyzing aerial spray deposition and drift: A comprehensive review. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(2). 13-27. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.80.
10. Асовский В.П., Кузьменко А.С. Особенности опрыскивания с использованием беспилотных воздушных судов вертолетного типа // *Защита и карантин растений*. 2019. N5. С. 40-44. EDN: ZIMLZZ.
11. Cao Y.L. Yu F.H. Xu T.Y. et al. Effects of plant protection UAV-based spraying on the vertical distribution of drop-let deposition on Japonica rice plants in Northeast China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(5). 27-34. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211405.5490.
12. Jeevan N., Pazhanivelan S., Kumaraperumal R. et al. Effect of different herbicide spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated Unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Applied and Natural Science*. 2023. 15(3). 972-977. DOI: 10.31018/jans.v15i3.4753.
13. Biglia A., Grella M., Bloise N. et al. UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. *Science of the Total Environment*. 2022. 845. 157292. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2022.157292.
14. Wang G.B., Li X., Andaloro J. et al. Deposition and biological efficacy of UAV-based low-volume application in rice fields. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(2). 65-72. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.86.
15. Vera-Vaca C.V., Acosta-Lua C., Perez-Cruz J.H., Vaca-Garcia C.C. Determination of flight parameters of a sprayer UAV according to the disease in corn crops at the reproductive stage. *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2023. DOI: 10.1155/2023/9932885.
16. Chen P., Douzals J.P., Lan Y. et al. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. *Frontiers in Plant Science*. 2022. 13.870956. DOI: 10.3389/fpls.2022.870956.

REFERENCES

1. Del Cerro J., Cruz Ulloa C., Barrientos A. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. *Agronomy*. 2021. 11(2). 203 (In English). DOI: 10.3390/agronomy11020203.
2. Chen H.B., Lan Y.B., Fritz B.K. et al. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(1). 38-49 (In English). DOI: 10.25165/j.ijabe.20211401.5714.
3. State of the knowledge literature review on Unmanned Aerial spray systems in agri-culture. OECD Working Party on Pesticides (WPP), OECD Drone Sub-Group Bonds Consulting Group LLC. *Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority*. 2021. June. 34 (In English). DOI: 10.1787/9240f8eb-en.
4. Liu X., Zhang W., Fu H.B. et al. Distribution regularity of downwash airflow under rotors of agricultural UAV for plant protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(3). 46-57 (In English). DOI: 10.25165/j.ijabe.20211403.4036.
5. Zhu H., Jiang Y., Li H.Z. et al. Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2019. 2(1). 18-25 (In English). DOI: 10.33440/j.ijpaa.20190201.0025.
6. Hanif A.S., Han X., Yu S.-H. et al. Modeling of the control logic of a UASS based on coefficient of variation spraying distribution analysis in an indoor flight simulator. *Frontiers in Plant Science*. 2013. 14:1235548 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2023.1235548.
7. Teske M.E., Wachspress D.A., Thistle H.W. Prediction of aerial spray release from UAVs. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2018. Vol. 61(3). 909-918 (In English). DOI: 10.13031/trans.12701.
8. Zhang H.Y., Lan Y.B., Shen N.W. et al. Numerical analysis of downwash flow field from quad-rotor unmanned aerial vehicles. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(4). 1-7 (In English). DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200304.138.
9. Zhang R.R., Chen L.P., Wen Y. et al. Key technologies for testing and analyzing aerial spray deposition and drift: A comprehensive review. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(2). 13-27 (In English). DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.80.

10. Asovsky V.P., Kuzmenko A.S. Some features of spraying using the unmanned aerial vehicles of the helicopter type. *Plant Protection and Quarantine*. 2019. N5. 40-44 (In Russian). EDN: ZIMLZZ.
11. Cao Y.L., Yu F.H., Xu T.Y. et al. Effects of plant protection UAV-based spraying on the vertical distribution of droplet deposition on Japonica rice plants in Northeast China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(5). 27.34 (In English). DOI: 10.25165/j.ijabe.20211405.5490.
12. Jeevan N., Pazhanivelan S., Kumaraperumal R. et al. Effect of different herbicide spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated Unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Applied and Natural Science*. 2023. 15(3). 972-977 (In English). DOI: 10.31018/jans.v15i3.4753.
13. Biglia A., Grella M., Bloise N. et al. UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. *Science of the Total Environment*. 2022. 845. 157292 (In English). DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2022.157292.
14. Wang G.B., Li X., Andaloro J. et al. Deposition and biological efficacy of UAV-based low-volume application in rice fields. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(2). 65.72 (In English). DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.86.
15. Vera-Vaca C.V., Acosta-Lua C., Perez-Cruz J.H., Vaca-Garcia C.C.. Determination of flight parameters of a sprayer UAV according to the disease in corn crops at the reproductive stage. *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2023 (In English). DOI: 10.1155/2023/9932885.
16. Chen P., Douzals J.P., Lan Y. et al. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. *Frontiers in Plant Science*. 2022. 13.870956 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2022.870956.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Асовский В.П. – формирование информационной базы, целей и задач исследований, разработка общей структуры и основных модулей программного комплекса, подготовка общих и промежуточных выводов, редактирование статьи;

Кузьменко А.С. – разработка, адаптация и тестирование отдельных модулей и программного комплекса, проведение и анализ результатов многовариантных расчетов, подготовка и оформление статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Asovsky V.P. – formation of the information base, setting the research goals and objectives, development of the overall structure and main modules of the software package, preparation of general and intermediary conclusions, manuscript proofreading;

Kuzmenko A.S. – development, adaptation and testing of individual modules and the software package, conducting and analyzing multivariate calculation results, manuscript preparation 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

07.11.2023
20.08.2024

EDN: CEXDWM

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81



Научная статья

УДК 631.95



Методика оценки уровня выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных культур

Нозим Исмоилович Джабборов,
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: nozimjon-59@mail.ru;
Алексей Петрович Мишанов,
старший научный сотрудник,
e-mail: amishanov@mail.ru;

Антон Михайлович Захаров,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: zamsznii@yandex.ru;
Александр Владимирович Добринов,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
e-mail: a.v.dobrinov@yandex.ru

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

Реферат. Повышение средней температуры окружающей среды в глобальном масштабе связано с выделением парниковых газов в результате хозяйственной деятельности человека, включая производство продукции растениеводства. Выявлено, что на данный момент отсутствуют системный подход и инструменты, позволяющие комплексно оценить уровень выбросов парниковых газов от растениеводства. (*Цель исследования*) Разработка математических моделей и методики оценки уровня выбросов парниковых газов при производстве сельскохозяйственной продукции. (*Материалы и методы*) Работа выполнена на основании анализа опубликованных данных отечественных и зарубежных ученых. (*Результаты и обсуждение*) Обоснован перечень показателей для оценки уровня выделения парниковых газов при производстве сельскохозяйственной продукции. Новизна методики заключается в синтезе многочисленных показателей и параметров сложного процесса выделения парниковых газов с учетом случайных возмущающих факторов. При этом приемы обработки почвы, расход топлива на единицу выполненной работы, доза, способ и соотношение вносимых удобрений, содержание растительных остатков, гранулометрический состав почвы, другие показатели рассматриваются как случайные величины. В отличие от методики, предложенной в Руководящих принципах МГЭИК, 2006 г. (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) для расчета эмиссии парниковых газов в растениеводстве, разработанная методика позволяет решать более сложные задачи, связанные с процессами, содержащими одновременно элементы как непрерывного, так и дискретного характера. В качестве примера в статье приведены результаты расчетов оценки выделения парниковых газов с использованием предложенной методики для технологии возделывания картофеля. (*Выводы*) Рассчитанное значение вероятностного коэффициента, учитывающего уровень выделяемых парниковых газов $2,21 > 1$, свидетельствует о несоответствии применяемой технологии экологическим требованиям. Для снижения уровня выброса парниковых газов требуется разработать технико-технологические решения по оптимизации показателей, используемых при расчетах в предлагаемой методике.

Ключевые слова: изменение климата, парниковые газы, растениеводство, критерии оценки, методика оценки, вероятностный коэффициент, обобщенные показатели.

■ **Для цитирования:** Джабборов Н.И., Мишанов А.П., Захаров А.М., Добринов А.В. Методика оценки уровня выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 75-81. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81. EDN: CEXDWM.

Scientific article

Methodology for Assessing the Level of Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Crops Production

Nozim I. Dzhabborov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, leading researcher,
e-mail: nozimjon-59@mail.ru;
Aleksey P. Mishanov,
senior researcher,
e-mail: amishanov@mail.ru;

Anton M. Zakharov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: zamsznii@yandex.ru;
Aleksandr V. Dobrinov,
Ph.D.(Eng.), associate professor, senior researcher,
e-mail: a.v.dobrinov@yandex.ru

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

Abstract. The global rise in average environmental temperatures is associated with the emission of greenhouse gases due to human economic activities, including crop production. Current findings indicate the absence of a systematic approach and tools for a comprehensive assessment of greenhouse gas emissions from crop production. (*Research purpose*) The study aims to develop mathematical models and methods to assess greenhouse gas emissions in agricultural production. (*Materials and methods*) The work was carried out based on the analysis of published data from both domestic and international researchers. (*Results and discussion*) The research validates a set of indicators for assessing the level of greenhouse gas emissions during agricultural production. The novelty of the methodology involves the integration of numerous indicators and parameters of the greenhouse gas emission process, taking into account stochastic disturbances in the emission process. Factors such as soil tillage methods, fuel consumption per unit of work performed, the dose, method and ratio of applied fertilizers, content of plant residues and soil texture, as well as other variables, are considered as stochastic factors. Unlike the methodology outlined in the 2006 IPCC Guidelines (Intergovernmental Panel on Climate Change) for calculating greenhouse gas emissions from crop production, the developed methodology addresses more complex scenarios associated with processes containing simultaneously the elements that are both continuous and discrete in nature. As an example, the paper presents calculations for estimating greenhouse gas emissions from potato cultivation using the proposed methodology. (*Conclusions*) The calculated probability coefficient, with a value exceeding 2.21, indicates that the technology used does not meet environmental standards. To reduce greenhouse gas emissions, it is necessary to develop technical and technological solutions that optimize the indicators utilized in this methodology.

Keywords: climate change, greenhouse gases, crop production, assessment criteria, assessment methodology, probability coefficient, generalized indicators.

■ **For citation:** Dzhaborov N.I., Mishanov A.P., Zakharov A.M., Dobrinov A.V. Methodology for assessing the level of greenhouse gas emissions in agricultural crops production. *Agricultural machinery and technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 75-81 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81. EDN: CEXDWM.

Интенсификация производства, в частности наращивание мощностей растениеводческих предприятий, представляет собой риски негативного экологического эффекта и может стать реальной угрозой воспроизводству природных ресурсов. В этих условиях становятся приоритетными анализ, контроль, прогнозирование и регулирование воздействия интенсивных машинных технологий в растениеводстве на основе изучения тенденций развития системы природопользования, перспектив хозяйственного и научно-технического развития общества.

Снижение технологических рисков представляется важнейшим вызовом и требует рациональных решений. Для этого необходимо проводить фундаментальные исследования, направленные на оптимизацию сельскохозяйственного использования, агроэкологическую оценку земель, создание адаптивных систем и технологий нового поколения на основе цифровизации и регулирования потоков биогенных элементов в агроэкосистемах.

Глобальное изменение климата вызвано увеличением поступлений климатически активных (парниковых) газов в окружающую среду в результате хозяйственной деятельности человека [1, 2]. Большинство стран объединились для выработки совместных решений, в том числе нормативных, по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу. К таким документам относятся «Руководящие

принципы национальных инвентаризаций парниковых газов, МГЭИК, 2006» (2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*). В данном документе определены основные методики расчета парниковых газов от различных отраслей производства, в частности растениеводства. Эти принципы утверждены и признаны странами, подписавшими соглашение по сокращению выбросов климатически активных веществ до 2030 г.

На территории Российской Федерации учет таких выбросов регламентируется в соответствии с «Методическими указаниями по количественному определению объема поглощения парниковых газов» (Утверждены распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 N20-р). При этом методики расчета выбросов, связанных с растениеводством, заимствованы из МГЭИК, 2006 и распространяются только в отношении диоксида углерода (CO_2) при известковании почв, закиси азота (N_2O) в результате внесения удобрений и метана (CH_4) при выращивании риса. В расчетах используются данные о количестве извести, удобрений и площади их внесения.

Выделение парниковых газов от растениеводства составляет около 5% от их суммарного объема [3]. Тем не менее, данный показатель требует детального изучения с точки зрения возможности рас-

чета эмиссии на уровне как отдельных культур, так и технологий их возделывания, а также в целях экологической оценки производства продукции растениеводства.

На основании численных значений коэффициентов с большим диапазоном неопределенности проводится окончательный расчет. Такой алгоритм носит поверхностный характер, и оценка может существенно отличаться от реального уровня как в меньшую, так и большую сторону. Выбросы парниковых газов при производстве продукции растениеводства представляют собой более сложный процесс, чем представленный в существующих методиках. Например, эмиссионный фактор от внесения азота с удобрениями под посевы зерновых культур ($\text{ЭФ}_{\text{N}_{20}}$) по результатам расчетов составляет 0,66–0,70, под пропашные в среднем для сахарной свеклы – 0,93, картофеля – 1,96, бахчевых – 0,77, что гораздо ниже оценок, приведенных в кадастре парниковых газов РФ [4].

Эмиссионный фактор варьируется в широком интервале и зависит от почвенно-климатических условий [5], содержания в почвах органических и минеральных форм азота, органического углерода, от внесения в почву разных форм азотных и органических удобрений, растительных остатков, азотсодержащих отходов [6–9], а также от системы земледелия [10, 11]. Кроме того, на секвестрацию углерода и эмиссию закиси азота оказывают влияние известкование и система удобрения (органическая, минеральная, органоминеральная) [12].

Микробная биомасса является связующим звеном почвенных циклов углерода и азота, стоком и источником биофильных элементов, продуцентом физиологически активных соединений и парниковых газов. Углерод играет особую роль в регулировании минерализационно-иммобилизационного оборота азота в почве [13].

