



Сельскохозяйственные МАШИНЫ и ТЕХНОЛОГИИ

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

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

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

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

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

Перевод – Алексей Алипичев

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

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

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2019

Отпечатано в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Формат 205 x 290 мм
Подписано в печать 29.11.2019
Тираж 500 экз.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайлов

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Виктор Валентинович Альт

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

Христо Иванов Белоев

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

Михаил Никитич Ерохин

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

Юрий Анатольевич Иванов

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

Йошисукэ Кишида

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

Юрий Федорович Лачуга

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

Яков Петрович Лобачевский (ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА)

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

Антонин Махалек

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

Тадеуш Павловски

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

Владимир Дмитриевич Попов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного на-
правления Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Жарылкасын Сарсембекович Садыков

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

Дмитрий Семенович Стребков

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

Юлия Сергеевна Ценч

кандидат педагогических наук, доцент, начальник отдела образования, научно-технической информации и
редакционно-издательской деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва,
Российская Федерация

Вячеслав Иванович Черноиванов

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

SCIENTIFIC-THEORETICAL
JOURNAL

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

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

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

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

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

EXECUTIVE EDITORS:

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

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

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

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

Printed by FSAC VIM

Russian Academy of Science

The format is 205 × 290 mm

The issue was submitted 29.11.2019

The circulation is 500 copies

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNologii]

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

EDITOR-IN-CHIEF

Andrey Yu. Izmaylov

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

EDITORIAL BOARD

Viktor V. Al't

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

Khristo I. Beloev

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

Mikhail N. Erokhin

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

Yuriy A. Ivanov

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

Yoshisuke Kishida

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

Yuriy F. Lachuga

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

Yakov P. Lobachevskiy (DEPUTY EDITOR)

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

Antonin Makhalek

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

Tadeush Pavlovsky

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

Vladimir D. Popov

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

Zharylkasyn S. Sadykov

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

Dmitriy S. Strebkov

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

Yulia S. Tsench

Ph.D.(Ed.), Associate Professor, Head of Publishing Activity, Education and Technical information Department 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



ЭКОЛОГИЯ

- Синдхой Е., Тамм К., Брюханов А.,
Казимир Дж., Уваров Р., Обломкова Н.**
Подкисление жидкого навоза как один из
способов снижения выбросов аммиака. 4

ТЕХНИКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

- Руденко Н.Е., Шматко Г.Г., Руденко В.Н.,
Ануприенко М.А.**
Инновационная дефлекторная
почвообрабатывающая лапа. 11
- Граков Ф.Н., Гриценко А.В., Алябьев В.А.**
Обоснование конструктивной схемы плуга
для снижения энергозатрат основной
обработки почвы. 15
- Гаджиев П.И., Махмутов М.М.,
Алексеев А.И., Махмутов М.М.**
Расчет шага почвообрабатывающей фрезы
с зубцеобразной формой. 21
- Утенков Г.Л., Добролюбов И.П.**
Управление механизированными технологи-
ческими процессами возделывания зерновых
культур. 26

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Ершова И.Г., Васильев А.Н., Поручиков Д.В.**
Экспериментальные исследования
параметров теплоносителя при воздействии
электромагнитным полем сверхвысокой
частоты. 33
- 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. 38

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

- Тошболтаев М.Т., Холиков Б.А.**
Алгоритм подбора модели базового трактора
для формирования тракторного поезда. 46
- Сапьян Ю.Н., Колос В.А., Сулейманов М.И.,
Кабакова Е.Н.**
Оценка и снижение энергозатрат
зерноочистительно-сушильного комплекса. . . 51
- Альчимбаева А.С.**
Оптимизация зернопотоков по маршруту
«поле – ток» в ходе уборки семян зерновых
в Республике Казахстан. 56

ПРЕДПОСЕВНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН

- Забродин В.П., Суханова М.В.**
Анализ процессов взаимодействия семян
с рабочими органами машин предпосевной
обработки циклического действия. 63

ECOLOGY

- Sindhøj E., Tamm K., Bryukhanov A.,
Casimir J., Uvarov R., Oblomkova N.**
Slurry acidification as a tool to reduce ammonia
emissions. 4

MACHINERY FOR SOIL CULTIVATION

- Rudenko N.E., Shmatko G.G., Rudenko V.N.,
Anuprienko M.A.**
Innovative deflector
soil-cultivating paw. 11
- Grakov F.N., Gritsenko A.V., Alyab'ev V.A.**
Determining the structural design
of a plow to reduce energy costs of basic
soil tillage. 15
- Gadzhiev P.I., Makhmutov M.M.,
Alekseev A.I., Makhmutov M.M.**
Calculating the pitch of a serrated-type
rotary tiller. 21
- Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P.**
Controlling mechanized technological
processes of grain crop
cultivation. 26

NEW MACHINERY AND TECHNOLOGIES

- Ershova I.G., Vasiliev A.N., Poruchikov D.V.**
Experimental studies of coolant
parameters when exposed to
electromagnetic field of super-high
frequency. 33
- Marchenko L.A., Artushin 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. 38

PROBLEMS AND DECISIONS

- Toshboltaev M.T., Kholikov B.A.**
Algorithm for selecting a base tractor model to
form a tractor train. 46
- Sapyan Yu.N., Kolos V.A., Suleymanov M.I.,
Kabakova E.N.**
Evaluation and reduction of energy consumption
of grain cleaning and drying equipment. 51
- Alchimbaeva A.S.**
Optimization of grain flows in the
“field – elevator” chain during the harvesting
of grain seeds in the Republic of Kazakhstan. . . 56

SEED PRESOWING TREATMENT

- Zabrodin V.P., Sukhanova M.V.**
Analysis of interaction between seeds
and pre-seeding treatment machines of
cyclic action. 63

Slurry Acidification as a Tool to Reduce Ammonia Emissions

Erik Sindhøj¹,

Ph.D.(Agroecology), chief researcher;

Kalvi Tamm²,

Ph.D.(Agr.), senior researcher;

Aleksandr Bryukhanov³,

Dr.Sc.(Eng.), professor of the Russian Academy of Sciences,
chief researcher, e-mail: sznii@yandex.ru;

Justin Casimir¹,

M.Sc.(Sustainable Development and Environmental
Sciences), researcher

Roman Uvarov³,

Ph.D.(Eng.), researcher;

Natalia Oblomkova³,

researcher;

¹Research Institutes of Sweden (RISE), Uppsala, Sweden;

²Estonian Crop Research Institute, Saku, Estonia;

³Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Ammonia emissions are a worldwide major environmental concern. In 2017, ammonia emissions in the European part of Russia amounted to 80.9 thousand tons, of which up to 56.9 thousand tons came from agriculture. The main source of ammonia in this sector is the farm animal/poultry manure (slurry) utilisation technologies. Slurry acidification technology (SAT) is one of the methods to reduce ammonia emissions. (*Research purpose*) To assess the potential application of this technology in the Russian part of the Baltic Sea catchment area within the North-West Federal District of the Russian Federation. (*Materials and methods*) The area under study included Republic of Karelia, Kaliningrad, Leningrad, Novgorod and Pskov Regions. The authors considered the statistical data on the farm animal stock and the slurry output in the pilot area. The dynamic pattern of pig slurry pH was experimentally determined. The economic efficiency of slurry acidification technology was calculated for two functioning livestock complexes. (*Results and discussion*) According to statistical data, around 11.8 million tons of animal/poultry manure is produced in the pilot area annually, including around 7.4 million tons of slurry, which could potentially be acidified. Three SAT options – in-house, in-storage and in-field application – were considered for the Russian conditions. The main limiting factors for SAR application were identified. The SAT introduction costs and economic benefits were compared. (*Conclusions*) The prospects of SAT introduction in the pilot region were estimated. The need for the integrated research under the Russian conditions involving engineers, biologists, soil scientists, ecologists and other specialists, who could prove the feasibility and economic efficiency of the slurry acidification technology, was established. **Keywords:** manure, slurry, acidification, ammonia emission, North-West Federal District of the Russian Federation.

■ **For citation:** Sindhøj E., Tamm K., Bryukhanov A., Casimir J., Uvarov R., Oblomkova N. Slurry acidification as a tool to reduce ammonia emissions. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 4-10 (In English). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-4-10.

Подкисление жидкого навоза как один из способов снижения выбросов аммиака

Эрик Синдхой¹,

кандидат экономических наук,

главный научный сотрудник;

Кальви Тамм²,

кандидат сельскохозяйственных наук,

старший научный сотрудник;

Александр Брюханов³,

доктор технических наук, профессор Российской
академии наук, главный научный сотрудник;

Джастин Казимир¹,

магистр, исследователь

Роман Уваров³,

кандидат технических наук, исследователь;

Наталья Обломкова³,

исследователь;

¹Научно-исследовательские институты Швеции (RISE), Упсала, Швеция;

²Эстонский научно-исследовательский институт сельскохозяйственных культур, Саку, Эстония;

³Институт инженерных и экологических проблем в сельскохозяйственном производстве – филиал Федерального научно-агроинженерного центра ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Выбросы аммиака представляют собой серьезную проблему для окружающей среды во всем мире. В 2017 году выбросы аммиака в европейской части России составили 80,9 тысяч тонн, из которых до 56,9 тысяч тонн пришлось на сельское хозяйство. Основным источником аммиака в этом секторе являются технологии утилизации навоза животных и птичьего помета (жидкого навоза). Технология подкисления жидкого навоза стала одним из методов снижения выбросов аммиака. *(Цель исследования)* Оценить перспективы применения этой технологии в российской части водосборного бассейна Балтийского моря в пределах Северо-Западного федерального округа Российской Федерации. *(Материалы и методы)* Исследовали территорию, включающую Республику Карелия, Калининградскую, Ленинградскую, Новгородскую и Псковскую области. Авторы рассмотрели статистические данные о структуре поголовья сельскохозяйственных животных и общем количестве (выходе) жидкого навоза в пилотной зоне. Экспериментально определили динамическую картину рН навоза свиней. Рассчитали экономическую эффективность технологии подкисления жидкого навоза для двух действующих животноводческих комплексов. *(Результаты и обсуждение)* Согласно статистическим данным, в пилотной зоне ежегодно производится около 11,8 миллиона тонн навоза и птичьего помета, в том числе около 7,4 миллиона тонн жидкого навоза, который потенциально может быть подкислен. Для российских условий рассмотрели три варианта технологий подкисления жидкого навоза: в стационарных условиях, в период хранения и в полевых условиях. Определили основные ограничивающие факторы для применения технологии подкисления жидкого навоза. Сопоставили затраты на внедрение технологии подкисления жидкого навоза и рассчитали экономическая эффективность. *(Выводы)* Оценили перспективы внедрения технологии подкисления жидкого навоза в пилотном регионе. Установили необходимость проведения комплексных исследований в российских условиях с участием инженеров, биологов, почвоведов, экологов и других специалистов, которые могли бы доказать целесообразность и экономическую эффективность технологии подкисления жидкого навоза.

Ключевые слова: навоз, жидкий навоз, подкисление, выбросы аммиака, Северо-Западный федеральный округ Российской Федерации.

Для цитирования: Синдхой Е., Тамм К., Брюханов А., Казимир Дж., Уваров Р., Обломкова Н. Подкисление жидкого навоза как один из способов снижения выбросов аммиака // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. № 4-10. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-4-10.

In recent years, the need to improve the environmental compliance of production has become increasingly important. Owing to higher intensification, substantially more products are produced. At the same time, the increased pressure is being placed on the environment, with agriculture contributing greatly in this respect: agricultural facilities account for above 80% of ammonia emissions [1, 2]. According to the European statistics, the total ammonia emission in the EU countries steadily increased from 2012 to 2017, primarily, due to more intensive agricultural sources (Fig. 1).

The current Russian agriculture features the strong growth associated with the importance to ensure the food security of the country. In 2017, ammonia emissions in

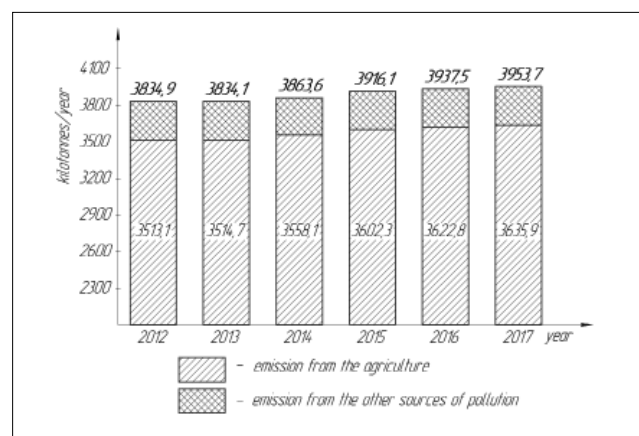


Fig. 1. Ammonia emissions in EU countries in 2012-2017 (Data from Centre on Emission Inventories and Projections – CEIP)

the European part of Russia amounted to 874.5 thousand tons against 793.7 thousand tons in 2012, of which up to 748.9 thousand tons came from agriculture against 692.0 thousand tons in 2012 (Fig. 2).

At the present time, the transition to the best available technologies (BAT) system as a tool to minimize the adverse environmental effect of livestock farming is underway in Russia. In farming, the animal/poultry manure utilization processes pose the main threat to the ecological balance. Available practices to reduce emissions during animal/poultry manure processing and spreading (covered storages, timely incorporation of organic fertilizers after

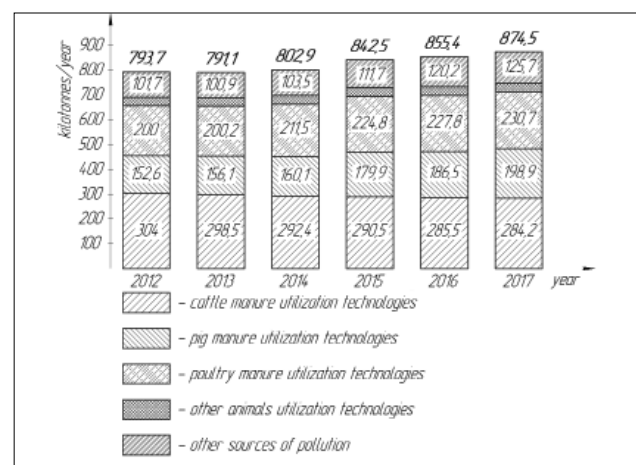


Fig. 2. Dynamic pattern of ammonia emissions from various sources in the European part of Russia in 2012-2017 (Data from CEIP)

their surface spreading, extensive use of injectors, etc.) cannot dramatically change the situation as they are not used widely enough [3, 4].