Естественные ценозы (многолетняя залежь) характеризуются меньшим выделением закиси азота по сравнению с сельскохозяйственными угодьями. Величина эмиссии N_2O зависит от содержания в почве нитратного азота, уровня увлажнения [14] и приемов основной обработки [15–17].

На эмиссию N_2O существенное влияние оказывают вид и сочетание органических соединений с минеральными азотными удобрениями при внесении в почву [18]. Эмиссия N_2O зависит от соотношения углерода и азота в почве, принимая наименьшее значение при $\text{C/N} \geq 30$ и наибольшее при $\text{C/N} = 11$. В комбинации с засухой и низкой кислотностью почвы эмиссия N_2O значительно ингибируется при $\text{C/N} \leq 20$ [19]. Баланс почвенного органического углерода в земледелии относится к главным критериям оценки эмиссии и депонирования CO_2 агроценозами [20]. Мульчирование материалом с высо-

ким соотношением C/N (например, ржи) позволило увеличить влажность и снизить температуру почвы, но привело к увеличению выбросов N_2O из органического материала для мульчи [21].

Помимо влияния перечисленных факторов, величина выбросов парниковых газов из почвы носит сезонный характер [22, 23].

На основании аналитического обзора работ ученых разных стран можно сделать вывод, что в существующих методиках отсутствует целый ряд факторов непосредственного влияния процессов в растениеводстве на уровень поступления парниковых газов в окружающую среду.

Цель исследования. Разработка математических моделей и методики оценки выбросов парниковых газов при производстве сельскохозяйственной продукции.

Материалы и методы. Применялись методы статистического моделирования, обобщения результатов, полученных разными авторами при изучении процесса выделения парниковых газов в растениеводстве.

Исследования проводились в четыре этапа:

- определение видов парниковых газов;
- выявление наиболее значимых показателей оценки эмиссии парниковых газов в окружающую среду;
- формализация основного критерия оценки выделения парниковых газов;
- разработка математических моделей для комплексной оценки и прогнозирования выделения парниковых газов на основе установления равнозначных показателей.

Сущность разработанных математических моделей сводится к синтезу многочисленных показателей и параметров процесса выделения парниковых газов с учетом случайных возмущающих факторов: приемов обработки почвы, их количества и глубины, расхода топлива на единицу выполненной работы; дозы, соотношения, способа внесения и агрегатного состояния удобрений; содержания растительных остатков; гранулометрического состава почвы.

Результаты и обсуждение. Как известно, показатель – это обобщенная характеристика технических средств, процесса или его результата, выраженная в числовой форме. А критерием служит признак, основание, правило принятия решения по оценке чего-либо на соответствие предъявленным требованиям (мере). Критерии выбираются из числа показателей в зависимости от поставленной цели: в данном случае это разработка математических моделей и методики комплексной оценки процесса выделения парниковых газов при производстве продукции растениеводства и поиск возможных путей их снижения.



Рисунок. Схема взаимосвязи критерия минимального количества выделяемых парниковых газов и отдельных показателей оценки эмиссии

Figure. Diagram of the relationship between the minimum emission criterion for greenhouse gases and individual emission assessment indicators

С учетом поставленной цели основным критерием может быть минимум количества выделяемых парниковых газов. Он оценивается по вероятностному коэффициенту $\lambda_{Q_{ghg}} \rightarrow \min$, учитывающему уровень эмиссии CO_2 , N_2O и CH_4 . По схеме, представленной на рисунке, наглядно прослеживается взаимосвязь выбранного критерия и отдельных показателей оценки эмиссии парниковых газов при производстве растениеводческой продукции. В принципе, каждый из этих показателей в зависимости от требований производства может быть выбран в качестве критерия оптимальности.

На объем парниковых газов наибольшее влияние оказывают: содержание в почве органического вещества (гумуса) X_{ov} и углерода C_{yt} ; соотношение углерода и азота $C:N$, а также натрия, фосфора, калия и органических удобрений $Na:P:K/Org$; количество выбросов вредных веществ при сгорании топлива в двигателях B_i ; температура T и влажность W почвы. Величины перечисленных показателей зависят от приемов, количества и глубины обработки почвы, ее гранулометрического состава, от расхода топлива, дозы, соотношения и приемов внесения удобрений, содержания растительных остатков.

Процесс выделения CO_2 , N_2O и CH_4 может быть выражен формулой:

$$Q = f(X_{ov}; C_{yt}; N:P:K/Org; B_i; C:N; T; W). \quad (1)$$

Для определения вероятностного коэффициен-

та, учитывающего уровень выделяемых парниковых газов CO_2 , N_2O и CH_4 , нами предлагается формула:

$$\lambda_{Q_{ghg}} = 1/7 (\lambda_{X_{ov}} + \lambda_{C_{yt}} + \lambda_{N:P:K/Org} + \lambda_{B_i} + \lambda_{C:N} + \lambda_T + \lambda_W), \quad (2)$$

где $\lambda_{X_{ov}}$, $\lambda_{C_{yt}}$, $\lambda_{N:P:K/Org}$, λ_{B_i} , $\lambda_{C:N}$, λ_T , λ_W – вероятностные коэффициенты соответствующих параметров.

Вероятностные коэффициенты определяют по отношению их среднего значения к базовому:

$$\lambda_{X_{ov}} = x_{ov}^{cp} / x_{ov}^6, \quad (3)$$

$$\lambda_{C_y} = C_y^{cp} / C_y^6, \quad (4)$$

$$\lambda_{N:P:K/Org} = (N:P:K/Org)^{cp} / (N:P:K/Org)^6, \quad (5)$$

$$\lambda_{B_i} = B_{ii}^{cp} / B_i^6. \quad (6)$$

В данной работе при расчете учтены выбросы токсичных компонентов при сгорании 1 кг дизельного топлива ($e_i = 57$ граммов);

$$\lambda_{C:N} = \lambda_{C:N}^{cp} / \lambda_{C:N}^6; \quad (7)$$

$$\lambda_T = T^{cp} / T^6; \quad (8)$$

$$\lambda_W = W^{cp} / W^6, \quad (9)$$

где W^{cp} и W^6 – средняя и базовая влажность почвы.

Сущность предложенных моделей сводится к синтезу многочисленных показателей и параметров сложного процесса выделения парниковых газов. Преимуществом разработанных математических

Показатели оценки эмиссии парниковых газов при возделывании картофеля сорта Удача INDICATORS AND PROBABILITY COEFFICIENTS FOR ESTIMATING GREENHOUSE GASEMISSIONS FROM POTATO CULTIVATION		
Показатель	Среднее значение	Коэффициент вероятности
$X_{ОВ}$, %	3	3
$C_{УГ}$, %	4	4
N:P:K/орг. удобр.	1/1 (50% : 50%)	2
B_i , г	25,6 г (550 кг/га)	1,1
C:N	20:1 (5% : 95%)	2,5
T , °C	15	1,205
W , %	25	1,666

зависимостей является возможность решения задач исключительной сложности параметров и показателей с вероятностной природой их изменения.

В таблице приведены базовые и средние показатели, а также критерий Q_{gkg} для оценки уровня выделения газов при возделывании картофеля сорта Удача.

Исходя из величин этих показателей, вероятностный коэффициент, учитывающий уровень выделяемых парниковых газов CO_2 , N_2O и CH_4 равен:

$$\lambda_{Q_{gkg}} = 1/7 \cdot (3 + 4 + 2 + 1,1 + 2,5 + 1,203 + 1,66) = 2,21.$$

Как следует из результатов расчета, при минимальном выделении парниковых газов (нулевой уровень) $\lambda_{Q_{gkg}} = 1$. При использовании различных способов обработки почвы и внесения удобрений его вероятностный коэффициент будет отличаться от единицы. В зависимости от величины и отклонения можно судить о возможном влиянии применяемых технологий на окружающую среду.

Выявление наиболее значимых показателей, влияющих на эмиссии парниковых газов, позволяет разработать соответствующие технико-технологические решения, тем самым повысить экологическую безопасность отрасли растениеводства.

яющих на эмиссии парниковых газов, позволяет разработать соответствующие технико-технологические решения, тем самым повысить экологическую безопасность отрасли растениеводства.

Выводы. Разработаны математические модели и методика оценки уровня выброса парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных растений. Сущность математических моделей и методики сводится к синтезу многочисленных показателей и параметров, влияющих на уровень эмиссии парниковых газов при производстве сельскохозяйственной продукции по различным технологиям.

Приведен пример расчета значения вероятностного коэффициента, учитывающего уровень выделяемых парниковых газов. Его численное значение $2,21 > 1$ свидетельствует о несоответствии применяемой технологии экологическим требованиям. Для снижения уровня выброса парниковых газов требуется разработать технико-технологические решения по оптимизации показателей, используемых при расчетах в предлагаемой методике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ксенофонтов Б.С., Таранов Р.А., Козляева Е.А. Проблема изменения климата из-за выбросов парниковых газов и возможные пути ее решения // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2022. №6. С. 28-32. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.06.23.
2. Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D. et al. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2020. Vol. 25(8). 661-687. DOI: 10.1007/s11027-019-09885-2.
3. Carlson K.M., Gerber J.S., Mueller N.D. et al. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7. 63-68. DOI: 10.1038/NCLIMATE3158.
4. Кудеяров В.Н. Эмиссионный фактор закиси азота при применении азотных удобрений в земледелии России // *Агрохимия*. 2021. №11. С. 3-15. DOI: 10.31857/S0002188121110089.
5. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Меняйло О.В. и др. Влияние климатических факторов на эмиссию CO_2 из почв в среднетаежных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы // *Экология*. 2020. №1. С. 51-61. DOI: 10.31857/S0367059720010060.
6. Baresel C., Andersson S., Yang J., Andersen M.H. Comparison of nitrous oxide (N_2O) emissions calculations at a Swedish wastewater treatment plant based on water concentrations versus off-gas concentrations. *Advances in Climate Change Research*. 2016. Vol. 7(3). 185-191. DOI: 10.1016/J.ACCRE.2016.09.001.
7. Charles A., Rochette P., Whalen J.K. et al. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2017. Vol. 236. 88-98. DOI: 10.1016/J.AGEE.2016.11.021.
8. Ding W., Luo J., Li J., et al. Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N_2O

- and fertilizer-induced N₂O emissions from an intensively cultivated soil. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 465. 115-124. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.020.
9. Дёмин Е.А., Ахтямова А.А., Каюгина С.М. Влияние минеральных удобрений на эмиссию углекислого газа в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // *Международный научно-исследовательский журнал*. N1. (139). С. 1-6. DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.112.
 10. Кусаинова М.Д., Тойшиманов М.Р., Таменов Т.Б. и др. Изучение эффективности различных систем земледелия для смягчения климата посредством измерения эмиссии парниковых газов // *Центрально-азиатский журнал исследований водных ресурсов*. 2023. N9(2). С. 17-33. DOI: 10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-2/17-33.rus.
 11. Wachiye Sh., Merbold L., Vesala T. et al. Soil greenhouse gas emissions under different land-use types in savanna ecosystems of Kenya. *Biogeosciences*. 2019. 17. DOI: 10.5194/bg-17-2149-2020.
 12. Сычёв В.Г., Налиухин А.Н., Ерегин А.В. и др. Углерод-секвестрирующая оценка различных систем удобрения и определение эмиссии N₂O в длительном полевом опыте // *Плодородие*. 2022. N6 (129). С. 73-77. DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.19.
 13. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // *Агрохимия*. 2020. N6. С. 78-96. DOI: 10.31857/S0002188120060101.
 14. Ogle S.M., Alsaker C., Baldock J. et al. Climate and soil characteristics determine where No-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions. *Sci Rep*. 2019. Vol. 9:11665. DOI: 10.1038/s41598-019-47861-7.
 15. Зинченко С.И., Бучкина Н.П. Влияние приемов основной обработки серой лесной почвы на эмиссию азота // *Владимирский земледелец*. 2018. N4. (86). С. 7-11. DOI: 10.24411/2225-2584-2018-10032.
 16. Mei K., Wang Z., Huang H. et al. Stimulation of N₂O emission by conservation tillage management in agricultural lands: a meta-analysis. 2018. *Soil Tillage Res*. 182. 86-93. DOI: 10.1016/j.still.2018.05.006.
 17. Li Zh., Zhang Q., Li Zh. et al. Effects of no-tillage on greenhouse gas emissions in maize fields in a semi-humid temperate climate region. *Environmental Pollution*. Vol. 309. 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119747.
 18. Семешкина П.С., Филатов А.Н. Продуктивность звена севооборота в зависимости от энергосберегающих способов обработки почвы и удобрений // *Владимирский земледелец*. 2018. N4. 4-7. DOI: 10.24411/2225-2584-2018-10031.
 19. Oertel C., Matschullat J., Zurba K. et al. Greenhouse gas emissions from soils. A review. *Chemie der Erde*. 2016. Vol. 76. 327-352. DOI: 10.1016/J.CHEMER.2016.04.002.
 20. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах Геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // *Плодородие*. 2021. N6. С. 38-41. DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.10.
 21. Dix B.A., Hauschild M.E., Niether W. et al. Regulating soil microclimate and greenhouse gas emissions with rye mulch in cabbage cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2024. Vol. 367. DOI: 10.1016/j.agee.2024.108951.
 22. Alskaf K., Mooney S.J., Sparkes D.L. et al. Short-term impacts of different tillage practices and plant residue retention on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 206. DOI: 10.1016/j.still.2020.104803.

REFERENCES

1. Ksenofontov B., Taranov R., Kozlyayeva E. The problem of climate change due to greenhouse gas emissions and possible solutions. *Modern Science: Current Issues of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2022. N6. 28-32 (In Russian). DOI 10.37882/2223-2966.2022.06.23.
2. Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D. et al. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2020. Vol. 25(8). 661-687 (In English). DOI:10.1007/s11027-019-09885-2.
3. Carlson K.M., Gerber J.S., Mueller N.D. et al. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7. 63-68 (In English). DOI: 10.1038/NCLIMATE3158.
4. Kudiyarov V.N. Nitrous oxide emission factor from Russian arable soils at the fertilizers application. *Agrohimia*. 2021. N11. 3-15 (In Russian). DOI: 10.31857/S0002188121110089.
5. Makhnykina A.V., Prokushkin A.S., Verkhovets S.V. et al. The impact of climatic factors on CO₂ emissions from soils of middle-taiga forests in Central Siberia: emission as a function of soil temperature and moisture. *Russian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 51. N1. 46-56 (In Russian). DOI: 10.31857/S0367059720010060.
6. Baresel C., Andersson S., Yang J., Andersen M.H. Comparison of nitrous oxide (N₂O) emissions calculations at a Swedish wastewater treatment plant based on water concentrations versus off-gas concentrations. *Advances in Climate Change Research*. 2016. Vol. 7(3). 185-191 (In English). DOI: 10.1016/J.ACCRE.2016.09.001.
7. Charles A., Rochette P., Whalen J.K. et al. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2017. Vol. 236. 88-98 (In English). DOI:10.1016/J.AGEE.2016.11.021.
8. Ding W., Luo J., Li J., et al. Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N₂O and

- fertilizer-induced N₂O emissions from an intensively cultivated soil. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 465. 115-124 (In English). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012. 11.020.
9. Dyomin Y.A., Akhtyamova A.A., Kayugina S.M. Influence of mineral fertilizers on carbon dioxide emission in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Ural region. *International Research Journal*. N1 (139). 1-6 (In Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.112.
 10. Kussainova M.D., Toishimanov M.R., Tamenov T.B. et al. Studying the climate mitigation efficiency of various land-use systems by measuring greenhouse gas emissions. *Central Asian Journal of Water Research Journal*. 2023. 9(2). 17-33 (In Russian). DOI: 10.29258/CAJWR/2023-R1.v 9-2/17-33.rus.
 11. Wachiye Sh., Merbold L., Vesala T. et al. Soil greenhouse gas emissions under different land-use types in savanna ecosystems of Kenya. *Biogeosciences*. 2019. 17 (In English). DOI: 10.5194/bg-17-2149-2020.
 12. Sychev V.G., Naliukhin A.N., Eregina A.V. et al. Carbon sequestering evaluation of various fertilizer systems and determination of N₂O emissions in long-term field experience. *Plodorodie*. 2022. N6 (129). 73-77 (In Russian). DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.19.
 13. Semenov V.M. Functions of carbon in the mineralization-immobilization turnover of nitrogen in soil. *Agrohimia*. 2020. N6. 78-96 (In Russian). DOI: 10.31857/S00021881 20060101.
 14. Ogle S.M., Alsaker C., Baldock J. et al. Climate and soil characteristics determine where No-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions. *Sci Rep*. 2019. Vol. 9:11665 (In English). DOI: 10.1038/s41598-019-47861-7.
 15. Zinchenko S.I., Buchkina N.P. Influence of gray forest soil tillage methods on nitrogen oxide emission. *Vladimir agriculturalist*. 2018. N4. 7-11 (In Russian). DOI: 10.24411/2225-2584-2018-10032.
 16. Mei K., Wang Z., Huang H. et al. Stimulation of N₂O emission by conservation tillage management in agricultural lands: a meta-analysis. *Soil Tillage Res*. 2018. 182, 86-93 (In English). DOI: 10. 1016/j.still.2018.05.006.
 17. Li Zh., Zhang Q., Li Zh. et al. Effects of no-tillage on greenhouse gas emissions in maize fields in a semi-humid temperate climate region. *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 309 (In English). DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119747.
 18. Semeshkina P.S., Filatov A.N. Efficiency of an element of crop rotation independence to energy-saving ways of soil tillage and fertilizers. *Vladimir agriculturalist*. 2018. N4. 4-7 (In Russian). DOI: 10.24411/2225-2584-2018-10031.
 19. Oertel C., Matschullat J., Zurba K. et al. Greenhouse gas emissions from soils. A review. *Chemie der Erde*. 2016. Vol. 76. 327-352 (In English). DOI: 10.1016/J.CHEMER.2016.04.002.
 20. Sychev V.G., Naliukhin A.N. Study of flows of carbon and nitrogen in long-term field experiments of the Geoset with the purpose of reducing greenhouse gas emissions and increasing the deposition of carbon dioxide by agrocenoses. *Plodorodie*. 2021. N6. 38-41 (In Russian). DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.10.
 21. Dix B.A., Hauschild M.E., Niether W. et al. Regulating soil microclimate and greenhouse gas emissions with rye mulch in cabbage cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2024. Vol. 367 (In English). DOI: 10.1016/j.agee.2024.108951.
 22. Alskaf K., Mooney S.J., Sparkes D.L. et al. Short-term impacts of different tillage practices and plant residue retention on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 206 (In English). DOI: 10.1016/j.still.2020.104803.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Джаббаров Н.И. – концептуализация, научное руководство, разработка методики оценки процесса выделения парниковых газов в растениеводстве;
Мишанов А.П. – методология, обзор и анализ направлений исследований по оценке процессов выделения парниковых газов в растениеводстве, проведение исследований;
Захаров А.М. – методология, поиск и анализ литературы, проведение исследований, визуализация, доработка текста;
Добринов А.В. – методология, проведение исследований, оценка достоверности полученных результатов, формирование общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Dzhabbarov N.I. – conceptualization, scientific leadership, development of a methodology for evaluating the process of greenhouse gases in crop production;
Mishanov A.P. – methodology, review and analysis of research areas focusing on assessing the greenhouse gas processes in crop production, conducting research;
Zakharov A.M. – methodology, literature search and analysis, conducting research, and data visualization, manuscript refinement;
Dobrinov A.V. – methodology, conducting research, assessment of result reliability, formation of general conclusions.

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

01.03.2024

25.04.2024



Определение рациональных мест размещения мультиконтактных коммутационных систем

Александр Владимирович Виноградов,
доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник,
e-mail: winaleksandr@gmail.com;

Анатолий Юрьевич Сейфуллин,
аспирант, e-mail: tseyfullin@gmail.com;
Алексей Валерьевич Букреев,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: skiffdark@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. При интеграции объектов распределенной генерации в системы электроснабжения сельских потребителей до 1000 вольт возникает проблема управления конфигурацией соответствующих электрических сетей. Для управления конфигурацией систем электроснабжения сельских потребителей до 1000 вольт предлагается использовать мультиконтактные коммутационные системы. При этом отсутствуют методики и критерии выбора рациональных мест размещения мультиконтактных коммутационных систем в системах электроснабжения сельских потребителей до 1000 вольт, содержащих объекты распределенной генерации. (*Цель исследования*) Разработка методики определения рационального размещения мультиконтактных коммутационных систем в сельских электрических сетях до 1000 вольт, содержащих объекты распределенной генерации. (*Материалы и методы*) Выполнен анализ применения устройств управления конфигурацией в исследуемых системах электроснабжения. Определены эффекты от установки мультиконтактных коммутационных систем и основные виды ущерба от перерыва электроснабжения для сельскохозяйственных потребителей. Разработана методика определения рационального места размещения мультиконтактных коммутационных систем. (*Результаты и обсуждение*) Предложено практическое применение разработанной методики на примере реконструкции сельской электрической сети, содержащей объекты распределенной генерации. Из предложенных вариантов выбрано рациональное место размещения мультиконтактных коммутационных систем. (*Выводы*) Установка мультиконтактных коммутационных систем позволяет сократить ущерб от перерывов электроснабжения для сельских потребителей. На выбор рациональной локализации мультиконтактных коммутационных систем влияют различные факторы, каждый из них может быть определяющими, в зависимости от ситуации. Разработанная методика позволяет оценить совокупность всех факторов и сделать наиболее целесообразный выбор с точки зрения максимальной эффективности системы электроснабжения в целом. Определенное на основе методики рациональное место размещения мультиконтактных коммутационных систем позволяет сократить на 55 процентов ущерб от перерывов электроснабжения потребителям сельской электрической сети. **Ключевые слова:** сельское хозяйство, системы электроснабжения, распределенная генерация, управление конфигурацией, распределительные электрические сети, мультиконтактные коммутационные системы, размещение.

■ **Для цитирования:** Виноградов А.В., Сейфуллин А.Ю., Букреев А.В. Определение рациональных мест размещения мультиконтактных коммутационных систем // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 82-90. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-82-90. EDN: KKBOBV.

Scientific article

Determining the Optimal Location for Multi-Contact Switching Systems

Aleksandr V. Vinogradov,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor, leading researcher,
e-mail: winaleksandr@gmail.com;

Anatoliy Yu. Seyfullin,
Ph.D.(Eng.) student, e-mail: tseyfullin@gmail.com;
Alexey V. Bukreev,
Ph.D.(Eng.), senior researcher, e-mail: skiffdark@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that integrating distributed power generation facilities into power supply systems for rural consumer with voltage up to 1000 volts leads to the challenges in managing the configuration of the associated electrical grids. To manage the configuration of power supply systems for rural consumers with voltage up to 1000 volts, it is proposed to use multi-

contact switching systems. However, there are currently no established methods or criteria for determining optimal locations for multi-contact switching systems in power supply systems for rural consumers with voltage up to 1000 volts that include distributed generation facilities. (*Research purpose*) The study aims to develop a method for determining the optimal placement of multi-contact switching systems in rural electrical grids with voltage up to 1000 volts that include distributed generation facilities. (*Materials and methods*) An analysis is conducted to evaluate the implementation of configuration management devices in the examined power supply systems. The study explores the impact of installing multi-contact switching systems and identifies the main types of damage caused by power supply interruptions for agricultural consumers. Additionally, a method was developed to determine the optimal placement of multi-contact switching systems. (*Results and discussion*) The paper demonstrates the practical application of the developed methodology through a case study on the reconstruction of a rural electrical grid with distributed generation facilities. Among the proposed options, the optimal location for placing multi-contact switching systems was selected. (*Conclusions*) The installation of multi-contact switching systems helps mitigate damage from power interruptions for rural consumers. The choice of optimal locations for multi-contact switching systems is influenced by various factors, any of which can be decisive, depending on the specific circumstances. The developed methodology enables a comprehensive evaluation of all relevant factors, allowing for the most appropriate choice to maximize the overall efficiency of the power supply system. Using the proposed methodology to determine the optimal location for multi-contact switching systems results in a 55 percents damage reduction in the rural electrical grid caused by power outages.

Keywords: agriculture, power supply systems, distributed generation, configuration management, electrical distribution grids, placement of multi-contact switching systems, multi-contact switching systems, location.

■ **For citation:** Vinogradov A.V., Seyfullin A.Yu., Bukreev A.V. Determining the optimal location for multi-contact switching systems. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 82-90 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-82-90. EDN: KKB0BV.

В настоящее время конфигурация сельских электрических сетей до 1000 В (0,23; 0,38 (0,4) кВ) как правило является радиальной с отпайками и не позволяет эффективно интегрировать в них объекты распределенной генерации (ОРГ) [1]. В то же время актуальны вопросы применения источников малой генерации, в том числе для электроснабжения удаленных потребителей [2]. Для этого разрабатываются новые конструкции ветрогенераторов [3], оборудование для фотоэлектрических установок [4].

Новые подходы к построению сетей [5] позволяют, в том числе, влиять на энергетику и экономику регионов [6]. Требуется изменения подходов к организации оперативного управления их режимами работы [7], а также решение проблем интеллектуального оперативно-технологического управления распределительными электрическими сетями [8].

Особенно важна автоматизация функций противоаварийного управления (ликвидация недопустимых отклонений параметров электрического режима, включение обесточенных потребителей, создание надежной послеаварийной схемы и т.д.) [9]. Управление конфигурацией электрических сетей требует применения средств, позволяющих выполнять сегментацию сети при повреждениях на отдельных участках. Для сегментации сетей среднего напряжения на участки с распределенной генерацией в работах отечественных и зарубежных авторов предлагается применять реклоузеры. В частности, проведено сравнение показателей надежности при использовании устройств сетевой ав-

томатизации, в первую очередь реклоузеров [10]. Рассматриваются вопросы локализации реклоузеров в распределительных цепях с использованием моделей нелинейного программирования и генетических алгоритмов [11].

Для решения указанной проблемы предлагаются мультиконтактные коммутационные системы (МКС) – коммутационные аппараты с двумя и более контактными группами, причем с независимым управлением [12]. Применение МКС в электрических сетях номинальным напряжением до 1000 В позволяет варьировать автоматически или по командам оператора (диспетчера) конфигурацию сети при изменении ситуации в ней. МКС оснащаются устройствами мониторинга, учета, контроля и управления с возможностью обмена данными с единым информационным центром сети и таким образом реализации принципов интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей. Рациональный выбор количества МКС и мест их размещения приобретает особую актуальность, так как данный фактор оказывает влияние на эффективность всей системы электроснабжения.

Цель исследования – разработка методики определения рационального места размещения мультиконтактных коммутационных систем в системах электроснабжения сельских потребителей до 1000 В, содержащих объекты распределенной генерации.

Материалы и методы. В ходе анализа концепций построения систем электроснабжения установлено, что в качестве предполагаемых мест размещения МКС сети 0,4 кВ могут быть:

- ответственные (отпаечные) опоры 0,4 кВ, разделяющие сеть на несколько участков (более трех);
- вводные распределительные устройства (ВРУ) 0,4 кВ сельскохозяйственного производства;
- распределительные устройства 0,4 кВ трансформаторных подстанций (ТП) (35/0,4; 10/0,4; 6/0,4 кВ).