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM is an active participant in international projects aimed at improving the environmental compliance of agricultural production. The Institute regularly studies the foreign experience on existing and emerging practices for reducing emissions associated with agricultural organic waste processing.

Slurry acidification is one of the promising technologies for reducing ammonia emissions associated with agricultural waste processing. In recent years, this technology is becoming increasingly common in the Nordic countries. It was first proposed by S.C. Jarvis and B.F. Pain in 1990, who found that under pH values close to 5, the ammonia emission from the slurry did not exceed 1-2% [5]. The studies of various types of slurry revealed the sulfuric acid (H_2SO_4) with the concentration above 94% to be the most suitable substance for lowering slurry pH [6].

In 2016-2019 EU Interreg Baltic Sea Region project “Baltic Slurry Acidification” was implemented by 20 teams from Baltic Sea countries, with the main objective being to promote the implementation of slurry acidification techniques (SATs) throughout the Baltic Sea Region to reduce the airborne eutrophication and to create a more competitive and sustainable farming sector. Russia and Belarus were invited to participate in the project to identify the possibility of using SATs in these countries.

THE RESEARCH PURPOSE is to assess the perspectives of slurry acidification in Russia in the case study of the Russian part of the Baltic Sea catchment area within the North-West Federal District of the Russian Federation.

MATERIALS AND METHODS. The Russian part of Baltic Sea catchment area was chosen as the pilot region since the geographical and climatic conditions are much similar to other Baltic countries, which carried out a similar assessment in the framework of the Baltic Slurry Acidification project [7]. The pilot region included the Republic of Karelia, Kaliningrad, Leningrad, Novgorod, and Pskov Regions (Fig. 3). As of the end of 2017, the pilot region housed 2,345 thousand head of cattle, 15 thousand head of sheep and goats, over 39 million head of poultry and above 1,300 thousand head of pigs. The animal and poultry stock produced in total about 11.8 million tons of animal/poultry manure, of which 7.4 million tons (62%) were slurry and could potentially be acidified.

The economic assessment of SAT was carried out for two pig-rearing enterprises in the pilot region. The assessment results were compared with the economic effect calculated by Estonian Crop Research Institute for a pig farm in Estonia.

Experimental studies were carried out in the analytical laboratory of IEEP. The physical and chemical composition of the test samples was determined in accordance with the

relevant State Standards in force in Russia. The obtained experimental data were processed by the methods of mathematical statistics.

The economic efficiency of SAT applied on a particular operating farm was calculated using a mathematical model developed by the Estonian Crop Research Institute in the framework of Baltic Slurry Acidification project [8]. The environmental impact fee was calculated following the methodology of Research Institute for Atmospheric Air Protection (Russia). The pollution fee for atmospheric ammonia emissions from manure processing facilities is calculated by the gross ammonia emission from manure during the processing and the established payment rates for ammonia emissions into the air from stationary sources by the formula [9]:

$$P_{NH_3} = G_{NH_3} \cdot S_{NH_3}, \quad (1)$$

where G_{NH_3} – gross ammonia emission into the atmospheric air from the processing, t/year;

S_{NH_3} – payment rate for ammonia emissions into the air from stationary sources 1.95 euros/t.

The gross emission of ammonia during the processing of raw pig slurry is calculated by the formula:

$$G_{NH_3} = 31.5 \cdot 10^{-6} \cdot q_{av} \cdot y_H \cdot K_d, \quad (2)$$

where G_{NH_3} – gross ammonia emission into the atmospheric air from the processing, t/year;

q_{av} – average filling of manure storage facilities per year, t;

y_H – specific ammonia emissions from pig manure into the air, microgram/t dry matter;

K_d – wet to dry matter conversion factor;

$31.5 \cdot 10^{-6}$ – conversion factor of microgram/s to t/year.

The gross emission of ammonia during the processing of the liquid fraction of pig slurry is calculated by the formula (3):

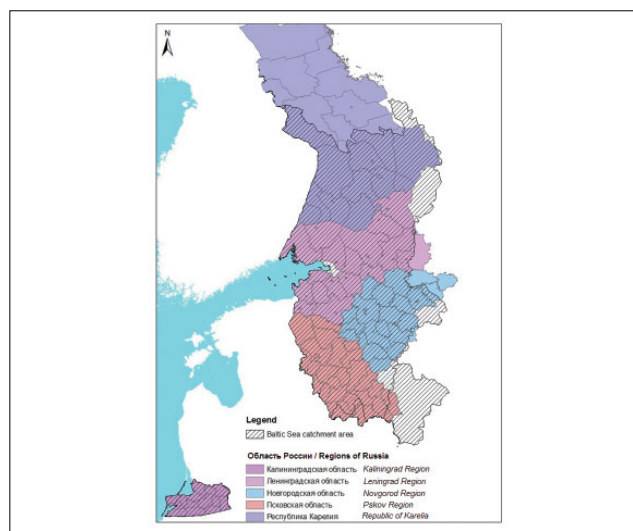


Fig. 3. The pilot region for assessing the potential application of SATs in Russia – the Russian part of the Baltic Sea catchment area

$$G_{NH_3} = 31.5 \cdot \sum_{n=1}^{N_u} P_n M_{n,i,j} \quad (3)$$

where N_u – the number of selected gradations of the average wind speed u related to the standard height of the weather vane $z_\phi = 10$ m;

P_n – dimensionless (in fractions from 0 to 1), repeatability of n -th gradation of wind speed;

$M_{n,i,j}$ – emission rate of the substance in question from the j -th source for the concentration and the average wind speed u , assumed to be equal to the mid-point of the n -th gradation, g/s;

31.5 – conversion factor of g/s to t/year.

RESULTS AND DISCUSSION. The main slurry processing technique in the region under consideration is the long-term storing (maturing) – above 90% of agricultural enterprises consider it as a basic slurry utilisation technology. The widespread use of this technique would make it possible to introduce SAT in the storage facilities with their minor reconstruction. However, the specific national feature is that manure storages are much larger than those used in the Baltic Sea countries; therefore, the homogenization of acidified slurry would be challenging.

About 90% of the liquid organic fertiliser produced from slurry are applied by spraying. In 2012-2017, the share of band spreading increased significantly from 2% to 9% of the total liquid fertilisers applied. The remaining application techniques account for 3-4% (Fig. 4). Above 60% of the liquid fertilizers are applied for supplementary fertilization of perennial grasses; 40% of the liquid fertilisers are applied during the ploughing before the perennial and arable crops seeding and incorporated within 1-2 hours after application.

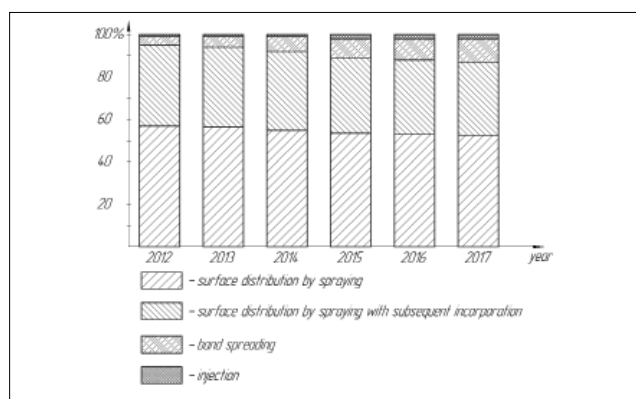


Fig. 4. Share of different application techniques of the liquid organic fertilizers produced from slurry in the pilot region (Data from CEIP)

Three options of SAT are distinguished [6, 10]:

- In-house acidification: the sulfuric acid is added to slurry in a covered treatment tank outside the livestock house under stirring to reach a fixed pH level of 5.5. Part of acidified slurry is returned to slurry channels, where it mixes with the new slurry, and part is discharged to the

storage. The average application rate of the acid is 3-4 litres per one ton of slurry.

- In-storage acidification: the acid is added to the storage tank or lagoon under heavy mixing to reach a pH level of 6. Much foam is produced upon the addition, and its removal is the main constraint of this acidification option. The entire amount of slurry may be acidified in the main storage or a part of it is intensively acidified in the buffer tank and mixed with the slurry in the main storage. The acid consumption is 2-3 litres per one ton of slurry.

- In-field acidification of the slurry: the acid is added to the slurry immediately before the soil application, in a static mixer installed in the output of the slurry tanker. The acid consumption is 1.5-2.5 litres per one ton of slurry to reach the pH of 6.4.

SAT is widely used in Denmark. Today, about 16% of all slurry produced in Denmark is SAT-processed [11]. During the field trials in Sweden in 2016-2017, the acidified slurry application contributed to 22.2% higher green mass yields compared to reference and 8.6% higher green mass yields compared to the non-acidified slurry application [12, 13]. This increase is owing to better nitrogen saving in the acidified slurry, and, accordingly, its greater nutritional value.

Our studies showed that under conditions of the North-West Federal District of the Russian Federation the in-field acidification was the most technically feasible technique, however it required the substantial upgrading of the available machine and tractor fleet [14]. The increased wear of equipment, associated with the high acidity of applied slurry, and higher qualification requirements for the personnel involved should be taken into account as well. The main challenge in introducing this slurry acidification technique may be the serious safety requirements for transportation and use of aggressive acids, sulfuric acid included.

The in-house acidification is also challenging, as on the operating livestock farms the pumping of slurry back to the livestock house is not technically feasible. Moreover, there are several regulatory restrictions to this process. However, in some special cases, for example, when a flash-flume system is used, this technique can be successfully implemented.

The next stage of the work was the laboratory analysis of pig slurry samples, their physical and chemical composition (Tab. 1). Sample 1 was non-separated pig slurry taken at the exit from the pig house; Sample 2 was the liquid fraction

Table 1 PHYSICAL AND CHEMICAL COMPOSITION OF THE SLURRY SAMPLES UNDER STUDY		
Indicators	Sample 1	Sample 1
Dry matter, %	13.0	3.5
pH	8.1	6.4
N_{total} content, %	0.840	1.540
Including ammonium nitrogen	0.495	0.477

of the pig slurry taken at the outlet of the separator. The samples were taken within 48 hours prior to the study.

The dry matter content in the test samples was determined by drying in accordance with the State Standard GOST 26713-85 "Organic fertilizers. Method for determination of moisture and dry residue"; the acidity (pH) was determined using Expert-001 3 (01) fluid analyzer in accordance with the State Standard GOST 27979-88 "Organic fertilizers. pH determination method"; N_{total} content was determined by the photometric method in accordance with the State Standard GOST 26715-85 "Organic fertilizers. Methods for determination of total nitrogen"; the ammonium nitrogen content was determined using an Expert-001 3 (01) fluid analyzer in accordance with the State Standard GOST 26716-85 "Organic fertilizers. Methods for determination of ammonium nitrogen".

To reduce slurry pH to 5.5, the sulphuric acid with 96% concentration was added to Sample 1 at the rate of 3.7 l/m^3 , and to Sample 2 at the rate of 1.2 l/m^3 . (Fig. 5).

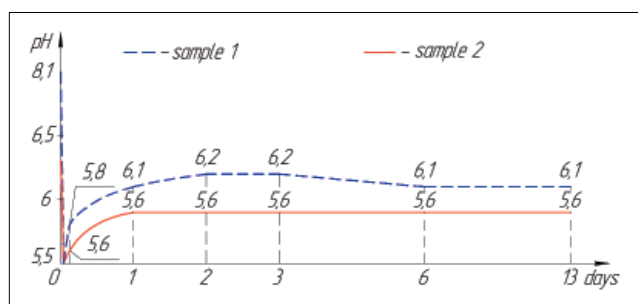


Fig. 5. Pattern of pig slurry pH change during the experimental study

A gradual pH increase was observed during the first day up to 6.1 (Sample 1) and 5.9 (Sample 2). No significant fluctuations were observed during the rest 12 days. This may support the assumption about the key role of the uniform acid distribution over the entire volume of the treated slurry in order to eliminate or minimize the re-acidification. The higher pH of Sample 1 after acidification was caused by the higher dry matter content of slurry compared to Sample 2 (Tab. 1). The dry matter has pH buffering effect after the slurry acidification.

A decrease in the ammonia emission was also established. However, additional research is required over a longer time-period to obtain the reliable data. At the same time, significant foaming when adding the acid to the slurry should be considered. This occurs, presumably, as a result of gas emission during the decomposition of carbonates. This issue also requires additional investigations.

To estimate the annual economic effect of the in-storage SAT application, the ECRI mathematical model was used. This effect is based on the condition that SAT application will save more nitrogen in the organic fertilizer and increase the sulfur content, thereby reducing the purchasing costs of relevant mineral fertilisers. The annual economic effect was calculated for the entire technological chain: animal

housing system, slurry storage and processing systems, and slurry application technique (Tab. 2).

The estimated economic effect of SAT introduction is defined as the difference between the costs related to preparation and application of organic and mineral fertilizers in order to obtain the target yields by the traditional technology and using an additional slurry acidification unit. At the same time, the SAT introduction costs are offset by the reduced requirement for nitrogen and sulfur application with the mineral fertilizers through the lower loss of ammonium nitrogen and higher sulfur content in the slurry. Nitrogen loss reduction and corresponding slurry nitrogen content increase is calculated for the entire production cycle with due account for the applied environmental measures, for example, covered storages, slurry injection, etc.

The economic effect of the in-storage SAT introduction was calculated for two Russian pig-rearing complexes.

The first pig complex had the animal stock of 105,000 head and the complete production cycle including the long-term slurry storing (maturing) in film lagoons. The complex applies the technology of non-separated (raw) pig slurry processing. The estimated SAT introduction costs would be 122,375 euros per year. According to formulas (1) and (2), the pollution fee is 164 euros per year that is 747 times lower than the SAT introduction costs.

The second pig complex had the animal stock of 108,000 head and the complete production cycle, with the slurry being separated into fractions and the long-term storing (maturing) of the liquid fraction in concrete lagoons and the passive composting of the solid fraction in piles. The estimated SAT costs of the liquid fraction would be 42,689 euros per year. According to formulas (1) and (3), the pollution fee is 8.88 euros per year, i.e. 4,800 times lower than the SAT introduction costs [15].

The results obtained were compared with the similar calculation for a pig farm in Estonia made by Estonian Crop Research Institute. The cost-effectiveness of SAT calculated for a fattening pig farm with the animal stock of 40,000 head located in Estonia and governed by EU Directives amounted to 44,000 euros per year achieved, primarily, by reducing the cost of mineral fertilizers purchased.