Главным условием размещения МКС является получение максимального эффекта для потребителей в результате снижения ущерба от перерывов электроснабжения при сохранении допустимых параметров электрического режима. Устройства МКС могут быть установлены в тех предполагаемых точках, в которых разность между эффектом от применения МКС и затратами на ее установку и эксплуатацию будет положительной и максимальной:

$$\mathcal{E}_{уст} - \mathcal{Z}_{уст} > 0, \text{ руб.}, \quad (1)$$

$$(\mathcal{E}_{уст} - \mathcal{Z}_{уст}) \rightarrow \max, \text{ руб.} \quad (2)$$

Годовой ущерб от перерывов электроснабжения при технологических нарушениях ($\mathcal{Y}_{ав_П}$) и при ремонтных работах ($\mathcal{Y}_{ремП}$):

$$\mathcal{Y}_{ав_П} = \mathcal{Y}_{0ав} \cdot \frac{(P_{НБП} \cdot T_{НБП} - P_{устП} \cdot T_{устП} \cdot k_{он})}{8760}, \quad (3)$$

где $\mathcal{Y}_{0ав}$ – удельный ущерб от аварийных перерывов электроснабжения, руб/кВт·ч; $\mathcal{Y}_{0рем}$ – удельный ущерб от перерывов электроснабжения на время ремонтных работ с отключением потребителей, руб/кВт·ч; $P_{НБП}$ – максимальная мощность нагрузки потребителя, кВт; $P_{устП}$ – установленная мощность объекта распределенной генерации (автономного резервного источника электроснабжения), кВт; $T_{НБП}$ – время использования за год максимальной нагрузки потребителя, ч; $T_{устП}$ – время использования за год установленной мощности объекта распределенной генерации, ч (в году 8760 ч); $k_{он}$ – коэффициент, учитывающий проектный режим работы объекта распределенной генерации (автономного резервного источника электроснабжения) при возникновении технологического нарушения во внешней сети.

$$\mathcal{Y}_{0ав} = \frac{\sum \mathcal{Y}_{ав}}{\sum W_{ав}}, \text{ руб/кВт·ч}, \quad (4)$$

где $\sum \mathcal{Y}_{ав}$ – общая сумма ущерба от аварийных перерывов электроснабжения участка сети, руб; $\sum W_{ав}$ – общая величина аварийного недопуска электроэнергии, кВт·ч/год.

$$\mathcal{Y}_{рем_П} = \mathcal{Y}_{0рем} \cdot \frac{(P_{НБП} \cdot T_{НБП} - P_{устП} \cdot T_{устП} \cdot k_{он})}{8760}, \text{ руб/ч}, \quad (5)$$

где $\mathcal{Y}_{0рем}$ – удельный ущерб от перерывов электроснабжения на время ремонтных работ с отключением потребителей, руб/кВт·ч.

$$\mathcal{Y}_{0рем} = \frac{\sum \mathcal{Y}_{рем}}{\sum W_{рем}}, \text{ руб/кВт·ч}, \quad (6)$$

где $\sum \mathcal{Y}_{рем}$ – общая сумма ущерба от аварийных перерывов электроснабжения участка сети, руб; $\sum W_{рем}$ –

общая величина аварийного недопуска электроэнергии, кВт·ч /год.

Удельный ущерб от аварийных перерывов электроснабжения и удельный ущерб от перерывов электроснабжения на время ремонтных работ с отключением потребителей определяется на основании статистических данных эксплуатирующей организации для района электрической сети (участка, потребителя, электроустановки и т.п.) за год или иной ретроспективный период. Также для расчета можно использовать «Методику по определению ущерба сельскохозяйственному производству от перерывов в подаче электроэнергии» или другие методики [13].

Согласно выполненной оценке, ущерб от нарушения электроснабжения ферм крупного рогатого скота может достигать 680 руб/кВт·ч; механизированных птицеферм и инкубаторов – 590 руб/кВт·ч; теплиц и парников – 360 руб/кВт·ч (в ценах 2023 г.). Для смешанного состава потребителей удельный ущерб можно принять равным 543,3 руб/кВт·ч.

С учетом мероприятий по снижению ущерба при отключении на ремонтные работы для смешанного состава сельскохозяйственных потребителей $\mathcal{Y}_{0рем}$ можно принять равным 1/2 от $\mathcal{Y}_{0ав}$, т.е. 271,6 руб/кВт·ч (в ценах 2023 г.). Коэффициент $k_{он} = 0$ в случае отключения объекта распределенной генерации при пропадании напряжения во внешней электрической сети (отсутствие опорного напряжения); при переходе в автономный режим $k_{он} = 1$.

Ущерб от перерывов электроснабжения при технологических нарушениях на линиях электропередач (ЛЭП) ($\mathcal{Y}_{авЛЭП_С}$), на оборудовании трансформаторной подстанции ($\mathcal{Y}_{авТП_С}$) и на устройстве МКС ($\mathcal{Y}_{авМКС_С}$):

$$\mathcal{Y}_{авЛЭП_С} = (\mathcal{Y}_{ав_П1} + \dots + \mathcal{Y}_{ав_Пj}) \cdot T_{авЛЭП_С}, \text{ руб/год}, \quad (7)$$

где j – количество потребителей сегмента; $T_{авЛЭП_С}$ – суммарное время аварийных перерывов электроснабжения за год при технологических нарушениях на ЛЭП, ч.

$$T_{авЛЭП_С} = \frac{T_{восстЛЭП} \cdot \omega_{олЭП_С} \cdot l_{ЛЭП_С}}{100}, \text{ ч/год}, \quad (8)$$

где $T_{восст}$ – среднее время продолжительности за год аварийно-восстановительных работ, ч; $\omega_{олЭП_С}$ – параметр потока отказов ЛЭП сегмента, год⁻¹; $l_{ЛЭП_С}$ – суммарная длина ЛЭП сегмента, км.

$$\omega_{олЭП_С} = \omega_0 \cdot (1 - k_{ну}), \text{ год}^{-1}, \quad (9)$$

где ω_0 – удельный параметр потока отказов участка сети на 100 км ЛЭП или на 100 ед. оборудования, год⁻¹; $k_{ну}$ – коэффициент, учитывающий ликвидацию неустойчивых повреждений на воздушных линиях электропередач (ВЛ) действием автоматики повторного включения (АПВ).

$$Y_{авТП_C} = (Y_{ав_П1} + \dots + Y_{ав_Пj}) \cdot T_{авТП_C}, \text{ руб/год}, \quad (10)$$

где $T_{авТП_C}$ – суммарное время аварийных перерывов электроснабжения за год при технологических нарушениях на ЛЭП и трансформаторных подстанциях (ТП) соответственно, ч.

$$T_{авТП_C} = \frac{T_{восст_ТП} \cdot \omega_0}{100}, \text{ ч/год}, \quad (11)$$

$$Y_{авМКС_C} = (Y_{ав_П1} + \dots + Y_{ав_Пj}) \cdot T_{авМКС_C}, \text{ руб/год}, \quad (12)$$

где $T_{авМКС_C}$ – суммарное время аварийных перерывов электроснабжения за год при отказах мультиконтактной коммутационной системы соответственно, ч.

$$T_{авТП_C} = \frac{T_{восст_ТП} \cdot \omega_0}{100}, \text{ ч/год}. \quad (13)$$

Суммарное время аварийных перерывов электроснабжения за год при технологических нарушениях на ЛЭП и ТП ($T_{авЛЭП_C}$ и $T_{авТП_C}$) может быть определено на основе статистических данных эксплуатирующей организации, а также по формулам (8) и (11). Среднее время проведения за год аварийно-восстановительных работ ($T_{восст}$) при отсутствии информации принимается для ЛЭП равным 4 ч, для ТП – 50 ч [14, 15].

На основании данных о длительности ремонта по замене выключателей 0,4 кВ в соответствии с заводскими инструкциями для МКС с тремя контактными группами $T_{восст}$ принимаем 1,5 и 2 ч с четырьмя контактными группами.

Удельный параметр потока отказов участка сети на 100 км ЛЭП или на 100 единиц оборудования (ω_0), согласно литературным источникам, для ЛЭП принимается равным 25, для ТП – 0,016, для МКС – 0,05 год⁻¹.

Коэффициент, учитывающий ликвидацию неустойчивых повреждений на воздушной линии действием АПВ [16]:

- $k_{\text{нп}} = 0$, если ЛЭП не оснащена АПВ и не планируется оснащаться МКС с функцией АПВ или если количество циклов существующей АПВ на головном участке ЛЭП равно циклам АПВ контактных групп МКС и для остального оборудования (трансформаторы, выключатели, МКС);

- $k_{\text{нп}} = 0,15$, если ЛЭП оснащена МКС с функцией однократного АПВ контактных групп, а на головном участке АПВ отсутствует;

- $k_{\text{нп}} = 0,2$, если ЛЭП оснащена МКС с функцией двухкратного АПВ контактных групп, а на головном участке АПВ однократное или отсутствует;

- $k_{\text{нп}} = 0,25$, если ЛЭП оснащена МКС с функцией трехкратного АПВ контактных групп, а на головном участке АПВ однократное или отсутствует.

Ущерб от перерывов электроснабжения при выводе в ремонт ЛЭП, ТП и на устройства МКС ТП:

$$Y_{ремЛЭП_C} = (Y_{ремП1} + \dots + Y_{ремПj}) \cdot T_{пер.ремЛЭП_C} = (Y_{ремП1} + \dots + Y_{ремПj}) \cdot T_{ср.рем-тр}; \quad (14)$$

$$Y_{ремТП_C} = (Y_{ремП1} + \dots + Y_{ремПj}) \cdot T_{пер.ремТП_C} = (Y_{ремП1} + \dots + Y_{ремПj}) \cdot T_{ср.рем-тр}; \quad (15)$$

$$Y_{ремМКС_C} = (Y_{ремП1} + \dots + Y_{ремПj}) \cdot T_{ср.рем} \cdot m_p, \text{ руб/год}, \quad (16)$$

где $T_{пер.ремЛЭП_C}$ и $T_{пер.ремТП_C}$ – суммарное время перерывов электроснабжения сегмента при выполнении ремонтных работ на ЛЭП и ТП соответственно, ч; $T_{ср.рем}$ – среднее время перерыва на техническое обслуживание элемента электрических сетей (оборудования, участка ЛЭП), ч; m_p – количество плановых ремонтов в течение ремонтного цикла.

Средний перерыв на техническое обслуживание элемента электрических сетей [9] составляет для ЛЭП 2 ч и для трансформаторов – 6 ч.

В соответствии с заводскими инструкциями длительность ремонта выключателей и планового ремонта МКС с тремя контактными группами составляет 1,5 и 2 ч для МКС с четырьмя контактными группами.

При выводе в ремонт устройства МКС, установке шунтирующих перемычек на контактные группы без снятия напряжения, когда плановые ремонты можно выполнять без перерыва электроснабжения потребителей либо с кратковременным перерывом электроснабжения ЛЭП на время переключений и установки временных шунтирующих перемычек на МКС со снятием напряжения, $T_{ср.рем}$ принимается равным 0,5 ч.

Количество плановых ремонтов в течение ремонтного цикла [16]: для воздушных линий $m_p = 0,17$, для трансформаторов $m_p = 0,25$, для МКС принимается (как для автоматического выключателя) $m_p = 0,33$ год⁻¹.

Эффект от установки мультиконтактных коммутационных систем в точке сети:

$$\mathcal{E}_{\text{МКЗ}} = \sum \mathcal{E}_{\text{МКЗ}} + \sum \mathcal{E}_{\text{ТПЗ}} - \sum \mathcal{E}_{\text{отр.МКЗ}}, \text{ руб.}, \quad (17)$$

где $\sum \mathcal{E}_{\text{МКЗ}}$ – суммарный эффект за год от минимизации отключаемых потребителей при технологических нарушениях и ремонтных работах на ЛЭП с учетом установки МКС в точке z , реализации функций АПВ и сетевого резервирования на устройстве МКС, руб/год; $\sum \mathcal{E}_{\text{ТПЗ}}$ – эффект от минимизации отключаемых потребителей при технологических нарушениях на ТП и на время производства ремонтных работ с отключением ТП с учетом установки МКС в точке z за рассматриваемый период времени при реализации функции сетевого АВР МКС, руб.; $\sum \mathcal{E}_{\text{отр.МКЗ}}$ – отрицательные отключения потребителей при аварийном отказе или выводе в ремонт МКС, установленной в точке z , руб.

Эффекты определяются разницей между суммарными ущербами потребителей сельской электрической сети без установки МКС и с учетом ее монтажа, а также реализации функций АПВ и сетевого резервирования при возникновении технологического нарушения или выводе оборудования в ремонт. При этом для сегментов ЛЭП эффекты будут различными.

Эффект от минимизации отключаемых потребителей при технологических нарушениях на ЛЭП ($\mathcal{E}_{\text{ЛЭП}zi}$) и на время ремонтных работ на ЛЭП с учетом установок МКС в точке z для i -го сегмента:

$$\mathcal{E}_{\text{ЛЭП}zi} = [(V_{\text{авЛЭП_C1}} + \dots + V_{\text{авЛЭП_Ca}}) - (V_{\text{авЛЭП_C1}} + \dots + V_{\text{авЛЭП_Cb}})] + [(V_{\text{авЛЭП_C1}} + \dots + V_{\text{авЛЭП_Cc}}) - (V_{\text{авЛЭП_C1}} + \dots + V_{\text{авЛЭП_Cd}})], \text{ руб.}; \quad (18)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ТП}zi} = [(V_{\text{авТП_C1}} + \dots + V_{\text{авТП_Cc}}) - (V_{\text{авТП_C1}} + \dots + V_{\text{авТП_Cf}})] + [(V_{\text{авТП_C1}} + \dots + V_{\text{авТП_Cg}}) - (V_{\text{авТП_C1}} + \dots + V_{\text{авТП_Ch}})], \text{ руб.}; \quad (19)$$

$$\mathcal{E}_{\text{МКС}zi} = [(V_{\text{авЛЭП_C1}} + \dots + V_{\text{авЛЭП_Ca}}) + (V_{\text{авТП_C1}} + \dots + V_{\text{авТП_Ch}})], \text{ руб.}, \quad (20)$$

где a – количество сегментов, остающихся без напряжения при технологическом нарушении на ЛЭП в i -м сегменте без установки МКС; b – количество сегментов, остающихся под напряжением при технологическом нарушении на ЛЭП в i -м сегменте при установке МКС в точке z с реализацией функций АПВ и сетевого резервирования; c – количество сегментов без напряжения при производстве ремонтных работ в i -м сегменте без установки МКС; d – количество сегментов без напряжения при производстве работ в i -м сегменте при установке МКС в точке z с реализацией функций сетевого резервирования; e – количество сегментов без напряжения при технологическом нарушении на оборудовании ТП без установки МКС; f – количество сегментов под напряжением при технологическом нарушении на оборудовании ТП при установке МКС в точке z с реализацией функций АПВ и сетевого резервирования; g – количество сегментов без напряжения при производстве ремонтных работ на оборудовании ТП без установки МКС; h – количество сегментов без напряжения при производстве ремонтных работ на оборудовании ТП при установке МКС в точке z с реализацией функций сетевого резервирования; v – количество сегментов без напряжения при отказе МКС, установленного в точке z с учетом сетевого резервирования; w – количество сегментов без напряжения при производстве ремонтных работ на МКС, установленного в точке z с учетом сетевого резервирования.