CONCLUSIONS

The study performed in IEEP – FSAC VIM demonstrated the certain promise of the slurry acidification technology application under conditions of the pilot region, where 7.4 million tons of slurry are produced annually. The available material and technical facilities allow for SAT introduction if they are upgraded.

According to the preliminary analysis of the situation in the agricultural sector and current relevant legislation, the in-storage and in-field slurry acidification options had more prospects for the introduction. The economic efficiency estimation, however, revealed the lower cost of mineral fertilizers purchased for crop and fodder production to be the key factor affecting the SAT attractiveness. When the

Table 2

Table 2		
ESTIMATION THE ECONOMIC EFFECT OF SAT INTRODUCTION		
Indicators	Values	
	Russian Federation	Estonia
Capital costs of SAT introduction	ØrumSmeden equipment set, which is a system for the acid supply from the tank to the storage; mounted on a mixer.The cost is 14,000 euros per set	
Operating costs:		
maintenance costs	60 euros per year	60 euros per year
labour costs of service personnel	at a wage rate of 3.6 euro per hour, the labour costs to process 1 m ³ of slurry are 0.002 euros	at a wage rate of 7.39 euro per hour, the labour costs to process 1 m ³ of slurry are 0.005 euros
fuels, lubricants and electricity costs associated with slurry acidification	0.36 euros per 1 m ³ of slurry	0.59 euros per 1 m ³ of slurry
Other costs:		
purchase costs of work clothes, protective devices	160.55 euros per year	160.55 euros per year
additional costs associated with slurry storage*	0.01 euros per 1 m ³ of slurry	0.01 euros per 1 m ³ of slurry
purchase and transportation costs of nitrogen-containing mineral fertilisers	523 euros per ton of mineral fertiliser nitrogen	720 euros per ton of nitrogen within mineral fertilisers
purchase and transportation costs of sulfur-containing mineral fertilisers	150 euros per ton of mineral fertiliser sulphur	148 euros per ton of mineral fertiliser sulphur
additional soil liming costs**	20 euros per ton of dolomitic meal	16.7 euros per ton of lime
sulfur acid purchase costs associated with slurry acidification	0.155 euros per litre of acid	0.216 euros per litre of acid
* Due to intensive foaming, the additional storage volume is to be provided for when constructing the storage facilities that increases the maintenance costs of the operating storage;		
** Theoretically, 1 to 1.8 kg of lime per liter of acid consumed is required depending on the soil type. The actual need for liming also depends on the soil properties. The project field experiment results did not show the significant soil acidification due to the use of acidified slurry		

primary objective of the farm is to utilize the manure produced without the possibility of growing a part of the fodder on its own fields, the SAT costs are many times higher than the economic effect of lower pollution fees.

Along with the advantages of SAT introduction, several limiting factors should be noted:

- stricter requirements for working with especially hazardous substances and precursors, namely sulfuric acid;
- the need for additional liming of soils at the estimated rate of 1.0-1.8 kg of lime per 1 liter of acid.

Taking into account the current environmental legislation and the low interest of livestock enterprises in the more efficient use of organic fertilizer nitrogen produced, SAT introduction seems somewhat premature in Russia. The

positive experience of using this technology in the EU countries, however, allows attributing SATs to the realizable technologies. The transition to BAT system, which would govern the activities of large-scale pig and cattle complexes in Russia, suggests that in the near future, the interest in such technologies should increase. At the moment, the livestock complexes are more concerned about the reduction of odorous emissions than in lower nitrogen loss.

As Russia does not have the experience in SAT application so far, the integrated research is required under the Russian conditions involving engineers, biologists, soil scientists, ecologists and other specialists who could prove the feasibility and economic efficiency of this slurry treatment technique.

REFERENCES

1. Paulot F., et al. Ammonia emissions in the United States, European Union, and China derived by high-resolution inversion of ammonium wet deposition data: Interpretation with a new agricultural emissions inventory (MASAGE_NH3). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. Vol. 119. Issue 7. 4343-4364 (In English).
2. Kang Y., et al. High-resolution ammonia emissions inventories in China from 1980 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 16. Issue 4. 2043-2058 (In English).
3. Vasil'ev E.V., Briukhanov A.Yu., Kozlova N.P. Otsenka effektivnosti nailuchshikh dostupnykh tekhnologiy dlya intensivnogo zhivotnovodstva [Effectiveness assessment of Best Available Techniques for intensive livestock production]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016. N88. 131-142 (In Russian).
4. Komlatsky V.I. Nailuchshie dostupnye tekhnologii kak element ekologicheskoy modernizatsii svinovodstva [Best Available Technology as an element of ecological modernization of pig-breeding]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2017. N126(02). 1-18 (In Russian).
5. Jarvis S.C., Pain B.F. Ammonia emission from agricultural

land. Proceedings Fertility Society. Peterborough, England: Greenhill House. 1990. N298. 35 (In English).

6. Fanguero D., Hjorth M., Gioelli F. Acidification of animal slurry – a review. Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 149. 46-56 (In English).

7. Market potential analysis: Slurry acidification technologies in the Baltic Sea Region. Eds: Neumann S., Zacharias M., Stauss R., Foged H. Uppsala, Sweden: RISE. 2017. 140 (In English).

8. Economic analyses of using of slurry acidification technologies in BSR region. Eds: Tamm K., Vettik R. Saku, Estonia: ECRI. 2019. 223 (In English).

9. Rekomendatsii po raschetu vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot obektov zhivotnovodstva i ptitsevodstva [Recommendations to calculate atmospheric pollutant emissions from the objects of animal and poultry production]. Saint Petersburg: JSC «SRI Atmosphere». 2015. 40 (In Russian).

10. Joubin M. Animal slurry acidification: effects of slurry characteristics use of different acids, slurry pH buffering. Uppsala, Sweden: RISE. 2018. 40 (In English).

11. Hansen M.N., Knudsen L. Notat om anvendelse af gylle-forsuring i Dansk landbrug [Memo about the use of slurry acidification in Danish farming]. Potentielle miljøeffekter ved anvendelse af forsuret gylle på landbrugsjord. 2017. 126 (In Danish).

12. Seidel A., et al. Effects of acidification and injection of pasture applied cattle slurry on ammonia losses, N₂O emissions and crop N uptake. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2017. Vol. 247. 23-32 (In English).

13. WP4 Field Trials: Methodology, collection of results and Partners' practical experiences 2016-2018. Lithuania, Vilnius: LAAS. 2018. 206 (In English).

14. Uvarov R.A., Oblomkova N.S., Ponomarev M.A. Analiz vozmozhnostey primeneniya tehnologii podkisljeniia zhidkogo navoza dlya Severo-Zapada Rossii [Feasibility study of slurry acidification technology for the North-West of Russia]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. N97. 261-269 (In Russian).

15. Uvarov R.A., Oblomkova N.S., Freidkin I.A., Ogluzdin A.S. Analiz ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya tehnologii podkisljeniia zhidkogo navoza (SAT) v Rossii [Analysis of economic efficiency of application of slurry acidification technologies in Russia]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019. N98. 224-236 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 07.10.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 07.10.2019

Статья принята к публикации 01.11.2019
The paper was accepted
for publication on 01.11.2019

Инновационная дефлекторная почвообрабатывающая лапа

Николай Ефимович Руденко¹,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор;
Геннадий Геннадьевич Шматко¹,
кандидат технических наук, доцент;

Валерий Николаевич Руденко²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: rudinko@yandex.ru;
Максим Алексеевич Ануприенко¹,
магистрант, e-mail: anuprienko_maksim@mail.ru

¹Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация;

²Астраханский государственный университет, г. Астрахань, Российская Федерация

Реферат. При посеве большинство сошников сеялок входят в почву сверху. Они встречают твердые комья почвы, подсакивают, изменяя глубину заделки семян. Некоторые семена выбрасываются на поверхность. В результате снижается посевная всхожесть, а значит, и урожайность. (*Цель исследования*) Разработать инновационную почвообрабатывающую стрелчатую лапу, исключающую отбрасывание почвы и формирование невыровненной поверхности, а также повышающую производительность культиватора. (*Материалы и методы*) Определили установочные параметры разработанной дефлекторной стрелчатой лапы с привлечением математического аппарата и учетом требований, предъявляемых к рабочим органам почвообрабатывающих агрегатов. (*Результаты и обсуждение*) Разработали инновационную дефлекторную стрелчатую лапу. Расположили дефлектор треугольной формы над лемехом. Определили оптимальный угол наклона дефлектора в горизонтальной плоскости – 15-25 градусов, а высота установки стрелчатой лапы над лезвием – в 1,5 раза превышает глубину обработки почвы. Выяснили, что задняя часть дефлектора, имеющая зубчатую форму и изогнутая вниз, позволяет измельчать почву, формируя мелкокомковатую структуру. Показали, что почва, перемещаясь по дефлектору, при столкновении с изогнутой частью возвращается на поверхность, закрывая и выравнивая образовавшуюся борозду. Треугольная форма стойки между лемехом и дефлектором существенно снижает забиваемость сошников растительными остатками. (*Выводы*) Доказали, что выровненную поверхность почвы с мелкокомковатой структурой верхнего слоя можно получить, используя дефлекторную стрелчатую лапу, что исключает применение катков. При этом уменьшаются материалоемкость культиватора, расход топлива, а производительность повышается на 50 процентов в результате увеличения скорости обработки почвы до 18 километров в час.

Ключевые слова: предпосевная обработка почвы, сошник, стрелчатая лапа, дефлектор, культивация почвы, угол крошения, глубина обработки почвы.

■ Для цитирования: Руденко Н.Е., Шматко Г.Г., Руденко В.Н., Ануприенко М.А. Инновационная дефлекторная почвообрабатывающая лапа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 11-14. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-11-14.

Innovative Deflector Soil-Cultivating Paw

Nikolay E. Rudenko¹,
Dr.Sc.(Agr.), professor;
Gennadiy G. Shmatko¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor;

Valeriy N. Rudenko²,
Ph.D.(Eng.), associate professor;
Maksim A. Anuprienko¹,
undergraduate

¹Stavropol State Agricultural University, Stavropol, Russian Federation;

²Astrakhan State University, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. When planting, most planters coulters enter the ground from the top. They meet hard clods of soil, jump, changing the depth of planting seeds. Some seeds are thrown to the surface. As a result, the sowing germination, as well as yield, decreases. (*Research purpose*) To develop an innovative soil-cultivating pointed paw, eliminating the rejection of soil and the formation of unevenness of the surface, as well as increasing the productivity of the cultivator. (*Materials and methods*) The authors determined the setting parameters of the developed deflector pointed paw with the involvement of mathematical device and taking into account the requirements for the working bodies of soil-cultivating units. (*Results and discussion*) The authors developed an innovative deflector pointed paw. A triangular deflector was placed over the ploughshare. They determined the optimal angle of

deflector inclination in the horizontal plane-15-25 degrees, and the height of the installation of the pointed paw over the blade- in 1.5 times above the depth of soil cultivation. It was found that the rear part of the deflector, which has a serrated shape and curved down, allows to grind the soil, forming a small-lumpy structure. It was shown that the soil, moving along the deflector, in collision with the curved part returns to the surface, closing and leveling the formed furrow. The triangular shape of the rack between the ploughshare and the deflector significantly reduces the clogging of coulters with plant residues. (*Conclusions*) The authors proved that the leveled soil surface with a finely lumpy structure of the top layer can be obtained using a deflector pointed paw, which eliminates the use of rollers. This reduces the material consumption of the cultivator, fuel consumption, and productivity increases by 50 percent as a result of increasing the speed of soil cultivation to 18 kilometers per hour.

Keywords: paw, deflector, soil cultivation, angle of ploughshare dyeing, depth of soil processing.

In citation: Rudenko N.E., Shmatko G.G., Rudenko V.N., Anuprienko M.A. Innovatsionnaya deflektornaya pochvoobrabatyvayushchaya lapa [Innovative Deflector Soil-Cultivating Paw]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. C. 11-14 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-11-14.

Для поверхностной обработки почвы используют культиваторы, оснащенные стрельчатыми лапами с углом крошения 12-18° [1]. В процессе работы стрельчатая лапа отбрасывает почву, рыхлит ее, частично крошит комки. После стандартной стрельчатой лапы остается невыровненная крупнокомковатая поверхность почвы, степень крошения не превышает 40-45% [2]. При этом образуются бороздки, поверхность почвы не выровнена.

Поэтому в агрегате с культиватором ставят катки разных модификаций. После работы культиватора с катками поверхность поля остается выровненной, комки почвы не разрушены, а вдавлены в нижележащий слой. Располагаясь сверху, они подсыхают и приобретают повышенную твердость.

Большинство используемых сошников сеялок (дисковые, килевидные, полозовидные) входят в почву сверху. Попадая на комки почвы, они подскакивают, изменяя глубину заделки семян. Иногда семена попадают на поверхность, снижается их полевая всхожесть, а значит и урожайность [3, 4].

Необходимо улучшить качество предпосевной обработки почвы. Это обеспечивают дефлекторы, установленные на культиваторе над стрельчатыми лапами.

Рабочая скорость движения культиватора при работе со стандартными стрельчатыми лапами не превышает 12 км/ч.

Цель исследования – разработать инновационную почвообрабатывающую стрельчатую лапу, исключаящую отбрасывание почвы, формирующую выровненную поверхность, а также повышающую производительность культиватора [5].

Материалы и методы. Определили установочные параметры дефлекторной стрельчатой лапы с привлечением математического аппарата и учетом требований, предъявляемых к рабочим органам почвообрабатывающих агрегатов.

Результаты и обсуждение. Дефлекторная стрельчатая лапа (рис. 1) включает стойку, к которой закреплен нижний стрельчатый лемех, имеющий угол крошения α (рис. 1а). Над ним установлен дефлектор 3 в ви-

де равносоставленного треугольника (рис. 1б). Концевая часть треугольника отогнута вниз и выполнена зубчатой. Регулировка установки дефлектора по высоте и углу наклона выполняется с помощью крепления. Кроме того, в нижней части между лемехом и дефлектором профиль стойки имеет форму треугольника.

Технологический процесс обработки почвы осуществляется следующим образом. Стрельчатые лапы с определенным углом крошения подбрасывают почву вверх, и она ударяется о дефлектор. Часть энергии, полученной почвой, идет на ударное воздействие, а другая – на перемещение почвы вдоль дефлектора. Отогнутая задняя часть дефлектора гасит скорость перемещения потока почвы и направляет его вниз. Почва возвращается на поверхность, заделывая образованную стрельчатой лапой бороздку и выравнивая поверхность. Зубчатая часть измельчает почву, доводя ее до мелкокомковатой структуры.

Высота h_n установки дефлектора над лезвием нижнего лемеха коррелирует с высотой отбрасывания l подрезанной нижней лемехом почвы: $h_n < l$ [6]:

$$l = \frac{V^2(1-f)}{2g}, \text{ м}, \quad (1)$$

где V – рабочая скорость культиватора, м/с;

f – коэффициент трения почвы по поверхности лемеха.

При $V = 9$ км/ч (2,5 м/с) и $f = 0,4$;

$$l = \frac{2,5^2 \cdot (1-0,4)}{2 \cdot 9,8} = 0,2 \text{ м}.$$

Чтобы использовать энергию удара для разрушения комков, высота установки дефлектора от лезвия стрельчатого лемеха не должна превышать 0,51. Следовательно, $h_n \geq 1,5h_0$, где h_0 – глубина обработки почвы, м. Например, при глубине обработки $h_0 = 0,08$ м высота установки дефлектора $h_n = 1,5h_0 = 0,12$ м.

Угол наклона дефлектора β подбирают исходя из гранулометрических свойств и состояния почвы в конкретных полевых условиях [7].

Для расчета угла наклона задней отогнутой части дефлектора необходимо соблюдение условия свободного схода почвы с внутренней поверхности:

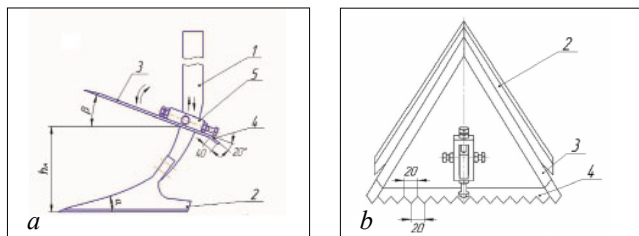


Рис. 1. Дефлекторная стрелчатая лапа:

a – вид сбоку; *b* – вид сверху

1 – стойка; 2 – стрелчатый лемех; 3 – дефлектор; 4 – отогнутая часть дефлектора; 5 – держатель; α – угол крошения на нижней стрелчатой лапе; β – угол наклона дефлектора; h_n – высота установки дефлектора

Fig. 1. Deflector pointed paw:

a – side view; *b* – top view

1 – stand; 2 – pointed ploughshare; 3 – deflector; 4 – bent part of the deflector; 5 – holder; α – angle of crumbling on the lower pointed paw; β – angle of deflector inclination; h_n – height of the deflector

$$\delta < \varphi$$

где δ – угол отгиба концевой части, град.;

φ – угол трения почвы о стальную поверхность, град.

При $\varphi = 22^\circ$ принимаем $\delta < 20^\circ$.

Длину отогнутой части определяем исходя из равенства:

$$F_n b \sin \delta = F_{тр} l_0,$$

где F_n – усилие на перемещение почвы вдоль дефлектора, Н;

b – расстояние перемещения почвы по дефлектору после стойки, м;

$F_{тр}$ – сила трения почвы по поверхности дефлектора, Н;

l_0 – ширина отогнутой концевой части дефлектора, м.

Отсюда:

$$l_0 = \frac{F_n b \sin \delta}{F_{тр}};$$

$$F_{тр} = f F_n;$$

$$l_0 = \frac{F_n b \sin \delta}{F_n f} = \frac{b \sin \delta}{f}; \quad (2)$$

При значениях $b = 0,05$ м; $f = 0,4$; $\delta = 20^\circ$ определим ширину отогнутой части:

$$l_0 = \frac{0,05 \cdot \sin 20^\circ}{0,4} = 0,0425 \text{ м.}$$

Принимаем ширину отогнутой концевой части дефлектора равной 40-45 мм.

Поскольку при обработке почвы до 80% комков должны иметь размер менее 20 мм [8], размер зубьев концевой части принимаем равным 20 мм.

Треугольная форма стойки обеспечивает снижение зависания на ней растительных остатков.

При работе стойки прямоугольного сечения силы смещения F_c , обусловленные трением о почву и дефлектор, с боковых сторон стойки одинаковы, поэтому растительность зависает на ней (рис. 2).

В случае треугольной формы силы воздействия на

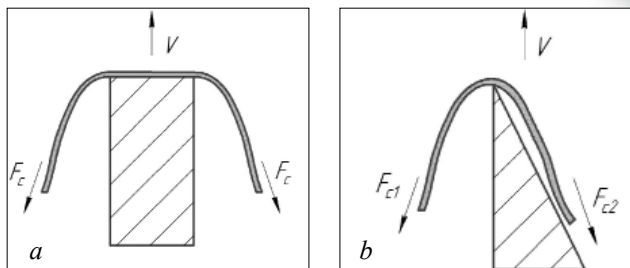


Рис. 2. Схема взаимодействия растительности в зависимости от формы стойки:

a – прямоугольная; *b* – треугольная;

F_c – силы смещения растительных остатков вдоль стойки и дефлектора, Н

Fig. 2. The scheme of interaction of vegetation depending on the rack shape:

a – rectangular; *b* – triangular;

F_c – forces of displacement of plant residues along the rack and deflector, Н

растительные остатки с боковых сторон стойки F_{c1} и F_{c2} различаются. В результате, растительность будет легче сходить со стойки и меньше забивать ее.

Кроме того, треугольная стойка в процессе движения разрезает часть растительных остатков.

Энергия отбрасывания подрезанной почвы W_0 (Дж) расходуется на энергию удара почвы о дефлектор W_y и на энергию, затраченную на перемещение почвы вдоль дефлектора W_n .

Энергия удара равна:

$$W_y = W_0 \cos \beta, \quad (3)$$

где β – угол установки дефлектора к горизонтальной плоскости, град.

Определим энергию отбрасывания [9]:

$$W_0 = \frac{m V^2}{2} (1 - f), \text{ Дж} \quad (4)$$

где m – масса отбрасываемой почвы, кг.

Массу отбрасываемой почвы находим по формуле:

$$m = \frac{S_n h_0 \rho}{\sin \gamma}, \text{ кг}, \quad (5)$$

где S_n – площадь стрелчатого лемеха, м²;

ρ – объемная масса почвы, кг/м³;

γ – половина угла раствора лезвий лемеха, град.

Вычислим этот показатель при $S_n = 0,02$ м²;

$h_0 = 0,08$ м; $\rho = 1000$ кг/м³; $\gamma = 30^\circ$:

$$m = \frac{0,02 \cdot 0,08 \cdot 1000}{\sin 30} = 3,2 \text{ кг.}$$

Отсюда:

$$W_0 = \frac{3,2 \cdot 2,5^2}{2} \cdot 0,60 = 6,0 \text{ Дж.}$$

Энергия, затраченная на перемещение почвы вдоль дефлектора, равна:

$$W_n = W_0 - W_y.$$

Для угла установки дефлектора $\beta = 18^\circ$:

$$W_y = W_0 \cdot \cos \beta = 6,0 \cdot 0,95 = 5,7 \text{ Дж;}$$

Следовательно:

$$W_{\pi} = 6,0 - 5,7 = 0,3 \text{ Дж.}$$

Таким образом, большая часть энергии идет на ударное воздействие почвы о дефлектор.

Выводы. Конструкция дефлекторной почвообрабатывающей лапы позволяет дополнительно использовать энергию отбрасывания почвы, возникающую при перемещении, для ударного воздействия на комки и их разрушения.

Использование регулируемого по углу наклона и

высоте дефлектора с отогнутой на угол 20° концевой частью шириной 40 мм и зубчатой кромкой с размерами зубьев 20 мм позволяет повысить степень крошения почвы при скорости 16-18 км/ч в 2 раза (до 90%).

В результате применения дефлекторной почвообрабатывающей лапы получают выровненную поверхность почвы с мелкокомковой структурой верхнего слоя почвы, что исключает использование катков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Несмиян А.Ю., Должиков В.В. Обзор культиваторов для сплошной обработки почвы и тенденции их производства // *Тракторы и сельхозмашины*. 2013. N4. С.6-9.
2. Novak P., Hula J. Translocation of Soil Particles during Secondary Soil Tillage along Contour Lines. *Water*. 2018. 10(5). 568.
3. Vasylykovska K.E., Leshchenko S.M., Vasylykovskiy O.M., Petrenko D.I. Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. In *MATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 50. N3. 13-20.
4. Martinik A., Palátová E., Houšková K. Impact of pre-sowing treatment and sowing season on Douglas fir emergence rate in a specific seed lot. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2013. Vol. 61. Iss. 1. 147-155.
5. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго- и экономически эффективных машинных технологий и технических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013. Т. 7. N4. С. 8-12.
6. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс. 2008. 266 с.
7. Aulin V.V., Tykhyi A.A. 2017. Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation. *Acta Technologia Agriculturae*. 2018. Vol. 21. Iss. 4. 153-159.
8. Валиев А.Р., Зиганшин Б.Г., Мухамадьяров Ф.Ф. и др. Современные почвообрабатывающие машины: регулировка, настройка и эксплуатация. СПб.: Лань. 2019. 264 с.
9. Руденко Н.Е., Кулаев Е.В., Руденко В.Н. Новые технологии и средства механизации в растениеводстве. Ставрополь: АГРУС. 2018. 380 с.

REFERENCES

1. Nesmiyan A.Yu., Dolzhikov V.V. Obzor kul'tivatorov dlya sploshnoj obrabotki pochvy i tendencii ih proizvodstva [Review of the cultivators for continuous soil cultivation and tendencies of their production]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2013. N4. 6-9 (In Russian).
2. Novak P., Hula J. Translocation of Soil Particles during Secondary Soil Tillage along Contour Lines. *Water*. 2018. 10(5). 568 (In English).
3. Vasylykovska K.E., Leshchenko S.M., Vasylykovskiy O.M., Petrenko D.I. Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. In *MATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 50. N3. 13-20 (In English).
4. Martinik A., Palátová E., Houšková K. Impact of pre-sowing treatment and sowing season on Douglas fir emergence rate in a specific seed lot. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2013. Vol. 61. Iss. 1. 147-155 (In English).
5. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Perspektivnye puti primeneniya energo- i ekonomicheski effektivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv [Perspective ways of application of energy-and cost-effective machine technologies and technical means]. *Sel'skohozyajstvennyye mashiny i tekhnologii*. 2013. Vol. 7. N4. 8-12 (In Russian).
6. Panov I.M., Vetohin V.I. Fizicheskie osnovy mekhaniki pochv. [Physical bases of soil mechanics] Kiev: Feniks. 2008. 266 (In Russian).
7. Aulin V.V., Tykhyi A.A. 2017. Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation. *Acta Technologia Agriculturae*. 2018. Vol. 21. Iss. 4. 153-159 (In English).
8. Valiev A.R., Ziganshin B.G., Muhammad'yarov F.F. i dr. Sovremennye pochvoobrabatyvayushchie mashiny: regulirovka, nastroyka i ekspluatatsiya. [Modern tillage machines: adjustment, adjustment and operation] Saint Petersburg: Lan'. 2019. 264 (In Russian).
9. Rudenko N.E., Kulaev E.V., Rudenko V.N. Novye tekhnologii i sredstva mekhanizatsii v rastenievodstve [New technologies and means of mechanization in crop production]. Stavropol': AGRUS. 2018. 380 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 01.04.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 01.04.2019

Статья принята к публикации 28.10.2019
The paper was accepted
for publication on 28.10.2019

Обоснование конструктивной схемы плуга для снижения энергозатрат основной обработки почвы

Федор Николаевич Граков¹,
кандидат технических наук, доцент кафедры;
Александр Владимирович Гриценко^{1, 2},
доктор технических наук, профессор кафедры,
e-mail: alexgrits13@mail.ru;

Вадим Анатольевич Алябьев²,
кандидат технических наук, доцент кафедры

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Российская Федерация;

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Российская Федерация

Реферат. Колебание тягового сопротивления лемешно-отвального плуга при смене условий работы можно уменьшить, усовершенствовав конструктивную схему орудия. (*Цель исследования*) Снизить или исключить изменения тягового сопротивления плуга при помощи автоматических регуляторов глубины вспашки, что позволит уменьшить энергозатраты агрегата и, следовательно, повысить его производительность. (*Материалы и методы*) Рассмотрели две группы лемешно-отвальных плугов, отличающихся способом соединения рамы с осью подвеса трактора. Изучили их достоинства и недостатки. Для определения рациональных конструктивных параметров плуга оценили влияние взаимного расположения рабочих органов (корпусов) на тяговое сопротивление и глубину обработки почвы, а также на изменение формы и поперечной площади почвенного пласта. (*Результаты и обсуждение*) Представили расчетные зависимости, по которым видно, что при увеличении угла постановки рабочего органа в поперечной плоскости происходит скачок тягового сопротивления, зависящий от величины перекрытия рабочих органов. Выявили зависимость тягового сопротивления от положения оси вращения плуга: чем меньше величина отклонения положения плуга от оси вращения, тем интенсивнее падает тяговое сопротивление. Проанализировали три схемы плугов на почве с удельным сопротивлением 0,8 килограмма на сантиметр квадратный и выбрали предпочтительную. Определили, что изменение тягового сопротивления на единицу изменения средней глубины вспашки составляет для плуга первой схемы 146 килограммов на сантиметр, для второй – 128, для третьей – 210 килограммов на сантиметр. (*Выводы*) Выявили, что наилучшая конструктивная схема – у полунавесного плуга, имеющего шарнирное соединение с трактором в поперечной плоскости и опорные колеса, установленные на поверхности поля. На испытаниях плуг с данной схемой показал высокую технологическую надежность, существенное увеличение производительности (при силовом регулировании до 10-11 процентов) без ухудшения условий труда тракториста и агротехнических показателей.

Ключевые слова: почвообработка, конструктивная схема, лемешно-отвальный плуг, тяговое сопротивление, почвенный пласт.

■ Для цитирования: Граков Ф.Н., Гриценко А.В., Алябьев В.А. Обоснование конструктивной схемы плуга для снижения энергозатрат основной обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 15-20. DOI 10.22314.2073-7599-2019-13-5-15-20.