Затраты на установку и эксплуатацию устройства МКС можно разделить:

- на капитальные вложения в установку МКС;
- на капитальные вложения в реконструкцию

прилегающей сети, вызванной установкой МКС (например, замена провода на головных участках ЛЭП 0,4 кВ, оборудование трансформаторных подстанций и оборудования объектов электрической сети высшего класса номинального напряжения для предотвращения превышения длительно допустимой токовой нагрузки при переводе потребителей действием сетевого автоматического ввода резерва АВР на данную ЛЭП), необходимостью организации каналов связи для реализации передачи команд запирания АВР при оснащении МКС функцией АВР;

- ежегодные амортизационные отчисления;
- ежегодные эксплуатационные расходы;
- ежегодные расходы на текущий ремонт устройств

МКС.

В общем виде приведенные затраты на установку и эксплуатацию устройства МКС:

$$Z_{\text{устр}z} = C_{\text{МКС}z} + E_n \cdot (K_{\text{МКС}z} + K_{\text{РЕК}z}); \quad (21)$$

$$C_{\text{МКС}z} = \frac{p_a \cdot K_{\text{МКС}z}}{100} + \frac{p_a \cdot K_{\text{РЕК}z}}{100} + k_1 \cdot R_{\text{МКС}} \cdot [t_{\text{рМКС}} \cdot n_{\text{вр}} \cdot m_{\text{рем}} + n_{\text{во}} \cdot t_0] + n_{\text{вр}} \cdot m_1 \cdot m_i + (n_{\text{вр}} \cdot m_{\text{рем}} + n_{\text{во}}) \cdot m_2, \quad (22)$$

где $C_{\text{МКС}z}$ – годовые эксплуатационные расходы с учетом установки МКС в точке z , тыс. руб.; E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, принимается равным 0,15 для сельского хозяйства (Приказ Минстроя РФ от 14.09.1992 № 209); $K_{\text{МКС}z}$ – капитальные вложения (полная сметная стоимость) в установку устройств МКС в точке z (включая стоимость оборудования релейной защиты и автоматики), тыс. руб.; $K_{\text{РЕК}z}$ – капитальные вложения в реконструкцию оборудования прилегающей электрической сети при оснащении АВР устройств МКС в точке z (включая стоимость организации каналов связи), тыс. руб.; p_a – норма амортизационных отчислений, принимается равной 5% в год для данного вида оборудования (Постановление Правительства РФ от 1 января 2002 г. № 1 «О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» в редакции от 18.11.2022); k_1 – заработная плата персонала, обслуживающего МКС, тыс. руб/ч; $R_{\text{МКС}z}$ – количество обслуживающего МКС персонала, чел.; $t_{\text{рМКС}}$ – время, необходимое для текущего ремонта устройств МКС (равняется времени $T_{\text{ср.рем}}$, принятого для ремонта устройств МКС с тремя и четырьмя контактными группами, соответственно 2 и 3 ч); t_0 – время, необходимое для осмотра устройств МКС, ч; $n_{\text{вр}}$ – число выездов для ремонта устройств МКС; $n_{\text{во}}$ – число выездов для

осмотра устройств МКС; m_p – количество плановых ремонтов в течение ремонтного цикла для i -го элемента (для МКС, как для автоматического выключателя, принимается равным $0,33 \text{ год}^{-1}$; m_1 – стоимость материалов ремонта устройств МКС, тыс. руб.; m_2 – транспортные расходы за один выезд, тыс. руб.

Срок окупаемости капитальных затрат в установку МКС:

$$T_{OKj} = \frac{K_{МКСj} + K_{РЕКj}}{\Delta_{МКСj} - C_{МКСj}}. \quad (23)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На основании вышеизложенного предлагается следующая методика определения рационального места установки МКС в сельских электрических сетях до 1000 В.

1. Для каждой возможной точки сети в зависимости от числа отходящих линий выбрать необходимое устройство МКС (с минимальным возможным для каждой точки количеством контактных групп отключения сегментов) и определить возможные комбинации размещаемых устройств МКС.

2. Для каждой возможной комбинации размещения МКС сформировать матрицу состояний сети при нормативных возмущениях с учетом установки МКС и для исходной схемы (без МКС).

3. На основании анализа матрицы состояний сети для каждой возможной комбинации размещения МКС определить суммарные эффекты от сокращения ущерба при перерывах электроснабжения, от сокращения времени ремонтов участков сети 0,4 кВ, от реализации функции сетевого автоматического ввода резерва (АВР) при установке МКС и отрицательные эффекты при отказе или выводе в ремонт МКС.

4. Для каждой возможной комбинации размещения МКС определить приведенные затраты и разницу между ними и суммарными эффектами от размещения МКС.

5. Для комбинаций размещения устройств МКС, когда разница между суммарными эффектами от установки системы и затратами на ее размещение положительная по знаку, выполнить расчет установившихся режимов, токов короткого замыкания с целью проверки условий чувствительности защиты, возможности согласования установки релейной защиты и автоматики (РЗА) [17] для отключения выключателей, допустимости величины токовых нагрузок оборудования и отклонений напряжений в нормальных схемах, ремонтных схемах и при нормативных возмущениях в ремонтных схемах.

6. Комбинация размещения устройств мультиконтактной коммутационной системы, при которой разница между суммарными эффектами от ее размещения и приведенными затратами максимальная и будет проверена по результатам расчетов элек-

трических режимов, будет являться та, в которой места размещения устройств МКС в сети 0,4 кВ, содержащей объекты распределенной генерации, рациональны.

На рисунке показан пример существующей сельской электрической сети номинальным напряжением до 1000 В, в которую интегрированы объекты распределенной генерации (на основе возобновляемых источников электрической энергии, накопители электрической энергии и т.д.). Точки 1, 3, 6 указывают возможные места установки мультиконтактных коммутационных систем; 2, 4, 5, 7, 8 – условные точки сельской электрической сети.

Исходные данные для расчетов при выборе рационального места размещения мультиконтактных коммутационных систем в данном примере приве-

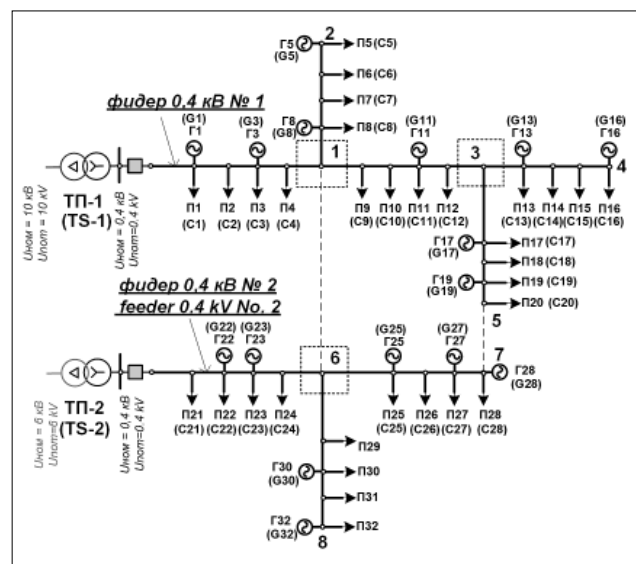


Рисунок. Сельская электрическая сеть напряжением до 1000 В с интегрированными объектами распределенной генерации: ТП-1, ТП-2 – трансформаторные подстанции; П1–П32 – потребители электрической энергии; Г1–Г32 – объекты распределенной генерации

Figure. Rural electric power grid operating at a voltage of up to 1000 V, integrating the following distributed power generation facilities: ТП-1, ТП-2 – transformer substations; П1–П32 – consumers of electric energy; Г1–Г32 – distributed power generation units

дены в таблицах 1 и 2.

Для участка сельской электрической сети напряжением до 1000 В предлагаются варианты размещения устройств МКС с реализацией следующих мероприятий:

- № 1: установка МКС-3 в точках 1 и 6. Оснащение АПВ контактных групп МКС неголовных сегментов (1-2, 1-3, 6-8, 6-7);
- № 2: установка МКС-3 в точках 3 и 6. Оснащение АПВ контактных групп МКС неголовных сегментов (3-4, 3-5, 6-8, 6-7);

• № 3: установка МКС-3 в точках 1, 3, 6. Оснащение АПВ контактных групп МКС неголовных сегментов (1-2, 1-3, 3-4, 3-5, 6-8, 6-7);

• № 4: установка МКС-4 в точках 1 и 6. Оснащение АПВ контактных групп МКС неголовных сегментов (1-2, 1-3, 6-8, 6-7). Установка АВР с полным взаимным резервированием нагрузки фидера 0,4 кВ № 1 и фидера 0,4 кВ № 2, в связи с этим строительство новой ЛЭП 0,4 кВ между точками 1-6 длиной 0,5 км. Замена провода на проводник с большим сечением на головных участках длиной 0,5 км фидера 0,4 кВ № 1 (ТП-1-1) и фидера 0,4 кВ № 2 (ТП-2-6);

• № 5: установка МКС-3 в точках 3 и 6. Оснащение

АПВ контактных групп МКС неголовных сегментов (3-4, 3-5, 6-8, 6-7). Установка автоматического ввода резерва (АВР) с частичным взаимным резервированием нагрузки сегментов (6-8, 6-7, 5-3, 3-4), в связи с этим строительство новой ЛЭП 0,4 кВ между точками 5-7 длиной 0,2 км.

На основании данных о стоимости аналогичного оборудования для МКС с тремя контактными группами капитальные вложения в установку устройств МКС принимаем равной 125 тыс. руб., с четырьмя контактными группами – 150 тыс. руб.; для варианта № 4 размещения МКС – 740 тыс. руб.; для варианта № 5 – 165 тыс. руб.

Таблица 1										Table 1							
Исходные данные участка сельской электрической сети напряжением до 1000 В INITIAL DATA FOR A RURAL ELECTRICAL GRID WITH A VOLTAGE UP TO 1000 V																	
Фидер		Фидер 0,4 кВ № 1															
Сегмент	ТП-1-1				1-2				1-3				3-4				
L, км	0,4				0,4				0,5				0,4				
Потребитель	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10	П11	П12	П13	П14	П15	П16	
P _{нбп} , кВт	5	3	15	5	15	5	3	15	5	5	15	3	15	3	15	5	
T _{нбп} , тыс. ч/год	4,5	5,0	4,5	4,0	5,0	4,5	4,0	5,0	3,8	5,0	4,5	4,0	5,0	6,0	5,0	4,5	
P _{устп} , кВт	5	0	10	0	10	0	0	5	0	0	10	0	5	0	0	5	
T _{устп} , тыс. ч/год	2,0	0	2,0	0	2,0	0	0	2,0	0	0	2,0	0	2,0	0	0	2,0	
k _{он}	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	

Таблица 2																Table 2	
Исходные данные участка сельской электрической сети напряжением до 1000 В INITIAL DATA FOR A RURAL ELECTRICAL GRID WITH A VOLTAGE UP TO 1000 V																	
Фидер	0,4 кВ № 1				0,4 кВ № 2												
Сегмент	3-5				ТП-2-6				6-8				6-7				
L, км	0,4				0,4				0,5				0,4				
Потребитель	П17	П18	П19	П20	П21	П22	П23	П24	П25	П26	П27	П28	П29	П30	П31	П32	
$P_{нбп}$, кВт	15	3	15	5	5	15	15	3	15	5	15	3	15	15	3	15	
$T_{нбп}$, тыс. ч/год	4,5	5,0	4,5	5,0	4,5	3,5	4,6	5,0	4,5	5,0	4,5	5,0	4,5	5,0	4,5	5,0	
$P_{устп}$, кВт	10	0	5	0	0	10	5	0	10	0	10	0	0	5	0	10	
$T_{устп}$, тыс. ч/год	2,0	0	2,0	0	0	2,0	2,0	0	2,0	0	2,0	0	0	2,0	0	2,0	
$k_{он}$	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	

Таблица 3		Table 3			
Расчеты по определению рационального места размещения устройств МКС CALCULATIONS FOR DETERMINING THE OPTIMAL PLACEMENT OF MULTI-CONTACT SWITCHING SYSTEM DEVICES					
Вариант	Мероприятия	Ущерб, руб/год	Эффект, руб/год	Затраты, руб/год	Разница между эффектом и затратами, руб/год
Исходная схема (без МКС)	—	213864,9	—	—	—
№ 1	Установка МКС-3 в точках 1, 6	141358,1	72506,8	65630,0	6876,8
№ 2	Установка МКС-3 в точках 3, 6	148134,1	67450,0	65630,0	1820,0
№ 3	Установка МКС-3 в точках 1, 3, 6	124519,7	89345,3	98445,0	–9099,7
№ 4	Установка МКС-4 в точках 1, 6 с АВР	73237,0	140627,9	224488,0	–83860,1
№ 5	Установка МКС-3 в точках 3, 6 с АВР	96505,7	117359,2	98630,0	18729,2

Зарботную плату персонала, обслуживающего устройства МКС принимаем равной 1000 руб/ч; для обслуживания устройств МКС необходимы два человека; необходимое для осмотра время $t_o = 1$ ч; потребуется один выезд для ремонта и четыре выезда для осмотра; стоимость материалов ремонта устройств для МКС с тремя контактными группами – 2 тыс. руб., с четырьмя – 2,5 тыс. руб.; транспортные расходы за один выезд 0,5 тыс. руб.

Расчеты по определению рационального места размещения устройств МКС представлены в **таблице 3**.

Выводы. Установка мультиконтактных коммутационных систем (МКС) позволяет сократить ущерб сельских потребителей, связанный с перерывами электроснабжения. Определение рационального места размещения мультиконтактных коммутационных систем в системах электроснабжения сельских потребителей до 1000 В, содержа-

щих объекты распределенной генерации, представляет собой многофакторную задачу. Разработанная методика позволяет оценить все факторы в совокупности и определить рациональный вариант размещения устройств МКС, при котором достигается максимальная эффективность системы электроснабжения в целом.