Determining the Structural Design of a Plow to Reduce Energy Costs of Basic Soil Tillage

Fedor N. Grakov¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor of the department;
Aleksandr V. Gritsenko^{1, 2},
Dr.Sc.(Eng.), professor of the department,
e-mail: alexgrits13@mail.ru;

Vadim A. Alyab'ev²,
Ph.D.(Eng.), associate professor of the department

¹South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russian Federation;

²South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract. Sharp fluctuation in the traction resistance of a moldboard plow arising when changing working conditions can be decreased by improving the plow design. (*Research purpose*) To reduce or eliminate changes in the traction resistance of a plow using automatic tillage depth regulators, which will reduce the energy consumption of the unit and, therefore, increase its productivity. (*Materials and methods*) The authors considered two different groups of moldboard plows differing in the type of the frame fastening to the tractor suspension axis, and examined their advantages and disadvantages. To determine the rational design parameters of a plow, they estimated the influence of the relative position of working bodies on the traction resistance and tillage depth, as well as on the change in the shape and transverse area of a soil layer. (*Results and discussion*) The paper presents the established relationships, which show that when the angle of a working body is set in the transverse plane upward, there is a jump in traction resistance depending on the overlap amount of the working bodies. The study has revealed the relationship between traction resistance and the position of the plow rotation axis: the less the plow deviates from its rotation axis, the more intensively traction resistance decreases. Three structural designs of plows used on the soil with a resistivity of 0.8 kilograms per square centimeter have been analyzed and the most appropriate design has been chosen. It was determined that the change in traction resistance per unit of change in the average depth of plowing for the first plow scheme 146 kilograms per centimeter, for the second – 128, for the third – 210 kilograms per centimeter. (*Conclusions*) It has been revealed that the best structural design is that of a semi-mounted plow having a hinge-joint connection with a tractor in the transverse plane and support wheels resting on the field surface. Plows with this structural design have shown high technological reliability in tests, as well as a significant increase in productivity (with draft control of up to 10-11 percent) without deteriorating the working conditions of a tractor driver and field performance indicators.

Keywords: soil tillage, structural design, moldboard plow, traction resistance, soil layer.

For citation: Grakov F.N., Gritsenko A.V., Alyab'ev V.A. Obosnovanie konstruktivnoy skhemy pluga dlya snizheniya energozatrat osnovnoy obrabotki pochvy [Determining the structural design of a plow to reduce energy costs of basic soil tillage]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 15-20 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-15-20.

В цикле операций по производству продукции растениеводства наиболее энергозатратной считается вспашка [1, 2]. При выполнении этой операции тяговое сопротивление почвообрабатывающего орудия даже в пределах одного прохода машинно-тракторного агрегата (МТА) колеблется в широких пределах [1, 3]. Как правило, это приводит либо к перегрузке трактора (в этом случае механизатор должен переходить на низшую передачу движения), либо к его недогрузке [4, 5]. Кардинальное снижение или исключение изменений тягового сопротивления плуга позволит существенно снизить энергозатраты пахотного агрегата и, следовательно, повысить его производительность [6, 7]. Стабилизация тягового сопротивления плуга в динамике может осуществляться автоматическими регуляторами, исполнительным механизмом которых служит гидронавесной механизм трактора [8, 9]. В этом случае регулирование тягового сопротивления происходит путем изменения глубины обработки почвы [10, 11].

Цель исследования – определить рациональные конструктивные параметры плуга, чтобы снизить или исключить изменения тягового сопротивления плуга при помощи автоматических регуляторов глубины вспашки, что позволит уменьшить энергозатраты агрегата и, следовательно, повысить его производительность.

Материалы и методы. Конструктивные схемы лемешно-отвальных плугов по способу соединения рамы с осью подвеса можно разделить на две принци-

пиально различные группы. Первая группа имеет жесткое соединение рамы плуга с осью подвеса в поперечно-вертикальной плоскости, вторая – шарнирное соединение рамы с осью подвеса в этой же плоскости (рис. 1).

Плуги обеих групп имеют определенные достоинства и недостатки.

Основное достоинство плугов, относящихся к первой группе, – возможность значительно снизить тяговое сопротивление [12]. При автоматическом регулировании технологического процесса вспашки происходит догружение колес трактора в результате исключения передних опорных колес плуга и переноса части веса плуга на трактор.

Недостаток состоит в том, что для изменения средней глубины хода плуга на какую-то величину необходимо глубину вспашки первого корпуса изменить на величину, в 2 раза большую, то есть колебание глубины передних корпусов достигает недопустимых значений. Для устранения этого недостатка необходимо для задних корпусов применять второй контур регулирования.

Достоинство плугов второй группы – одновременное изменение глубины вспашки всеми корпусами при изменении высоты оси подвеса (при корректной компоновке опор носки всех лемехов поднимаются на одинаковую величину). Но главное с точки зрения автоматического регулирования достоинство таких плугов заключается в возможности регулирования тягового сопротивления путем изменения не только глу-

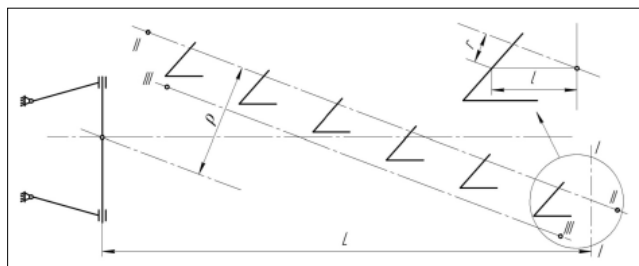


Рис. 1. Схемы полунавесных плугов:

I-I – ось вращения плуга во время изменения положения оси подвеса по высоте при жестком соединении плуга с трактором в поперечной плоскости; II-II – ось вращения плуга во время изменения положения оси подвеса по высоте при шарнирном соединении плуга с трактором в поперечной плоскости (опорные колеса плуга стоят на дне борозды); III-III – ось вращения плуга во время изменения положения оси подвеса по высоте при шарнирном соединении плуга с трактором в поперечной плоскости (опорные колеса плуга стоят на поверхности поля); r – расстояние от центра лемеха до поворотной оси плуга схемы II-II, м; l – расстояние от центра лемеха заднего рабочего органа до поворотной оси плуга схемы I-I, м; L – расстояние от оси подвеса до поворотной оси плуга схемы I-I, м; ρ – расстояние от оси проходящей через линию тяги пахотного агрегата до поворотной оси плуга схемы II-II

Fig. 1. Structural designs of semi-mounted plows

I-I – the plow rotation axis during a change in the suspension axis position in height with a rigid connection of the plow with a tractor in the transverse plane; II-II – the plow rotation axis during a change in the suspension axis position in height when the plow is hinged with a tractor in the transverse plane (the plow support wheels rest on the furrow bottom); III-III – the plow rotation axis during a change in the suspension axis position in height when the plow is hinged with a tractor in the transverse plane (the plow support wheels rest on the field surface); r – the distance from the plowshare center to the rotary axis of the plow of structural design II-II, m; l – the distance from the plowshare center of the rear working body to the rotary axis of the plow of structural design I-I, m; L – the distance from the suspension axis to the rotary axis of the plow of structural design I-I, m; ρ – the distance from the axis passing through the thrust line of the tillage unit to the rotary axis of the plow of structural design II-II

бины, но и удельного сопротивления, зависящего от углов постановки корпуса относительно направления движения МТА.

Недостаток плугов второй группы выражается в том, что почти весь вес плуга принимается опорными колесами, то есть догружение колес трактора меньше, чем плугами первой группы.

Для определения рациональных конструктивных параметров плуга как объекта регулирования необходимо знать влияние расположения и типа опор, взаимного расположения корпусов на характер изменения тягового сопротивления и глубины обработки почвы при подаче управляющего воздействия.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим на при-

мере влияние положения оси вращения $O-O$, зависящее от местоположения опор, и перекрытие корпусов Δb на форму подрезаемого пласта (рис. 2). На рисунках 2а, 2с, 2е показана форма пласта при $\Delta b = 0,5b$, а на рисунках 2б, 2д, 2ф – при $\Delta b = 0,1b$. При подъеме оси подвеса длина режущей кромки l_p (край рабочего органа, отрезающий почвенный пласт от монолита) увеличивается ступенчато от $l_p = a + b$ при $\psi = 0^\circ$ до $l_p = a + b + \Delta b$ при $\psi > 0^\circ$ (a – глубина обработки почвы, м; b – ширина захвата одного корпуса, м; ψ – угол установки корпуса в поперечной плоскости, град.). Дальнейшее увеличение угла ψ при условии $AO \leq AB$ (AO – расстояние между точками A и O , м; AB – расстояние между точками A и B , м) приводит к уменьшению длины l_p , но при этом появляется участок ломанной $AE = AK + KE$, на котором происходит скалывание почвы (AE, AK, KE – расстояние между точками A и E, A и K, K и E соответственно, м).

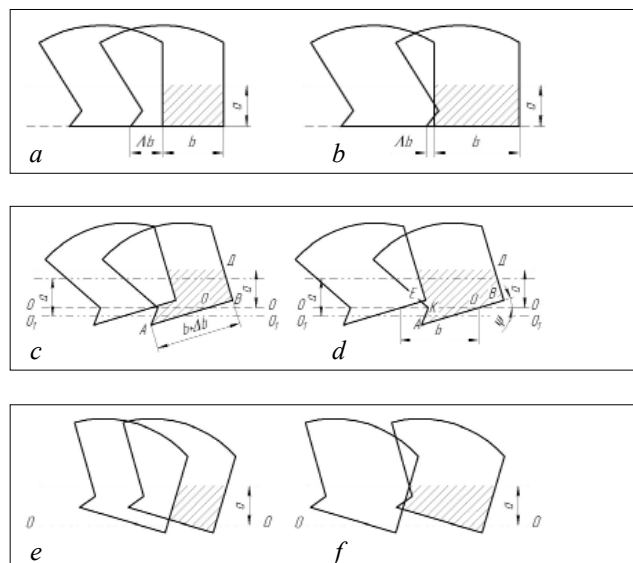


Рис. 2. Формы пласта, подрезаемого корпусом отвального плуга: а – глубина обработки почвы, м; б – ширина захвата одного корпуса, м; ψ – угол установки корпуса в поперечной плоскости, град.; Δb – перекрытие корпусов, м; $O-O$ и O_1-O_1 – оси вращения плуга при различных положениях точек опор

Fig. 2. Forms of soil layers cut by the body of a moldboard plow a – tillage depth, m; b – operating width of one body, m; ψ – the body setting angle in the transverse plane, deg.; Δb – the overlap of bodies, m; $O-O$ and O_1-O_1 – axes of plow rotation at different positions of support points

Характер изменения длины режущей кромки l_p и площади сечения подрезаемого почвенного пласта F , м², существенно зависит от расположения осей вращения плуга $O-O$ и O_1-O_1 при различных положениях точек опор (рис. 2). Определим зависимость l_p и F от изменения угла ψ . Для этого введем обозначения (рис. 2с, 2д):

$$\frac{AO}{b + \Delta b} = \lambda; \frac{OB}{b + \Delta b} = 1 - \lambda. \quad (1)$$

Заметим, что на участке $AB + BD$ происходит резание почвы, а на участке AE – скалывание.

Для достаточно малых значений угла ψ будет справедливо:

$$\operatorname{tg} \psi = \psi. \quad (2)$$

При $\psi > 0^\circ$ резание и скалывание происходит на участке $AB + BD + AE$, для которого l_p определяем по формуле:

$$l_p = a + b + \Delta b + \psi \cdot \lambda \cdot (b + \Delta b), \quad (3)$$

а площадь сечения подрезаемого пласта:

$$F = a \cdot (b + \Delta b) + \psi \cdot (b + \Delta b)^2 \cdot (\lambda - 0,5). \quad (4)$$

Аналогично можно определить l_p и F при $\psi < 0^\circ$. Считая, что тяговое сопротивление пропорционально площади сечения пласта (на лемех приходится около 50-60% сопротивления, а на отвал – 40-50%), а также ориентировочно принимая, что сопротивление P , H , состоит из сопротивления резания P_p и крошения $P_{кр}$, при условии $P_p = P_{кр} = 0,5P$, запишем определяющие их зависимости:

$$P_p = k' \cdot (a + b); P_{кр} = k'' \cdot (a \cdot b). \quad (5)$$

где k' и k'' – удельное сопротивление резания и крошения соответственно, Н/м.

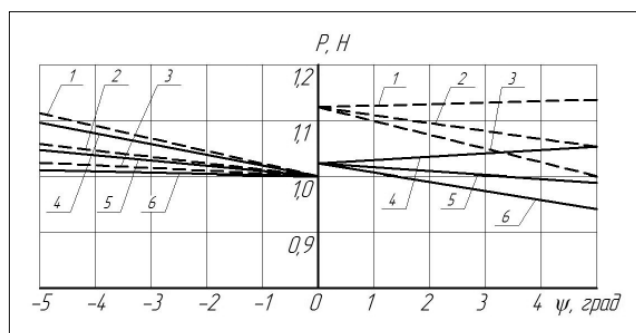


Рис. 3. Расчетные зависимости тягового сопротивления P ($P=1$ при $\psi=0^\circ$) от ψ при различных λ и Δb :

1) $\lambda = 0,5$; $\Delta b = 0,13$; 2) $\lambda = 0$; $\Delta b = 0,13$; 3) $\lambda = -0,5$; $\Delta b = 0,13$; 4) $\lambda = 0,5$; $\Delta b = 0,03$; 5) $\lambda = 0$; $\Delta b = 0,03$; 6) $\lambda = -0,5$; $\Delta b = 0,03$
 Fig. 3. Estimated relationship between traction resistance P ($P=1$ at $\psi=0^\circ$) and ψ for various λ and Δb

При изменении угла ψ от 0° в сторону «+» происходит скачок тягового сопротивления, обусловленный вступлением в работу заднего конца лемеха и зависящий от величины перекрытия (рис. 3). Кроме того, при увеличении ψ тяговое сопротивление зависит от λ , то есть от положения оси вращения плуга $0-0$. Тяговое сопротивление уменьшается тем интенсивнее, чем меньше величина λ .

Для поиска схемы плуга, в наибольшей степени отвечающей требованиям автоматического регулирования, проведены специальные исследования [2, 5] В результате отобраны три схемы (рис. 1).

Плуг схемы I жестко соединен с трактором в поперечной плоскости и опирается в рабочем и транспортном положении на одно заднее бороздное колесо. При изменении положения оси подвеса по высоте плуг поворачивается относительно оси $I-I$. При этом в первоначальный момент изменяется глубина только передних корпусов, а в дальнейшем – в результате дублирования задним колесом дна борозды и у задних корпусов [3].

Плуг схемы II имеет шарнирное соединение с трактором в поперечной плоскости и опирается в рабочем положении на переднее и заднее бороздные колеса. Изменение положения оси подвеса по высоте приводит к повороту этого плуга относительно оси $II-II$ и некоторому изменению глубины вспашки. Первоначальное изменение глубины зависит от расстояния между осью $II-II$ и корпусами. Дальнейшее изменение глубины происходит в ходе дублирования у задних корпусов аналогично плугу схемы I (рис. 4).

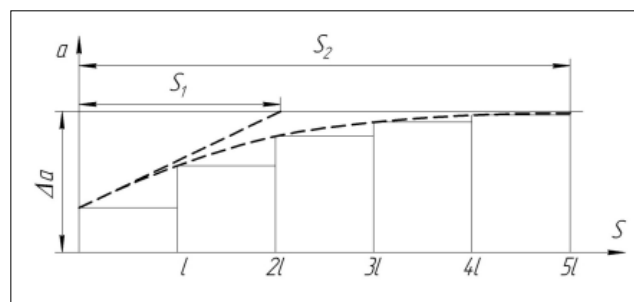


Рис. 4. Изменение глубины обработки при дублировании опорой плуга рельефа дна борозды:

S_1 и S_2 – постоянные пути, м; Δa – изменение средней глубины вспашки, м; S – пройденный плугом путь, м

Fig. 4. Change in tillage depth when the plow support follows of the furrow bottom relief

S_1 and S_2 – constant paths, m; Δa – the change in the average tillage depth, m; S – path traveled by the plow, m

Как видим, при скачкообразном изменении высоты оси подвеса и дублировании задним колесом дно борозды получается ступенчатым.

Но если представить, что оно не ступенчатое, то передаточная функция W в этом случае может быть представлена как для интегро-дифференцирующего звена (рис. 1, 4):

$$W_{ah(p)} = \frac{K \cdot (S_1 \cdot \rho + 1)}{S_2 \cdot \rho + 1}, \quad (6)$$

$$S_2 = L \text{ (схема I);} \quad (7)$$

$$S_2 = \frac{l \cdot \rho}{r} \text{ (схема II),} \quad (8)$$

где r – расстояние от центра лемеха до поворотной оси плуга, м;

K – коэффициент усиления.

Известны значения постоянных пути S_1 и S_2 и ко-

Параметры Parameter	ЗНАЧЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ ПУТИ И КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ДЛЯ ДЕВЯТИКОРПУСНЫХ ПЛУГОВ* VALUES OF PATH CONSTANTS AND THE GAIN RATIO FOR NINE-BODY PLOWS*					
	Схема I / Structural design I			Схема II / Structural design II		
	K	S_1	S_2	K	S_1	S_2
Расчетный / Estimated	0,53	0,8	8,0	1,0	0,8	6,0
Эксперимент / Experimental	0,48-0,52	0,8	7,4-8,5	0,87-0,98	0,8	5,5-6,3

* K – коэффициент усиления; S_1 и S_2 – постоянные пути, м.
 * K – the gain ratio; S_1 and S_2 – constant paths, m.

коэффициента усиления K для девятикорпусных плугов (таблица) [2].

Плуг *схемы III* кинематически похож на плуг *схемы II* с той разницей, что опорные колеса стоят на поверхности поля вблизи корпусов, а уменьшение глубины вспашки достигается при опускании оси подвеса. Плуг *схемы III* способен обрабатывать более высокие частоты, чем два первых, так как его характеристика близка к характеристике усилительного звена.

Плуги *схемы II* и *III*, в отличие от плуга *схемы I*, меньше догружают ведущие колеса трактора, зато они способны в большей степени изменять тяговое сопротивление без существенного ухудшения агротехники. У этих схем при варьировании положения оси подвеса по высоте изменяются не только глубина вспашки, но и углы установки корпусов в продольной φ и поперечной ψ плоскостях. Изменение этих углов по-разному сказывается на значении тягового сопротивления (рис. 5) [2, 4]. Поскольку поперечный угол ψ меняется более интенсивно, чем продольный φ , то наиболее предпочтительной схемой плуга станет *схема III*. В этом случае знак изменения тягового сопротивления, зависящего от глубины вспашки $P = f(a)$ и от угла установки корпуса $P = f(\psi)$, совпадает.

Испытания трех схем плугов на почве с удельным сопротивлением 0,8 кг/см² показали, что изменение тягового сопротивления ΔP на единицу изменения средней глубины вспашки Δa составляет для плуга *схемы I* 146 кг/см, для *схемы II* – 128 и для *схемы III* – 210 кг/см.

При обосновании схемы плуга необходимо учитывать не только агротехнические и технико-экономические показатели, но и требования охраны труда. Работа системы автоматического регулирования не должна ухудшать плавность хода трактора и увеличивать уровень колебаний на сидении тракториста. Собственные частоты трактора К-701 для вертикаль-

ных и продольно-угловых колебаний в зависимости от давления в шинах и типа присоединенного плуга составляют, соответственно, $\omega_1 = 5,5-7,3 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 12,5-18 \text{ с}^{-1}$, то есть входят в диапазон частот работы системы или близки к нему. А момент инерции относительно оси поворота составляет 11800 кг·м/с² для плуга I *схемы I*; 260 кг·м/с² для плуга II *схемы I*; 100 кг·м/с² для плуга *схемы III*, у которого ось вращения проходит через центр тяжести. Как видим, у плуга *схемы I* момент инерции в десятки раз больше, чем в двух других схемах. Отсюда больше и силовое воздействие этого плуга на трактор.

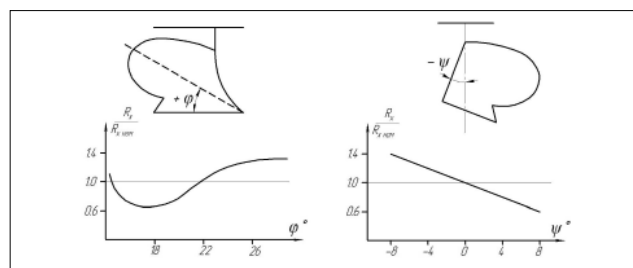


Рис. 5. Зависимость тягового сопротивления от углов установки корпусов в продольной (φ) и поперечной (ψ) плоскостях
 Fig. 5. Relationship between traction resistance and the body setting angles in the longitudinal (φ) and transverse (ψ) planes

Выводы. Наиболее пригодным плугом для агрегатирования с энергонасыщенными тракторами, оборудованными системами автоматического регулирования, следует признать полунавесной плуг, имеющий шарнирное соединение с трактором в поперечной плоскости, и опорные колеса, установленные на поверхности поля. На испытаниях этот плуг показал высокую технологическую надежность, существенное увеличение производительности (при силовом регулировании до 10-11%) без ухудшения условий труда тракториста и агротехнических показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов Р.С., Мударисов С.Г., Рахимов И.Р. Разработка ресурсосберегающей технологии и обоснование параметров комплекса машин для возделывания сельскохозяйственных культур в зоне Урала // *Вестник БГАУ*. 2018. №2(46). С. 121-134.

2. Рахимов Р.С., Свечников П.Г., Мухаматнуров М.М., Граков Ф.Н. Универсальное орудие для возделывания картофеля // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2004. №9. С. 19-20.

3. Рахимов Р.С. Определение металлоемкости орудий при

их проектировании // *АПК России*. 2015. Т. 74. С. 110-117.

4. Гордеев О.В., Саврасова Н.Р. Применение теории удара для определения процента поврежденных клубней картофеля // *Агропродовольственная политика России*. 2015. №1. С. 62-65.

5. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., Mazitov N.K., Rakhimov R.S., Khamaletdinov R.R., Rakhimov I.R., Farkhutdinov I.M., Mukhametdinov A.M., Gareev R.T. Modeling the technological process of tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019. 190. 70-77.

6. Ani O.A., Uzoejinwa B.B., Ezeama A.O., Onwualu A.P., Ugwu S.N., Ohagwu C.J. Overview of soil-machine interaction studies in soil bins. *Soil Tillage Research*. 2018. 175. 13-27.

7. Armin A., Fotouhi R., Szyszkowski W. Experimental and finite element analysis for mechanics of soil-tool interaction. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. 2017. 11(2). 433-439.

8. Sun J., Sun Y. Wang, Ma Y., Tong J., Zhang Z. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth & 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*. 2018. 119. 30-37.

9. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling. *Information Processing in Agriculture*. 2015. Vol. 2. Issue 2. 130-141.

10. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion. *Biosystems Engineering*. 2015. 129. 298-306.

11. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystems Engineering*. 2017. 155. 44-54.

12. Gabitov I.I., Mudarisov S.G., Gafurov I.D., et al. Evaluation of the efficiency of mechanized technological processes of agricultural production. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. Issue 10. 8338-8345.

13. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. Энергетическая и технологическая оценка почвообрабатывающего рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. №5. С. 10-13

REFERENCES

1. Rakhimov R.S., Mudarisov S.G., Rakhimov I.R. Razrabotka resursosberegayushchey tekhnologii i obosnovanie parametrov kompleksa mashin dlya vozdeystviya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v zone Urala [Development of resource-saving technology and determination of the parameters of a set of machines used for cultivating crops in the Urals]. *Vestnik BGAIU*. 2018. №2(46). 121-134 (In Russian).

2. Rakhimov R.S., Svechnikov P.G., Mukhamaturov M.M., Grakov F.N. Universal'noe orudie dlya vozdeystviya kartofelya [Universal potato cultivator]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 2004. №9. 19-20 (In Russian).

3. Rakhimov R.S. Opredelenie metalloyemkosti orudiy pri ikh proektirovanii [Determining metal consumption of units during their designing]. *APK Rossii*. 2015. Vol. 74. 110-117 (In Russian).

4. Gordeev O.V., Savrasova N.R. Primenenie teorii udara dlya opredeleniya protsenta povrezhdennykh klubney kartofelya [Application of shock theory to determine the amount of damaged potato tubers]. *Agropridovol'stvennaya politika Rossii*. 2015. №1. 62-65 (In Russian).

5. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Ya.P., Mazitov N.K., Rakhimov R.S., Khamaletdinov R.R., Rakhimov I.R., Farkhutdinov I.M., Mukhametdinov A.M., Gareev R.T. Modeling the technological process of tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019. Vol. 190. 70-77 (In English).

6. Ani O.A., Uzoejinwa B.B., Ezeama A.O., Onwualu A.P., Ugwu S.N., Ohagwu C.J. Overview of soil-machine interaction studies in soil bins. *Soil Tillage Research*. 2018. 175. 13-27 (In English).

7. Armin A., Fotouhi R., Szyszkowski W. Experimental and

finite element analysis for mechanics of soil-tool interaction. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. 2017. 11(2). 433-439 (In English).

8. Sun J., Sun Y. Wang, Ma Y., Tong J., Zhang Z. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth & 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*. 2018. 119. 30-37 (In English).

9. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling. *Information Processing in Agriculture*. 2015. Vol. 2. Issue 2. 130-141 (In English).

10. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion. *Biosystems Engineering*. 2015. 129. 298-306 (In English).

11. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystems Engineering*. 2017. 155. 44-54 (In English).

12. Gabitov I.I., Mudarisov S.G., Gafurov I.D., et al. Evaluation of the efficiency of mechanized technological processes of agricultural production. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. Issue 10. 8338-8345 (In English).

13. Lobachevskiy YA.P., Starovojtov S.I., Chemisov N.N. Energeticheskaya i tekhnologicheskaya otsenka pochvoobrabatyvayushchego rabochego organa [Energy and technological assessment of tillage working body]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. №5. 10-13 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 19.06.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 19.06.2019

Статья принята к публикации 18.10.2019
The paper was accepted
for publication on 18.10.2019

Расчет шага почвообрабатывающей фрезы с зубцеобразной формой

Парвиз Имранович Гаджиев¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: pgadjiev@yandex.ru;
Мансур Магфурович Махмутов¹,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: mansur.mahmutov@yandex.ru;

Алексей Игоревич Алексеев²,
аспирант, e-mail: aleks87mo@rambler.ru;
Марат Мансурович Махмутов³,
кандидат технических наук,
e-mail: maratmax@yandex.ru

¹Российский государственный аграрный заочный университет, г. Балашиха, Московская область, Российская Федерация;

²Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Тамбовская область, Российская Федерация;

³Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Реферат. Высокая энергоемкость фрезерования почв служит сдерживающим фактором их широкого применения. Фрезы применяют в тех случаях, когда нет альтернативы по качеству обработки, особенно тяжелых и задернелых почв. Показали, что модернизированные почвообрабатывающие фрезы имеют зубцеобразную форму. Рассмотрели вопросы оптимального расположения ножей относительно барабана. (*Цель исследований*) Получить зависимости для расчета шага зубцеобразной фрезы почвообрабатывающей машины для предпосадочной обработки почвы перед посадкой картофеля. (*Материалы и методы*) Отметили отсутствие методик при выборе основных параметров и режимов работы почвообрабатывающих фрез с зубцеобразной формой. Подтвердили необходимость нового подхода в выборе профиля рабочей поверхности ножа фрезы с целью уменьшения энергоемкости фрезерования и улучшения качества обработки. Использовали математические и графические расчеты для определения оптимального шага ступни. (*Результаты и обсуждение*) Представили выражение для определения объема рыхления почвы при работе почвообрабатывающих фрез. Рассчитали, что с увеличением глубины обработки почвы от 0,10 до 0,15 метра шаг ступни повышается с 0,04 до 0,06 метра и оптимально составляет 0,05 метра. Для ориентировочных инженерных расчетов приняли, что оптимальный параметр шага ступни равен 0,25-0,45 от значения подачи на нож. (*Выводы*) Установили, что количество ножей в одной секции и ширина захвата ножа не влияют на величину оптимального шага зубьев. Определили, что этот показатель линейно зависит от глубины обработки почвы: с ее увеличением на 0,05 метра оптимальный шаг ступни возрастает на 0,025 метра. Показали, что с увеличением рабочей скорости фрезы уменьшаются удельные затраты энергии на обработку пласта, а эффективность обработки почвы улучшается.

Ключевые слова: почвообрабатывающие машины, фрезерование почвы, шаг фрезы, зубцеобразная фреза, энергоемкость почвообработки.

■ **Для цитирования:** Гаджиев П.И., Махмутов М.М., Алексеев А.И., Махмутов М.М. Расчет шага почвообрабатывающей фрезы с зубцеобразной формой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 21-25. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-21-25.