Анализ результатов применения методики по определению рационального места размещения устройств МКС показал, что расширение возможностей управления конфигурацией сельской электрической сети при установке МКС оказывает влияние на их место размещения (затраты на установку одинаковые в вариантах № 1 и 2, однако эффект различный). Рациональным для размещения МКС является вариант № 5, при котором ущерб потребителям от нарушения электроснабжения может сократиться на 55% по сравнению с вариантом без МКС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70. N4(53). С. 22-29. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29.
2. Nepsha F.S., Varnavskiy K.A., Voronin V.A. et al. Integration of renewable energy at coal mining enterprises: problems and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. 455-469. EDN: LNSCEY.
3. Dorjiev S.S., Bazarova E.G., Rosenblum M.I., Morenko K.S. Multi-unit modular wind farm for areas of low wind potential. *IOP. Science and Engineering*. 2021. N1035. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/1035/1/012010.
4. Oussama B., Lechelah A., Chaouki I., Kalinin V.F. A novel multilevel inverter's design and implementation based on photovoltaic systems. *Transactions TSTU*. 2022. Vol. 28. N1. 55-65. DOI: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.055-065.
5. Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А. Новый подход к построению электрических распределительных сетей России // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. N3. С. 147-151. EDN: OAKHAX.
6. Бык Ф.Л., Мышкина Л.С., Кожевников М.В. Повышение устойчивости энергоснабжения регионов на основе локальных интеллектуальных энергосистем // *Экономика региона*. 2023. N19 (1). С. 163-177. DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-1-13.
7. Илюшин П.В., Музалев С.Г. Подходы к созданию систем управления микроэнергосистем // *Релейная защита и автоматизация*. 2016. N3(24). С. 39-45. EDN: XACPCN.
8. Головинский И.А., Лондер М.И. Интеллектуальные агенты оперативно-диспетчерского управления электрическими сетями. I. Элементы архитектуры // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2014. N1. С. 91-101. EDN: SBKDRP.
9. Брилинский А.С., Грунина О.И. Цифровизация распределительных сетей как путь к реализации функций самовосстановления // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*. 2019. N1(80). С. 69-82. EDN: ACKJAF.
10. Haakana J., Lassila J., Kaipia T. et al. Comparison of reliability indices from the perspective of network automation devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25. Iss. 3. 1547-1555. DOI: 10.1109/PESGM.2012.6344642.
11. Da Silva L.G.W., Pereira R.A.F., Mantovani J.R.S. Allocation of protective devices in distribution circuits using nonlinear programming models and genetic algorithms. *Electric Power Systems Research*. 2004. Vol. 69. Iss. 1. 77-84. DOI: 10.1016/J.EPSR.2003.08.010.
12. Виноградов А.В. Типы мультиконтактных коммутационных систем // *Агротехника и энергообеспечение*. 2019. N2(23). С. 12-26. EDN: DTXXYZ.
13. Столяров С.В. Методика оценки материального ущерба от перерывов в электроснабжении крупнотоварных сельскохозяйственных организаций // *Экономика сельского хозяйства России*. 2022. N5. С. 28-31. DOI: 10.32651/225-28.
14. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Скитёва И.Д., Панфилов А.А. Сравнительный анализ надежности электроснабжения по районам электрических сетей // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. N3(28). С. 39-46. EDN: YLSZEL.
15. Vinogradov A., Bolshev V., Vinogradova A. et al. Analysis of the power supply restoration time after failures in power transmission lines. *Energies*. 2020. N13. 2736. DOI: 10.3390/en1312736.
16. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Багметов А.А. Критерии оптимизации места установки реклоузера в распределительной сети 6-10 кВ // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. N1(38). С. 33-39. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-33-39.

17. Vinogradova A., Vinogradov A., Bolshev V. et al. Allocation of 0.4 kv PTL sectionalizing units under criteria of sensitivity

limits and power supply reliability. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. N24. 11608. DOI: 10.3390/app112411608.

REFERENCES

1. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical grids of the Orel region. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2023. Vol. 70. N4(53). 22-29 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29.
2. Nepsha F.S., Varnavskiy K.A., Voronin V.A. et. al. Integration of renewable energy at coal mining enterprises: problems and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. 455-469 (In English). EDN: LNSCEY.
3. Dorjiev S.S., Bazarova E.G., Rosenblum M.I., Morenko K.S. Multi-unit modular wind farm for areas of low wind potential. *IOP. Science and Engineering*. 2021. N1035. 012010 (In English). DOI: 10.1088/1757-899X/1035/1/012010.
4. Oussama B., Lechelah A., Chaouki I., Kalinin V.F. A novel multilevel inverter's design and implementation based on photovoltaic systems. *Transactions TSTU*. 2022. Vol. 28. N1. 55-65 (In English). DOI: 10.17277/vestnik.2022.01. pp.055-065.
5. Loskutov A.B., Sosnina E.N., Loskutov A.A. A new approach to the construction of electric distribution networks in Russia. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2011. N3. 147-151 (In Russian). EDN: OAKHAX.
6. Byk F.L., Myshkina L.S., Kozhevnikov M.V. Improving the stability of power supply in regions on the basis of smart local energy systems. *Economy of Regions*. 2023. N19 (1). 163-177 (In Russian). DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-1-13.
7. Ilyushin P.V., Muzalev S.G. Microgrid's control system approaches. *Relay protection and automation*. 2016. N3(24). 39-45 (In Russian). EDN: XACPCN.
8. Golovinsky I.A., Londer M.I. Intelligent agents of operational dispatch control of electric networks. I. Elements of architecture. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2014. N1. 91-101 (In Russian). EDN: SBKDRP.
9. Brilinsky A.S., Grunina O.I. Digitalization of distribution networks as a way to implement self-healing functions. *Proceedings of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System*. 2019. N1(80). 69-82 (In Russian). EDN: ACKJAF.
10. Haakana J., Lassila J., Kaipia T. et al. Comparison of reliability indices from the perspective of network automation devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25. Iss. 3. 1547-1555 (In English). DOI: 10.1109/PES-GM.2012.6344642.
11. Da Silva L.G.W., Pereira R.A.F., Mantovani J.R.S. Allocation of protective devices in distribution circuits using nonlinear programming models and genetic algorithms. *Electric Power Systems Research*. 2004. Vol. 69. Iss. 1. 77-84 (In English). DOI: 10.1016/J.EPSR.2003.08.010.
12. Vinogradov A.V. Types of multi-contact switching systems. *Agricultural machinery and energy supply*. 2019. N2(23). 12-26 (In Russian). EDN: DTXXYZ.
13. Stoliarov S.V. Methodology for assessing material damage from break in electricity supply of large-scale agricultural organizations. *Economics of Agriculture of Russia*. 2022. N5. 28-31 (In Russian). DOI: 10.32651/225-28.
14. Vinogradov A.V., Vinogradova A.V., Skiteva I.D., Panfilov A.A. Comparative analysis of reliability of power supply by areas of electric grids. *Innovations in agriculture*. 2018. N3(28). 39-46 (In Russian). EDN: YLSZEL.
15. Vinogradov A., Bolshev V., Vinogradova A. et al. Analysis of the power supply restoration time after failures in power transmission lines. *Energies*. 2020. N13. 2736 (In English). DOI: 10.3390/en13112736.
16. Sazykin V.G., Kudryakov A.G., Bakhmetov A.A. Criteria for optimizing the installation site of a recloser in a 6-10 kV distribution grid. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2018. N1(38). 33-39 (In Russian). DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-33-39.
17. Vinogradova A., Vinogradov A., Bolshev V. et al. Allocation of 0.4 kV PTL sectionalizing units under criteria of sensitivity limits and power supply reliability. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. N24. 11608 (In English). DOI: 10.3390/app112411608.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Виноградов А.В. – научное руководство, критический анализ и доработка текста;
Сейфуллин А.Ю. – подготовка материалов и методов, разработка методики, анализ полученных результатов, подготовка текста;
Букреев А.В. – подготовка текста статьи и исходных материалов, доработка текста.

Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Vinogradov A.V. – scientific guidance, critical analysis and manuscript refinement;
Seyfullin A. Yu. – preparing materials and methods, methodology development, results analysis;
Bukreev A.V. – manuscript drafting and source material preparation, manuscript refinement.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

28.06.2024

22.08.2024

EDN: NRITVD

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-91-98



Научная статья

УДК 631.31:631.331:631.33.024



Технико-экономическая оценка технологий улучшения кормовых угодий

Александр Владимирович Лавров,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: vimlavrov@mail.ru;
Арсен Хасанбиевич Текушев,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: kmk3.vim@mail.ru;

Светлана Александровна Давыдова,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: davidova-sa@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Развитие кормовой базы основано на технологиях выращивании культур, обеспечивающих высокую продуктивность и удовлетворяющих потребности внутреннего рынка в качественных кормах, снижение затрат труда и повышение энергоэффективности при заготовке и хранении кормов. (*Цель исследования*) Провести сравнительную оценку технико-экономических показателей традиционной, интенсивной, высокой технологий и комплексов машин для производства кормовых культур. (*Материалы и методы*) Исследования проведены на основе научных публикаций по улучшению естественных угодий для производства кормовых культур, аналитических, информационных материалов и других доступных источников за 2011-2022 годы. Для обобщенной технико-экономической оценки традиционной, интенсивной и высокоинтенсивной технологий и комплексов машин для производства кормовых культур выбраны следующие показатели: затраты труда, топлива, металлоемкость, удельные энергозатраты. (*Результаты и обсуждение*) Исследование проведено на основе методики ВИМ. Для оценки технико-экономических показателей различных типов сельскохозяйственной техники предложен классификатор сельскохозяйственных технологий. Составлены схемы технологий освоения заустаренных угодий, коренного и поверхностного улучшения видового состава травостоя и коренного улучшения видового состава травостоя культурных и естественных кормовых угодий. Рассчитан коэффициент эффективности энергозатрат сравнимых технологий в различных почвенно-климатических зонах. (*Выводы*) Сравнительный анализ технико-экономических показателей комплексов машин, а также их комбинированных вариантов с применением как традиционных, так и перспективных multifunctional комплексов, позволяет рекомендовать оптимальные решения для производства кормов с учетом продуктивности угодий. Наименьшее количество ресурсов на производство единицы продукции потребуются при реализации варианта высокой технологии улучшения кормовых угодий.

Ключевые слова: кормопроизводство, машинные технологии, кормовые угодья, технологии заготовки кормов, факторы интенсификации, технико-экономическая оценка.

■ **Для цитирования:** Лавров А.В., Текушев А.Х., Давыдова С.А. Технико-экономическая оценка технологий улучшения кормовых угодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 91-98. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-91-98. EDN: NRITVD.

Scientific article

Technical and Economic Assessment of Technologies for Forage Land Improvement

Alexandr V. Lavrov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: vimlavrov@mail.ru;

Arsen Kh. Tekushev,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: kmk3.vim@mail.ru;

Svetlana A. Davydova,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: davidova-sa@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that the development of the forage base relies on crop cultivation technologies that ensure high productivity, meet the domestic market's demand for high-quality feed, reduce labor costs and increase energy efficiency in feed preparation and storage. (*Research purpose*) The paper aims to conduct a comparative assessment of the technical and economic indicators of traditional, intensive, and high technologies, as well as machine complexes, for forage crop production.

(*Materials and methods*) The study is based on scientific publications from 2011 to 2022 that focus on the improvement of natural lands for forage crop production, as well as on analytical and information materials, and other available sources. For a comprehensive technical and economic assessment of traditional, intensive and high-intensity technologies, as well as machine complexes used in forage crop production, the following indicators are selected: labor costs, fuel consumption, metal usage, and specific energy consumption. (*Results and discussion*) The study is conducted using the VIM methodology. A classifier of agricultural technologies is proposed to assess the technical and economic indicators of various types of agricultural machinery. The study results in the development of technological schemes for the reclamation of overgrown lands, the radical and surface improvement of herbage species composition and the radical improvement of herbage species composition in cultivated and natural forage lands. Additionally, the efficiency coefficient of energy consumption for the compared technologies across different soil and climatic zones are calculated. (*Conclusions*) A comparative analysis of the technical and economic indicators of machine complexes, including both traditional and advanced multifunctional systems, enables the recommendation of optimal solutions for forage production based on land productivity. The most resource-efficient option for producing a unit of output is achieved through the implementation of high technologies for improving forage lands.

Keywords: forage production, machine technologies, forage lands, forage harvesting technologies, intensification factors, technical and economic assessment.

■ **For citation:** Lavrov A.V., Tekushev A.Kh., Davydova S.A. Technical and economic assessment of technologies for forage land improvement. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 91-98 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-91-98. EDN: NRITVD.

Кормопроизводство – ведущая, многопрофильная и наиболее важная для повышения плодородия почвы отрасль сельского хозяйства, которая во взаимодействии с другими секторами АПК способствует росту производства продуктов земледелия, обеспечивает животноводство объемами кормами и зернофуражом. В России в настоящее время корма получают с площади 50 млн га сеянных сенокосов и 91 млн га природных кормовых угодий. Корма по объемам заготовки значительно превосходят валовое производство другой продукции АПК и составляют около 900 млн т в год [1].

Бессистемное использование, ненадлежащий уход за угодьями, недостаточная техническая оснащенность привели к сокращению валового сбора кормов в 3 раза [2]. Поэтому в кормбикормовой отрасли необходимы изменения с ориентацией на повышение уровня производства и рентабельности [3, 4]. Создание эффективной системы, когда заготавливаемые корма будут рассматриваться как товар для реализации и получения прибыли, позволит обеспечить достаточное количество высококачественных кормов и продовольственную безопасность страны [5, 6].

Цель исследования: провести сравнительную оценку технико-экономических показателей традиционной, интенсивной и высокой технологий, а также комплексов машин для производства кормовых культур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для обобщенной технико-экономической оценки традиционной, интенсивной, высокоинтенсивной технологий и комплексов машин для производства кормов были выбраны показатели: затраты труда; затраты топлива; металлоемкость; удельные энергозатраты

[7]. На основе разработанного проекта системы машин и технологий ФГБНУ ФНАЦ ВИМ методики формирования механизированных технологий с использованием блочно-модульного принципа построения технологий проведена сравнительная оценка технико-экономических показателей традиционной, интенсивной и высокой технологий и комплексов машин для производства кормовых культур.