Calculating the Pitch of a Serrated-Type Rotary Tiller

Parviz I. Gadzhiev¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: pgadjiev@yandex.ru;
Mansur M. Makhmutov¹,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,
e-mail: mansur.mahmutov@yandex.ru;

Aleksei I. Alekseev²,
postgraduate student,
e-mail: aleks87mo@rambler.ru;
Marat M. Makhmutov³,
Ph.D.(Eng.), e-mail: maratmax@yandex.ru

¹Russian State Agrarian Correspondence University, Balashikha, Moscow Region, the Russian Federation;

²Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Tambov Region, the Russian Federation;

³Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, the Russian Federation

Abstract. The high energy intensity associated with rotary tillage of soil serves as a deterrent for its widespread use. Rotary tillers are used in cases when there are no alternatives as to the soil quality, especially when machining hard and sod-covered soils. The authors have described new modernized rotary tillers of a serrated type and considered the optimal location of knives relative to the drum. (*Research purpose*) To determine the relationships for calculating the pitch of a serrated-type rotary tiller for soil preparation before potato planting. (*Materials and methods*) The authors have noted that currently, there are no methods for selecting the main parameters and operation modes of serrated-type rotary tillers. The research has proved that a new approach is required for selecting the working surface profile of the rotary tiller knife in order to reduce the energy consumption of tillage and improve its quality. The authors have used mathematical and graphical calculations to determine the optimal pitch of the tiller foot. (*Results and discussion*) The paper presents an expression for determining the amount of soil loosening during the operation of rotary tillers. It has been calculated that an increase in the tillage depth from 0.10 to 0.15 meters results in an increase in the pitch of a tiller foot from 0.04 to 0.06 meters and the optimal value is 0.05 meters. For approximate engineering calculations, it has been assumed that the optimal parameter of a foot pitch is 0.25-0.45 of the knife loading value. (*Conclusions*) It has been found that the number of knives in one section and the operating width of a knife do not affect the optimal tooth pitch. It has been determined that this indicator linearly depends on the depth of tillage: as it increases by 0.05 meters, the optimal foot step increases by 0.025 meters. It has been shown that as the working speed of the rotary tiller increases, specific energy consumption required for the treatment of a furrow slice decreases, and the efficiency of soil tillage improves.

Keywords: soil tillage machines, soil rotary tillage, rotary tiller pitch, serrated rotary tiller, energy intensity of soil tillage.

For citation: Gadzhiev P.I., Makhmutov M.M., Alekseev A.I., Makhmutov M.M. Raschet shaga pochvoobrabatyvayushchey frezy s zubtseobraznoy formoy [Calculating the pitch of a serrated-type rotary tiller]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 21-25. (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-21-25.

Почвообрабатывающие машины с активными ротационными рабочими органами типа фрезы обеспечивают высокое качество крошения на разных типах почв. Анализ исследований российских и иностранных ученых показывает, что по производительности обрабатывания тяжелых по механическому составу почв ротационные почвообрабатывающие машины (фрезы) занимают одно из важных мест при предпосадочной обработке почвы [1]. Наряду с высококачественным исполнением технологических функций, ротационные почвообрабатывающие машины (фрезы) понижают тяговое сопротивление агрегата. Их широкое применение сдерживается из-за повышенной энергоемкости фрезерования почв и меньшей технической безопасности по сравнению с классическими машинами и орудиями [2]. Вследствие этого фрезы применяют в тех случаях, когда для них нет альтернативы по качеству обработки, особенно при обработке тяжелых и задернелых почв [3]. Модернизированные почвообрабатывающие фрезы имеют зубцеобразную форму [4]. От правильного выбора шага ступни, то есть расстояния между верхним и нижним ножами, зависят не только качество обработки почвы, но и характеристики подталкивающих действий сил от машинно-тракторного агрегата (МТА) [5, 6].

Цель исследования – получить зависимости для расчета шага зубцеобразной фрезы почвообрабатывающей машины для предпосадочной обработки почвы перед посадкой картофеля.

Материалы и методы. Во время полевых испытаний соблюдены нормативы всех параметров, которые соответствовали техническим требованиям, изложен-

ным в межгосударственном стандарте ГОСТ-28516-90.

При обнаружении каких либо отклонений проводилась регулировка рабочих органов с учетом условий проведения эксперимента.

В программу испытаний включены несколько видов оценок:

- эксплуатационно-технологическая оценка работы;
- агротехническая оценка агрегата;
- экономическая оценка по результатам работы.

При оценке эксплуатационно-технологического показателя руководствовались ГОСТ 24055-88, ГОСТ 24056-88, ГОСТ 24057-88, ОСТ 70.4.2-80, ОСТ 10.4.2-2001.

Агротехническую оценку фрезерной машины осуществляли в соответствии с ОСТ 10 1.1-98, ОСТ 10 4.2-2001 и ОСТ 70.4.2-80.

Рассмотрим активный рабочий орган ротационной почвообрабатывающей машины (рис. 1). При шаге ступни t_s , равном глубине обработки почвы h_o , рыхление почвы будет осуществляться только ножом второй ступни 2. Действие подталкивающих сил от трактора P_f в системе МТА будут незначительны.

С уменьшением шага ступни образуется слой почвы сверху и снизу второго ножа, который начинает взаимодействовать с почвой. В результате улучшается структура обработки почвы и повышается действие подталкивающих сил в системе МТА.

Результаты и обсуждение. При шаге ступни, равном нулю, под вторым ножом слой почвы уменьшается до минимума, что ухудшает рыхление почвы и действие подталкивающих сил. Оптимальным шагом ступни будет то значение, при котором объем рыхле-

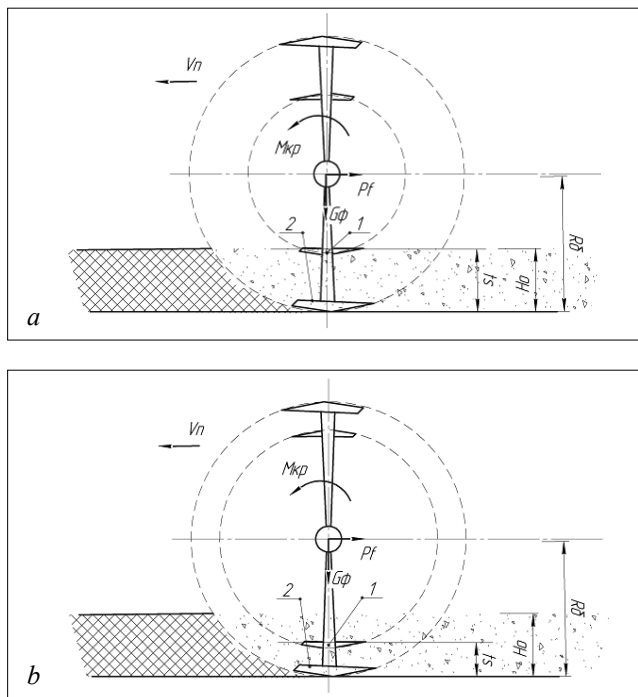


Рис. 1. Работа ножей зубцеобразной формы при шаге ступни, равном: а – глубине обработки почвы; б – половине глубины обработки почвы

V_n – поступательная скорость фрезы, м/с; $M_{кр}$ – крутящий момент от колеса, Нм; P_f – сила сопротивления, Н; G_ϕ – нагрузка на фрезу, Н; R_δ – радиус барабана фрезы, м; H_0 – глубина обработки почвы, м; t_s – шаг ступни, м

Fig. 1. Operation of serrated-type knives at a foot pitch equaling: а – the depth of tillage; б – the half-depth of tillage.

V_n – translational speed of the rotary tiller, m/s; $M_{кр}$ – torque from the wheel, Nm; P_f – resistance force, N; G_ϕ – loading on the rotary tiller, N; R_δ – the radius of the rotary tiller drum, m; H_0 – soil cultivation depth, m; t_s – foot pitch, m

ния первым и вторым ножом будут одинаковым [7].

Определим объем рыхления почвы при работе почвообрабатывающих фрез:

$$V_c = S_c \times b_i = \frac{\left(R_\delta \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{h_0^2}{R_\delta^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot h_0 + 2 \cdot R_\delta) + \right.}{50 \cdot \lambda \times Z_i} + \left. (\lambda \cdot R_\delta + 2 \cdot h_0) \cdot \arcsin \left(\frac{h_0}{R_\delta} \right) \right) \times b_i, \quad (1)$$

где V_c – объем рыхления почвы, м³;

S_c – площадь рыхления почвы, м²;

R_δ – радиус барабана, м;

h_0 – глубина обработки почвы, м;

λ – показатель кинематического режима работы фрезы;

Z_i – число ножей в одной секции, шт.;

b_i – ширина захвата ножа, м.

С увеличением шага ступни объем рыхления по-

чвы над первой ступенью (ближе к центру барабана) будет уменьшаться и определится:

$$V_{c1} = \frac{\left((R_\delta - t_s) \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{(h_0 - t_s)^2}{(R_\delta - t_s)^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot (h_0 - t_s) + 2 \cdot (R_\delta - t_s)) \right.}{50 \cdot \lambda \times Z_H} + \left. 2 \cdot (R_\delta - t_s) + (\lambda \cdot (R_\delta - t_s) + 2 \cdot (h_0 - t_s)) \cdot \arcsin \left(\frac{(h_0 - t_s)}{(R_\delta - t_s)} \right) \right) \times b_H, \quad (2)$$

где V_{c1} – объем рыхления почвы над первой ступенью, м³;

t_s – шаг зубьев, м;

b_H – ширина захвата ножа, м.

Объем рыхления почвы над второй ступенью с повышением шага ступни будет увеличиваться по выражению: $V_{c2} = V_c - V_{c1}$, (3)

При оптимальном значении шага ступни объем почвы V_{c1} будет равен V_{c2} . Выразим математически:

$$V_{c1} - V_{c2} = 0, \rightarrow V_{c1} - (V_c - V_{c1}) = 0, \rightarrow 2 \times V_{c1} - V_c = 0$$

$$\left(\left(R_\delta - t_s \right) \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{(h_0 - t_s)^2}{(R_\delta - t_s)^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot (h_0 - t_s) + 2 \cdot (R_\delta - t_s)) + \right. \quad (4)$$

$$\left. \left(R_\delta \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{h_0^2}{R_\delta^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot h_0 + 2 \cdot R_\delta) + \right. \right.$$

$$\left. + (\lambda \cdot (R_\delta - t_s) + 2 \cdot (h_0 - t_s)) \cdot \arcsin \left(\frac{(h_0 - t_s)}{(R_\delta - t_s)} \right) \right) \times 0,04 b_i -$$

$$\left. + (\lambda \cdot R_\delta + 2 \cdot h_0) \cdot \arcsin \left(\frac{h_0}{R_\delta} \right) \right) \times 0,02 b_i \times \lambda^{-1} \times Z_i^{-1} = 0$$

Математически определить оптимальное значение шага ступни из уравнения (4) затруднительно, но можно изобразить графически (рис. 2).

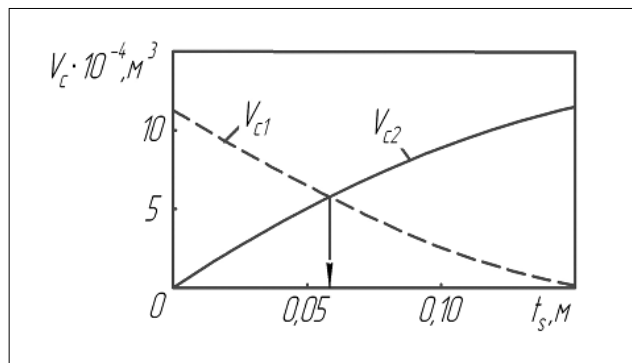


Рис. 2. Оптимальное значение шага ступни для условий:

$R_\delta = 0,3$ м; $h_0 = 0,15$ м; $\lambda = 4$; $Z_i = 3$ шт.; $b_H = 0,05$ м

Fig. 2. Optimal value of the foot pitch for conditions: $R_\delta = 0.3$ m; $h_0 = 0.15$ m; $\lambda = 4$; $Z_i = 3$ pcs.; $b_H = 0.05$ m.

С увеличением глубины обработки почвы от 0,10 до 0,15 м шаг ступни повышается с 0,04 до 0,06 м и оптимально составляет 0,05 м (рис. 3). Для ориентировочных инженерных расчетов можем принять, что оптимальный параметр шага ступни составляет 0,25-0,45 от значения подачи на нож, то есть:

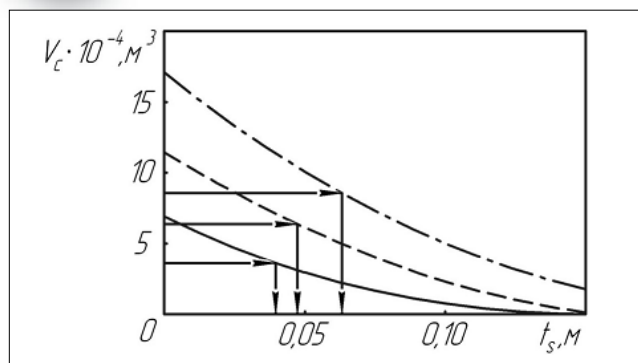


Рис. 3. Выбор оптимального значения шага ступни в зависимости от глубины обработки почвы:

— $h_o = 0,10$ м; - - - - - $h_o = 0,15$ м; ······ $h_o = 0,20$ м

Fig. 3. Selecting the optimal value of the foot pitch depending on the depth of tillage:

— $h_o = 0,10$ m; - - - - - $h_o = 0,15$ m; ······ $h_o = 0,20$ m

$$t_s = (0,25 - 0,45) \cdot S_n, \quad (5)$$

где S_n – подача на нож фрезы, мм/об.

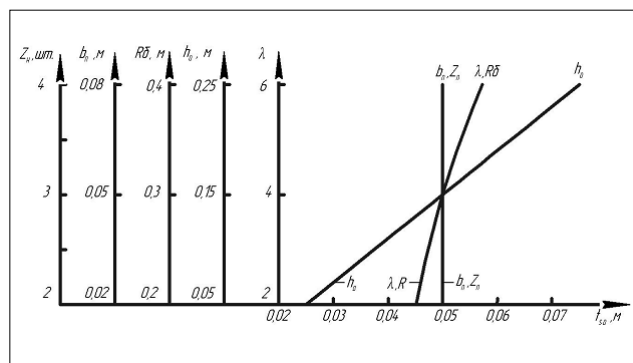


Рис. 4. Влияние исследуемых факторов на оптимальный шаг ступни:

h_o – глубина обработки почвы, м; R_6 – радиус барабана, м;

λ – показатель кинематического режима работы фрезы; Z_n – число ножей в одной секции, шт.; b_n – ширина захвата ножа, м

Fig. 4. Influence of the studied factors on the optimal foot pitch: h_o – tillage depth, m; R_6 – drum radius, m; λ – an indicator of the kinematic mode of the rotary tiller operation; Z_n – the number of knives in one section, pcs.; b_n – operating width of a knife, m.