Производительность агрегата за один час сменного времени

$$W_{\text{ч}} = W_{\text{см}} / \tau_{\text{см}}, \text{ га/ч.} \quad (1)$$

Коэффициент использования времени смены $\tau_{\text{см}}$ вычисляется по элементарным составляющим:

$$\tau_{\text{см}} = \frac{\tau_1}{1 + \tau_{\text{пов}} + \tau_{\text{н.у.}} + \tau_{\text{т.о.}} + \tau_{\text{пер}}}, \quad (2)$$

где τ_1 – коэффициент, не зависящий от ширины захвата и рабочей скорости; $\tau_{\text{пов}}$, $\tau_{\text{н.у.}}$, $\tau_{\text{т.о.}}$ и $\tau_{\text{пер}}$ – относительные затраты времени соответственно на повороты, устранение нарушений технологического процесса и технический уход в борозде, технологическое обслуживание, переезды и перестроения агрегата из рабочего положения в транспортное и наоборот.

Погектарный расход топлива

$$q = \frac{G_{\text{т.н.}}}{W_{\text{ч}}} (\lambda_{\text{ч}} + \lambda_{\text{пов}} \tau_{\text{пов}} + \lambda_{\text{н.у.}} \tau_{\text{н.у.}} + \lambda_{\text{т.о.}} \tau_{\text{т.о.}} + \lambda_{\text{пер}} \tau_{\text{пер}}), \text{ кг/га,} \quad (3)$$

где $G_{\text{т.н.}}$ – номинальный расход топлива, кг/ч; λ_j – отношение расхода топлива в рабочем режиме и при выполнении необходимых вспомогательных операций к номинальной величине.

Энергетические затраты на обработку единицы площади

$$E = E_n + E_{\text{ж}} + E_{\text{тр}} + E_{\text{схм}}, \text{ МДж/га}, \quad (4)$$

где E_n – прямые затраты энергии, выраженные расходом топлива, МДж/га; $E_{\text{ж}}$ – энергетические затраты живого труда, МДж/га; $E_{\text{тр}}$, $E_{\text{схм}}$ – энергоёмкость средств механизации: трактора и сельхозмашины (сельхозорудия), МДж/га.

Прямые затраты энергии

$$E_n = G_T \cdot \alpha_T, \text{ МДж/га}, \quad (5)$$

где G_T – удельный расход топлива, определяемый по результатам сравнительной эксплуатационно-технологической оценки работы МТА, кг/га; α_T – теплотемпература топлива, МДж/кг.

Учет энергозатрат живого труда производится на основе норм, предусматривающих градацию труда (тяжелый, средний, легкий и очень легкий):

$$E_{\text{ж}} = \frac{n \cdot \alpha_{\text{ж}}}{W_{\text{сн}}}, \text{ МДж/га}, \quad (6)$$

где n – число основных и вспомогательных работников, чел.; $\alpha_{\text{ж}}$ – энергетический эквивалент затрат живого труда, МДж; $W_{\text{сн}}$ – производительность агрегата, га/ч.

Средства механизации переносят на создаваемый продукт энергию, затраченную на производство не полностью, а частично. В связи с этим энергоёмкость трактора

$$E_{\text{тр}} = \frac{\alpha_{\text{тр}} \cdot M_T}{100 \cdot W_{\text{см}}} \cdot \left(\frac{a_{\text{рм}} + a_{\text{рн}}}{T} \right), \text{ МДж/га}, \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{тр}}$ – энергетический эквивалент 1 кг массы трактора, МДж; M_T – масса трактора, кг; $a_{\text{рм}}$ и $a_{\text{рн}}$ – годовые отчисления на ремонт и реновацию, %; T – нормативная годовая загрузка трактора, ч.

Аналогично определяется энергоёмкость сельхозмашины или орудия

$$E_{\text{схм}} = \frac{\alpha_{\text{схм}} \cdot M_{\text{схм}}}{100 \cdot W_{\text{см}}} \cdot \left(\frac{a'_{\text{рм}} + a'_{\text{рн}}}{T'} \right), \text{ МДж/га}, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{схм}}$ – энергетический эквивалент 1 кг массы сельхозмашины или орудия, МДж; $M_{\text{схм}}$ – масса сельхозмашины, кг; $a'_{\text{рм}}$ и $a'_{\text{рн}}$ – отчисления на ремонт и реновацию, %; T' – нормативная загрузка сельхозмашины либо орудия, ч.

Суммарную энергоёмкость технологической операции при проведении работ серийным и опытным агрегатом определяли по формуле (4).

Результаты и обсуждение. Технология и техническая оснащённость зависят от вида заготавливаемых кормов [8]. По данным ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса», площади культурных пастбищ, специализированных по агроклиматическим зонам и видам скота, должны составлять 20–24 млн га, а площади улуч-

шенных сенокосов – не менее 15,3 млн га. Для восстановления кормовых угодий на заброшенной пашне из 40 млн га целесообразно вернуть в хозяйственный оборот примерно 15 млн га наиболее плодородных земель или провести их консервацию путем ускоренного залужения [9]. Однако прогнозные данные могут быть реализованы только при комплексном подходе: повышении продуктивности кормовых угодий; улучшении сенокосов и пастбищ [10]; обеспечении хозяйств высокосортными семенами лугопастбищных, многолетних и однолетних кормовых трав; применении полных доз сбалансированных минеральных удобрений [11]; разработке и реализации мер в системе севооборотов по использованию многолетних трав [12].

Существуют различные классификации сельскохозяйственных технологий, сформулированные разными авторами. Все они отличаются друг от друга, причем во многих случаях весьма значительно.

Академиком Россельхозакадемии Н.В. Краснощевым предложена классификация сельскохозяйственных технологий на четыре категории по интенсивности управляемого воздействия на количество и качество урожая [13]. Однако, такая классификация не определяет в полной мере отличительные признаки технологий с точки зрения типов применяемых сельскохозяйственных машин.

Для оценки технико-экономических показателей типов сельскохозяйственной техники предлагается классификатор технологий, который позволит выделить основные особенности каждой группы технологий с учетом применяемых типов машин.

Традиционные технологии обусловлены применением машинно-тракторных агрегатов в составе тракторов тяговой концепции и однооперационных машин с пассивными рабочими органами для возделывания сельскохозяйственных культур, а также самоходных комбайнов или машинно-тракторных агрегатов с прицепными машинами для уборки.

Интенсивные технологии обусловлены применением машинно-тракторных агрегатов в составе тракторов тягово-энергетической концепции и однооперационных машин, имеющих активные рабочие органы, для возделывания сельскохозяйственных культур, а также самоходных комбайнов или машинно-тракторных агрегатов с прицепными машинами для уборки.

Высокоинтенсивные технологии ориентированы на применение машинно-тракторных агрегатов в составе мобильных энергетических средств с комбинированными машинами для обработки почвы, внесения удобрений и посева, самоходных машин для защиты от вредителей, болезней и сорняков, а также самоходных комбайнов для уборки.

Для технико-экономической оценки традиционной, интенсивной и высокоинтенсивной технологий и комплексов машин для производства кормовых культур выбраны показатели: затраты труда; затраты топлива; металлоемкость; удельные энергозатраты [14, 15].

На основе разработанной ФГБНУ ФНАЦ ВИМ методики формирования механизированных технологий проекта системы машин с использованием блочно-модульного принципа составлены схемы технологий освоения закустаренных угодий, коренного и поверхностного улучшения видового состава травостоя (рис. 1) и коренного улучшения

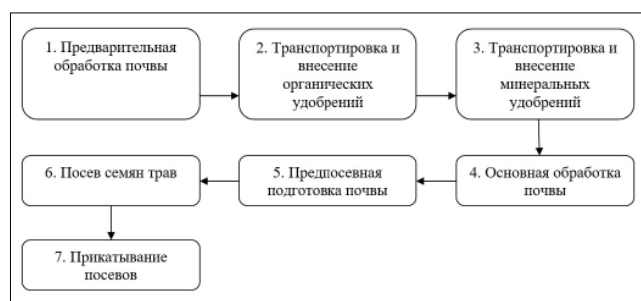


Рис. 1. Схема технологий освоения закустаренных угодий, коренного и поверхностного улучшения видового состава травостоя культурных и естественных кормовых угодий (технологические модули)

Fig. 1. Diagram of technologies for developing overgrown lands, radical and surface improvement of herbage species composition in cultivated and natural forage lands (technological modules)

видового состава травостоя культурных и естественных кормовых угодий (рис. 2) [16, 17].



Рис. 2. Схема технологии коренного улучшения кормовых угодий

Fig. 2. Diagram of technology for the radical forage land improvement

Традиционная технология (технология В) является базовой и включает 12 операций (табл. 1).

В интенсивной технологии (технология Б) при использовании фрезерной обработки почвы четыре операции исключены из перечня (табл. 2).

В высокой технологии коренного улучшения кормовых угодий (технология А) включен машинно-тракторный агрегат в составе универсального энергосредства УЭС 290/450 и комбинированного агрегата АЗ-5,2; число основных операций уменьшилось до шести (табл. 3).

Таблица 1 ТРАДИЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОРЕННОГО УЛУЧШЕНИЯ КОРМОВЫХ УГОДИЙ TRADITIONAL TECHNOLOGY FOR THE RADICAL FORAGE LAND IMPROVEMENT					Table 1	
Операция	Состав агрегата		Выработка за 1 ч эксплуатационного времени, га (норматив)	Расход топлива, кг/га (норматив)		
	Трактор, энергосредство, тяговый класс, марка (аналог)	Тип машин, марка (аналог)				
1. Химическая обработка засоренных пастбищ, сенокосов	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Опрыскиватель, ОП-2500	4,0	2,4		
2. Известкование	Тр.3 Агромаш 90 ТГ	Разбрасыватель МУ,РУП-8	1,75	6,0		
3. Погрузка органических удобрений	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Погрузчик, ПЭ-Ф-1Б	3,0	3,2		
4. Транспортировка и внесение органических удобрений	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Разбрасывать ОУПРТ-10	0,19	50		
5. Дискование в два следа	Трактор, 3 Агромаш 90 ТГ	Борона дисковая, БДТ-3	2,1	5,0		
6. Вспашка с оборотом пласта	Трактор, 3 Агромаш 90 ТГ	Плуг, ПЛН-4-35	1,3	8,1		
7. Дискование в 2 следа	Трактор, 3 Агромаш 90 ТГ	Борона дисковая, БДТ-3	2,1	5,0		
8. Боронование	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Борона зубовая, БЗСТС-1	1,2	8,8		
9. Прикатывание	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Каток, ЗКВГ-1,4	3,3	2,9		
10. Транспортировка минеральных удобрений и семян	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Прицеп, 2ПТС-4,5	2,7	3,5		
11. Посев с внесением минеральных удобрений	Трактор, 3 Агромаш 90 ТГ	Сеялка, СЛТ-3,6	4,0	2,6		
12. Прикатывание посевов	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Каток, ЗКВГ-1,4	3,3	2,9		

Таблица 2

Table 2

ИНТЕНСИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОРЕННОГО УЛУЧШЕНИЯ КОРМОВЫХ УГОДИЙ
INTENSIVE TECHNOLOGY FOR THE RADICAL FORAGE LAND IMPROVEMENT

Операция	Состав агрегата		Выработка за 1 ч эксплуатационного времени, га (норматив)	Расход топлива, кг/га (норматив)
	Трактор, энергосредство, тяговый класс, марка (аналог)	Тип машин, марка (аналог)		
1. Химическая обработка засоренных пастбищ, сенокосов	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Опрыскиватель, ОП-2500	4,0	3,8
2. Известкование	Трактор, 3 Агромаш 90 ТГ	Разбрасыватель МУ, РУП-8	1,75	6,0
3. Погрузка органических удобрений	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Погрузчик, ПЭ-Ф-1Б	3,0	3,2
4. Транспортировка и внесение органических удобрений	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Разбрасывать ОУ, ПРТ-10	0,19	50
5. Фрезерная обработка почвы	Трактор, 3 Агромаш 90 ТГ	Фреза, ФКБ-2	1,04	19,3
6. Прикатывание	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Каток, ЗКВГ-1,4	3,3	2,9
7. Транспортировка минеральных удобрений и семян	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Прицеп, 2ПТС-4,5	2,7	3,5
8. Посев с внесением минеральных удобрений	Трактор, 3 Агромаш 90 ТГ	Сеялка, СЛТ-3,6	4,0	2,6
9. Прикатывание посевов	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Каток, ЗКВГ-1,4	3,3	2,9

Таблица 3

Table 3

ВЫСОКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОРЕННОГО УЛУЧШЕНИЯ КОРМОВЫХ УГОДИЙ
HIGH TECHNOLOGY FOR THE RADICAL FORAGE LAND IMPROVEMENT

Операция	Состав агрегата		Выработка за 1 ч эксплуатационного времени, га (норматив)	Расход топлива, кг/га (норматив)
	Трактор, энергосредство, тяговый класс, марка (аналог)	Тип машин, марка (аналог)		
1. Химическая обработка засоренных пастбищ, сенокосов	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Опрыскиватель, ОП-2500	4,0	3,8
2. Известкование	Трактор, 3 Агромаш 90 ТГ	Разбрасыватель МУ, РУП-8	1,75	6,0
3. Погрузка органических удобрений	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Погрузчик, ПЭ-Ф-1Б	3,0	3,2
4. Транспортировка и внесение органических удобрений	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Разбрасыватель ОУ, ПРТ-10	0,19	50
5. Транспортировка минеральных удобрений и семян	Трактор, 1,4, Беларусь 82.1	Прицеп, 2ПТС-4,5	2,7	3,5
6. Фрезерование с предпосевным уплотнением, высева семян трав, локальное внесение минеральных удобрений и прикатывание	Мобильное энергетическое средство, 5, УЭС-290/450	Агрегат ускоренного залужения, АЗ-5,2	8,0	6,7

Таблица 4

Table 4

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНОЛОГИЙ КОРЕННОГО УЛУЧШЕНИЯ КОРМОВЫХ УГОДИЙ
TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF TECHNOLOGIES FOR THE RADICAL FORAGE LAND IMPROVEMENT

Показатель	Технология С	Технология В	Технология А
Урожайность, т/га	2	3,5	4,5
Затраты труда, чел.ч: на 1 га на 1 т	10,2 5,10	8,61 2,46	6,91 1,54
Затраты топлива, кг: на 1 га на 1 т	100,4 50,20	94,2 26,91	73,2 16,27
Металлоемкость, кг: на 1 га на 1 т	63,36 31,68	53,64 15,33	43,55 9,68
Удельные энергозатраты, мДж: на 1 га на 1 т	11984,46 5992,23	10706,26 3058,93	8539,4 1897,
Коэффициент эффективности и энергозатрат	2,70	6,16	9,93

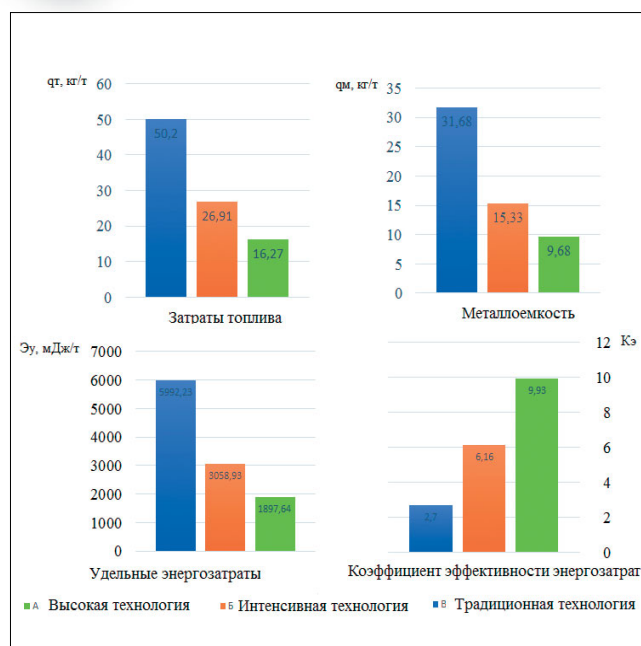


Рис. 3. Диаграммы показателей энергоэффективности выполнения технологического процесса традиционной, интенсивной и высокой технологий коренного улучшения кормовых угодий

Fig. 3. Diagrams of energy efficiency indicators for the implementation of the technological process of traditional, intensive and high technologies for the radical improvement of forage lands

Анализ технико-экономических показателей традиционной (В), интенсивной (Б) и высокой (А) технологий коренного улучшения кормовых угодий в различных почвенно-климатических зонах, проведенный на основе методики формирования систем машин и технологий, разработанной в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, позволяет рассчитать коэффициент эффективности энергозатрат [18] (табл. 4, рисунок).

Коэффициент эффективности энергозатрат для технологии А составляет 9,93, технологии Б – 6,16, технологии В – 2,2. Соотношения А:Б = 160%, А:В = 368%, в то время как соотношения урожайности 4,5:3,5 = 29%, 4,5:2 = 225%, что свидетельствует о преимущественном влиянии показателей энергоэффективности комбинированных машинно-тракторных агрегатов на коэффициент эффективности энергозатрат. Соответственно, по удельным затратам труда, топлива, металлоемкости и энергозатратам технология А превосходит остальные, что подтверждает эффективность ее применения.

Выводы. В результате анализа технико-экономических показателей технологий коренного улучшения кормовых угодий установлено, что наименьшее количество ресурсов на единицу продукции потребуется при реализации варианта высокой технологии: затраты труда – 1,54 чел.-ч/т, затраты топлива – 16,27 кг/т, металлоемкость – 9,68 кг/т, удельные энергозатраты 1897 МДж/т.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Кормопроизводство и рациональное природопользование // *Адаптивное кормопроизводство*. 2016. N2. С. 6-20. EDN: WYMJXJ.
- Лавров А.В. Зубина В.А. Методические подходы к оценке технологической потребности в сельскохозяйственных тракторах для АПК // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 20-26. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-20-26.
- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Марченко О.С., Ценч Ю.С. Создание инновационной техники и ресурсосберегающих технологий производства кормов – основа развития животноводства // *Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина*. 2017. N6 (82). С. 23-28. DOI: 10.26897/1728-7936-2017-6-23-28.
- Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V. et al. Improvement of forage lands in central non-black earth zone of Russia by using some integrated approaches. *Plant Science Today*. 2021. Vol. 8. N1. 9-15. DOI: 10.14719/pst.2021.8.1.827.
- Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Обоснование приемов обработки почвы при освоении залежных земель // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2020. Т. 13. Вып. 1 (64). С. 28-35. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.1.28.
- Косолапов В.М. Научное обеспечение развития кормопроизводства // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2010. N4(19). С. 19-26. EDN: MWCCRT.
- Кутузова А.А., Тебердиев Д.М., Косолапов В.М. и др. Агроэнергетическая эффективность усовершенствованных технологий и современных систем производства высококачественных объемистых кормов на луговых сенокосах в Нечернозёмной зоне // *Кормопроизводство*. 2021. N7. С. 3-10. EDN: SATPRC.
- Попов В.Д., Сухопаров А.И. Оценка использования потенциала кормовых угодий // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. N95. С. 143-153. DOI: 10.24411/0131-5226-2018-10041.
- Косолапов В.М., Чернявских В.И. Кормопроизводство: состояние, проблемы и роль ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» в их решении // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. N4. С. 5-14. DOI: 10.5385/9/02352451_202236_4_5.
- Volovik V.T., Shpakov A.S. Scientific and practical basis of rapeseed production in the Central Federal District. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 663. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/663/1/012020.
- Shpakov A.S., Brazhnikova T.S. Methods of biologization of grain-grass crop rotations and their influence on fertility of soddy-podzolic soil of the forest zone. *IOP: Earth and*

- Environmental Science*. 2021. Vol. 901. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/901/1/012030.
12. Shpakov A.S. Alfalfa (*Medicago sativa*) in forage crop rotations of the forest zone. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 901. 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/901/1/012009.
 13. Коновалова Л.К., Окорков В.В. Совершенствование классификации агротехнологий (структурно-модульный подход) // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2019. N3(59). С. 101-112. EDN: LITJVB.
 14. Федорова О.А., Текушев А.Х., Чаплыгин М.Е., Давыдова С.А. Технологии и технические средства для поверхностного улучшения кормовых угодий // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2022. N2 (66). 404-414. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-50.
 15. Marchenko O., Tekushev A. Prospective technologies, types and calculation of the technical means for the production of forages in arid regions of the country. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2019. Vol. 50. N1. 90-93. EDN: YHZLTA.
 16. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N4. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
 17. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин агромаш для обработки залежных земель // *Вестник ВИАХ*. 2018. N2(31). С. 40-47. EDN: RXFMCP.
 18. Лавров А.В., Бейлис В.М., Казакова В.А. Порядок разработки машинных технологий для растениеводства // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2021. N6(384). С. 69-73. DOI: 10.24412/2587-6740-2021-6-69-73.

REFERENCES

1. Kosolapov V.M., Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. Forage production and rational nature management. *Adaptive Fodder Production*. 2016. N2. 6-20 (In Russian). EDN: WYMXJX.
2. Lavrov A.V., Zubina V.A. Methodological approaches to assessing the technological need for farm tractors. *Agricultural Engineering*. 2021. N1 (101). 20-26 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-20-26.
3. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Marchenko O.S., Tsench Yu.S. Development of innovative machinery and resource-saving technologies of feed production as the basis of livestock breeding development. *Vestnik of Moscow SAU*. 2017. N6 (82). 23-28 (In Russian). DOI: 10.26897/1728-7936-2017-6-23-28.
4. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V. et al. Improvement of forage lands in central non-black earth zone of Russia by using some integrated approaches. *Plant Science Today*. 2021. Vol. 8. N1. 9-15. DOI: 10.14719/pst.2021.8.1.827.
5. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Justification of tillage methods in the development of fallow lands. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020. Vol. 13. N1 (64). 28-35 (In Russian). DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.1.28.
6. Kosolapov V. Forage production in the development of Russian agriculture. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2010. N4(19). 19-26 (In Russian). EDN: MWCCRT.
7. Kutuzova A.A., Teberdiev D.M., Kosolapov V.M. Energy efficiency of improved technologies and modern systems of bulk feed production of high quality on highlands of the non-chenrozem region. *Fodder Production*. 2021. N7. 3-10 (In Russian). EDN: SATPRC.
8. Popov V.D., Sukhoparov A.I. Assessment of the use of fodder-producing area potential. *AgroEcoEngineering*. 2018. N95. 143-153 (In Russian). DOI: 10.24411/0131-5226-2018-10041.
9. Kosolapov V.M., Chernivskih V.I. Fodder production: state, problems and role of the Federal Williams Research Centre of fodder production and agroecology in their solving. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2022. N36 (4). 5-14 (In Russian). DOI: 10.53859/02352451_2022_36_4_5.
10. Volovik V.T., Shpakov A.S. Scientific and practical basis of rapeseed production in the Central Federal District. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 663. 012020 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/663/1/012020.
11. Shpakov A.S., Brazhnikova T.S. Methods of biologization of grain-grass crop rotations and their influence on fertility of soddy-podzolic soil of the forest zone. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 901. 012030 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/901/1/012030.
12. Shpakov A.S. Alfalfa (*Medicago sativa*) in forage crop rotations of the forest zone. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 901. 012009 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/901/1/012009.
13. Konovalova L.K., Okorkov V.V. Development of classification of agrotechnologies (structural and modular approach). *Modern High Technologies. Regional Application*. 2019. N3(59). 101-112 (In Russian). EDN: LITJVB.
14. Fedorova O.A., Tekushev A.Kh., Chaplygin M.E., Davydova S.A. Technologies and technical means for simplified improvement of forage lands. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2022. N2(66). 404-414 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-50.
15. Marchenko O., Tekushev A. Prospective technologies, types and calculation of the technical means for the production of forages in arid regions of the country. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2019. Vol. 50. N1. 90-93 (In English). EDN: YHZLTA.

16. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12.
17. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S. Agromash machinery complex for processing of fallow land. *Vestnik VIESH*. 2018. N2(31). 40-47 (In Russian). EDN: RXFMCP.
18. Lavrov A.V., Beilis V.M., Kazakova V.A. Procedure for development of machine technologies for crop production. *International Agricultural Journal*. 2021. N6 (384). 69-73 (In Russian). DOI: 10.24412/2587-6740-2021-6-69-73.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Лавров А.В. – обобщение и оформление материалов, предложена новая классификация агротехнологий;
Текушев А.Х. – формирование комплекса машин для различных вариантов агротехнологий производства кормовых культур;
Давыдова С.А. Проведение расчета технико-экономических показателей рассмотренных агротехнологий производства кормовых культур.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Lavrov A.V. – material overview and organisation; proposing a new classification of agricultural technologies;
Tekushev A.Kh. – arranging the machine complexes for various agricultural technologies in forage crop production.
Davydova S.A. – calculation of the technical and economic indicators for the analyzed agricultural technologies in forage crop production.

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

01.07.2024
29.08.2024

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал «Сельскохозяйственные машины и технологии» входит в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям: 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству *AGRIS, RSCI*. Электронные версии журнала размещаются на сайтах Российской универсальной научной электронной библиотеки, Российской государственной библиотеки и Российской книжной палаты.

Статьи, направляемые в журнал для публикации, должны соответствовать основной тематике журнала.

Статьи, поступившие в редакцию, проходят двойное слепое рецензирование. Отрицательная рецензия является основанием для отказа в публикации.

Редакция принимает рукописи и электронные версии статей, набранные в Word шрифтом 14 пт. через 1,5 интервала, объемом 15-20 страниц.

Приведенные в статье формулы должны иметь пояснения и расшифровку всех входящих в них величин с указанием единиц измерения в СИ. Графические материалы должны быть приложены в виде отдельных файлов: фотографии – *jpg* или *tif* с разрешением *300 dpi*, графики, диаграммы – в *eps* или *ai*. Все графические материалы, рисунки и фотографии должны быть пронумерованы, подписаны на русском и английском языках и иметь ссылку в тексте.

Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны символами в редакторе формул *Microsoft Word* без использования специальных редакторов. Не допускается набор: часть формулы символами, а часть в редакторе формул. Если формулы заимствованы из других источников, то не следует приводить в них подробных выводов: авторы формул это уже сделали, повторять их не следует. Ссылки на обозначения формул обязательны. Статья должна содержать не более 10 формул, 3-4 иллюстрации, 3-4 таблицы, размер таблиц не более 1/2 страницы.

В каждой статье должны быть указаны следующие данные:

- название статьи;
- фамилия, имя и отчество автора(ов) полностью;
- e-mail автора(ов), контактный телефон;
- место работы автора(ов) (аббревиатуры не допускаются), почтовый адрес;

- ученая степень, ученое звание автора(ов);
- реферат (объем 200-250 слов);
- ключевые слова;
- библиографический список.

Статью следует структурировать, обязательно указав следующие разделы:

- Введение (актуальность);
- Цель исследования;
- Материалы и методы;
- Результаты и обсуждение;
- Выводы.

Библиографический список (не менее 20 источников из них 3-4 иностранных, входящих в базу данных *Web of Science*, за последние 5 лет) следует оформлять по ГОСТ Р 7.05-2008.

Реферат

Реферат – это самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы.

Объем реферата – 200-250 слов.

Нельзя использовать в реферате аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

На английский язык следует перевести:

- название статьи;
- фамилию, имя, отчество (полностью);
- ученая степень, ученое звание, место работы автора (ов);
- реферат и ключевые слова;
- библиографический список.

Машинный перевод недопустим!

В конце рукописи необходимо указать фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. Приводится на русском и английском языках.

Рукопись статьи должна быть подписана лично авторами. Автор несет юридическую и иную ответственность за содержание статьи.

Несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

Подписку на журнал
можно оформить в агентстве «Урал-Пресс»
на сайте: www.ural-press.ru,
а также в редакции журнала.

Индекс издания **66060**

КОНТАКТЫ:

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01
www.vimsmit.com e-mail: smit@vim.ru