УРОВНИ И ИНТЕРВАЛЫ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ LEVELS AND INTERVALS OF THE VARIATION OF FACTORS					
Уровни Levels	Глубина обработки почвы, h_o , м Tillage depth, h_o , m	Радиус барабана, R_6 , м Drum radius, R_6 , m	Показатель кинематического режима работы фрезы, λ Indicator of the kinematic operation mode of a rotary tiller, λ	Число ножей в одной секции, Z_n , шт. Number of knives in one section, Z_n , pcs.	Ширина захвата ножа, b_n , м Operating width of a knife, b_n , m
Нижний Lower	0,05	0,2	2	2	0,02
Центральный Central	0,15	0,3	4	3	0,05
Верхний Upper	0,25	0,4	6	4	0,08
Интервал варьирования Range of variation	0,10	0,1	2	1	0,03

Подача на нож – величина постоянная и зависит от радиуса барабана, числа ножей и отношения поступательной скорости машины к окружной скорости барабана. Этот показатель определяет степень крошения обработанной почвы.

Можно определить оптимальный шаг ступни графически, если значение объема стружки при шаге ступни, равно нулю, разделить пополам и от полученного значения провести горизонтальную линию до кривой, описывающей влияние шага ступни на объем стружки. Опустив ее на ось шага ступни, получим оптимальное значение шага ступни для определенных условий работы фрезы.

Проанализируем формулу (4) и определим, от каких факторов зависит значение оптимального шага ступни для следующих уровней и интервалов варьирования факторов (таблица).

Параметры и режимы работы фрезы влияют на оптимальную величину шага ступни (рис. 4).

Количество ножей в одной секции и ширина захвата ножа не влияют на величину оптимального шага зубьев. С увеличением радиуса барабана оптимальный шаг зубьев повышается по параболической зависимости и составляет $7 \cdot 10^{-3}$ м при оптимальном значении радиуса барабана в диапазоне 0,2-0,3 м, и $9 \cdot 10^{-3}$ м в диапазоне 0,3-0,4 м соответственно. С увеличением показателя кинематического режима работы фрезы от 2 до 4 оптимальный шаг ступни повышается по параболической зависимости и составляет $7 \cdot 10^{-3}$ м, а в диапазоне от 4 до 6 – $9 \cdot 10^{-3}$ м. С увеличением глубины обработки почвы на 0,05 м оптимальный шаг ступни повышается по линейной зависимости и составляет $25 \cdot 10^{-3}$ м.

Таким образом, наиболее значимым фактором,



влияющим на величину оптимального шага почвообрабатывающей фрезы, является глубина обработки почвы.

Выводы. Выявили отсутствие методик при выборе основных параметров и режимов работы почвообрабатывающих фрез с зубцеобразной формой. Для улучшения параметров и режимов работы требуется новый подход в выборе профиля рабочей поверхности ножа фрезы с целью уменьшения энергоемкости фрезерования и улучшения качества обработки. Определили наиболее прогрессивную форму ножа – зубцеобразную. Подтвердили, что количество ножей в

одной секции и ширина захвата ножа не влияют на величину оптимального шага зубьев. Показали, что с увеличением рабочей скорости фрезы уменьшаются удельные затраты энергии на обработку пласта, а эффективность обработки почвы улучшается. Рассчитали, что увеличением глубины обработки почвы на 0,05 м оптимальный шаг ступни повышается по линейной зависимости и составляет 25·10–3 м. На практике данная форма фрезы позволяет при оптимальном шаге ступни получать более высокие значения подталкивающих сил в системе МТА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаджиев П.И., Славкин В.И., Махмутов М.М., Журавлев А.В., Быковский В.С. Применение ресурсосберегающей технологии // *Вестник Российского государственного аграрного заочного университета*. 2014. N16(21). С. 61-64.
2. Махмутов М.М., Быковский В.С. Определение площади стружки при работе почвообрабатывающих фрез // *Тракторы и сельхозмашины*. 2015. N1. С. 27-28.
3. Сахапов Р.Л., Махмутов М.М. Влияние исследуемых факторов на мощность фрезерования // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015. Т. 17. N2-4. С. 896-899.
4. Гаджиев П.И., Манаенков К.А., Алексеев А.И. Выбор оптимальных параметров и режимов работы фрезы с ножа-

ми зубцеобразной формы // *Наука и образование*. 2019. N2. С. 21.

5. Князьков А.С., Купряшкин В.Ф., Наумкин Н.И. Снижение энергоемкости почвообрабатывающих фрез // *Сельский механизатор*. 2015. N8. С. 5-7.

6. Рамазанова Г.Г., Гаджиев П.И. Результаты полевых исследований почвообрабатывающей фрезы с ножами волнистым профилем // *Вестник Российского государственного аграрного заочного университета*. 2015. N19(24). С. 76-79.

7. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Овчинников В.А. Нагружение винтового ножа почвообрабатывающей фрезы в зависимости от угла установки лезвия // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2017. N7-2. С. 38-41.

REFERENCES

1. Gadzhiev P.I., Slavkin V.I., Makhmutov M.M., Zhuravlev A.V., Bykovskiy V.S. Primenenie resursosberegayushchey tekhnologii [Application of resource-saving technologies]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta*. 2014. N16(21). 61-64 (In Russian).
2. Makhmutov M.M., Bykovskiy V.S. Opredelenie ploshchadi struzhki pri rabote pochvoobrabatyvayushchikh frez [Determination of the area of surface particles resulting from the operation of rotary tillers]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. N1. 27-28 (In Russian).
3. Sakhapov R.L., Makhmutov M.M. Vliyanie issleduyemykh faktorov na moshchnost' frezerovaniya [Influence of the studied factors on the capacity of rotary tillage]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2015. Vol. 17. N2-4. 896-899 (In Russian).
4. Gadzhiev P.I., Manaenkov K.A., Alekseev A.I. Vybor optimal'nykh parametrov i rezhimov raboty frezy s nozhami zubtseobraznoy formy [Selecting optimal parameters and operation

modes of a rotary tiller with serrated-type knives]. *Nauka i obrazovaniye*. 2019. N2. 21 (In Russian).

5. Knyaz'kov A.S., Kupryashkin V.F., Naumkin N.I. Snizhenie energoemkosti pochvoobrabatyvayushchikh frez [Reducing the energy intensity of rotary tillers]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2015. N8. 5-7 (In Russian).

6. Ramazanova G.G., Gadzhiev P.I. Rezul'taty polevykh issledovaniy pochvoobrabatyvayushchey frezy s nozhami volnistym profilem [Field study results of rotary tillers with knives of a scalloped profile]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta*. 2015. N19(24). 76-79 (In Russian).

7. Dranyaev S.B., Chatkin M.N., Ovchinnikov V.A. Nagruzhenie vintovogo nozha pochvoobrabatyvayushchey frezy v zavisimosti ot ugla ustanovki lezviya [Loading a screw knife of a rotary tiller depending on the blade installation]. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2017. N7-2. 38-41 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 03.04.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 03.04.2019

Статья принята к публикации 25.05.2019
The paper was accepted
for publication on 25.05.2019

Управление механизированными технологическими процессами возделывания зерновых культур

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

Иван Петрович Добролюбов,
доктор технических наук, профессор

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

Реферат. Показали, что при возделывании зерновых культур в Сибири преимущественно используют экстенсивные технологии на фоне недостаточного технического обеспечения, что делает продукцию неконкурентоспособной. Дальнейшая интенсификация земледелия требует повышения точности выполнения технологических операций. Однако обеспеченность современной техникой остается основным лимитирующим фактором технологической модернизации земледелия. Выявили, что резервом роста эффективности в машинных технологиях возделывания зерновых культур может стать обработка почвы, на которую расходуется 30-40 процентов всех энергозатрат. (*Цель исследования*) Обосновать методологические принципы автоматического управления энергоемким процессом основной обработки почвы в агротехнологиях возделывания зерновых культур. (*Материалы и методы*) Использовали методы статистического анализа и синтеза технических средств управления. (*Результаты и обсуждение*) Подтвердили необходимость интеллектуализации сельскохозяйственного производства. Разработали систему автоматического управления режимами, которая относится к классу автоматических адаптивных систем с программным позиционным управлением на входе и обеспечивает нахождение машинно-тракторного агрегата в оптимальной зоне энергетических режимов. В качестве критерия качества системы позиционного управления приняли минимум динамической ошибки. Для ее измерения применили метрику махалонбисского типа – хемминговым расстоянием. Работу машинно-тракторного агрегата контролировали посредством силового и кинематического управления режимами работы двигателя на тракторах с гидрофицированной коробкой передач, двигатель которых форсирован газотурбонаддувом. Направили воздействие непосредственно на рейку топливного насоса или рычаг управления топливopодачей, на рычаг переключения скоростей коробки передач и на рычаги гидронавесной системы. (*Выводы*) Выявили случайный характер изменения тягового сопротивления машинно-тракторного агрегата из-за неоднородности почвенного покрова. Определили, что следствием этого стали повышенная энергоемкость, а также недостаточная эффективность применения встроенных информирующих систем о текущих энергетических режимах работы. Для контроля и управления неоднородностью почвы по ее твердости предложили новое техническое решение. Доказали, что разработанные и апробированные теоретические основы и технические средства автоматического управления энергоемкими технологическими процессами обработки почвы обеспечивают требуемые показатели качества.

Ключевые слова: зерновые культуры, интенсификация производства зерна, агротехнологии, обработка почвы, неоднородность почвы, энергоемкость, система автоматического управления; режимы работы машинно-тракторных агрегатов.

■ **Для цитирования:** Утенков Г.Л., Добролюбов И.П. Управление механизированными технологическими процессами возделывания зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 26-32. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-26-32.

Controlling Mechanized Technological Processes of Grain Crop Cultivation

Gennadiy L. Utenkov,
Ph.D.(Eng.), key research engineer;

Ivan P. Dobrolyubov,
Dr.Sc.(Eng.), professor

Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russian Federation

Abstract. The authors have proved that grain crops in Siberia are cultivated using primarily extensive technologies and inadequate technical support, which makes farm produce uncompetitive. Further intensification of crop cultivation requires increasing the accuracy of technological operations. However, the insufficient availability of modern machinery remains the main limiting factor in the technological modernization of agriculture. The study has revealed that further prospects for the efficiency growth in using mechanized technologies for cultivating grain crops are offered by soil cultivation, which consumes from 30 to 40 percent



of all energy costs. (*Research purpose*) is to justify the methodological principles of automatic controlling an energy-intensive process of tillage in agricultural technologies of grain cultivation. (*Materials and methods*) Use has been made of the methods of statistical analysis and synthesis of technical control means. (*Results and discussion*) The study has proved the necessity of the intellectualization of farm production. The authors have developed a system of automatic mode regulation belonging to the class of automatic adaptive systems with programmable positional control of input data and ensures that the machine-and-tractor unit is in the optimal range of energy modes. The minimum of dynamic error has been accepted as the quality criterion of the positional control system. To measure it, use has been made of Mahalanobis-type metric taking account of the Hamming distance. The operation of a machine-and-tractor unit has been controlled by power and kinematic regulation of the engine operating modes on tractors with a hydraulic gearbox and a gas-turbocharged engine. The effect was directed on the fuel pump rail or the fuel control lever, the gear shift lever, and the hydraulic system levers. (*Conclusions*) The study has revealed a random nature of the change in traction resistance of the machine-and-tractor unit caused by the heterogeneity of the soil cover. The authors have determined that this leads to increased energy intensity, as well as insufficient performance of built-in information systems indicating the current energy modes of operation of the machine-and-tractor unit operation. To control and regulate the soil heterogeneity by its hardness, a new technical solution has been proposed. The authors have proved that the developed and tested theoretical foundations and technical means of automatic control of energy-intensive technological processes of tillage ensure the required quality indicators. **Keywords:** cereals, intensification of grain production, agricultural technologies, soil tillage, heterogeneity, soil heterogeneity, energy intensity, automatic control system; operating modes of machine-and-tractor units.

For citation: Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P. Upravlenie mekhanizirovannyimi tekhnologicheskimi protsessami vozdeleyvaniya zernovykh kul'tur [Controlling mechanized technological processes of grain crop cultivation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 26-32 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-26-32.

При возделывании зерновых культур в Сибири преимущественно используют экстенсивные технологии на фоне недостаточного технического обеспечения, что делает продукцию неконкурентоспособной [1]. Снижается темп роста урожайности [2]. В стране преобладают экстенсивные технологии [3]. А дальнейшая интенсификация земледелия, связанная с развитием биотехнологий, требует повышения точности выполнения технологических операций. Однако обеспеченность современной техникой остается основным лимитирующим фактором технологической модернизации земледелия [4]. Только 15% техники и технологий соответствуют конкурентному технологическому укладу. С позиции государства, инновационное обновление отстающих предприятий эффективнее, чем преуспевающих [5]. Резервом роста эффективности в машинных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур считается обработка почвы, на которую расходуется 30-40% всех энергозатрат [6].

Цель исследований – обосновать методологические принципы автоматического управления энергоемким процессом основной обработки почвы в агротехнологиях возделывания зерновых культур.

Материалы и методы. Использовали методы статистического анализа и синтеза технических средств управления.

Результаты и обсуждение. Развитие агропромышленного сектора связано с интеллектуальным сельским хозяйством, что обусловлено тремя объективными обстоятельствами [7]:

- традиционные, технологические и технические решения уже не могут обеспечить требуемый рост

производительности труда и качества продукции;

- концепция пооперационной оптимизации исчерпала себя, и нужны системные методологические решения создания техники;

- глобальная компьютеризация производства обязывает применять высокоавтоматизированные процессы.

Интеллектуальные машины и комплексы – это высокоавтоматизированные технические средства, которые оптимизируют свое внутреннее и внешнее состояние (расположение) по заданным программам обеспечения оптимальной производительности и требуемого качества работы в зависимости от параметров агрофона. Применение цифровых технологий позволяет экономить при производстве 1 т зерна до 30% финансовых средств [8]. Управление технологическими процессами затрагивает широкий круг разнообразных проблем – организационных, технических, финансовых, экономических [9]. Автоматизированные системы управления должны предоставлять оперативную и достоверную информацию о состоянии производства, необходимую для автоматической генерации ключевых показателей. В РФ нет стратегии развития информационных и цифровых технологий для сельскохозяйственного производства. Существующие локальные разработки автоматического контроля и управления машинно-тракторными агрегатами (МТА) и зерновыми комбайнами не связаны между собой и имеют серьезные недостатки. Разрабатываемая автоматизированная система управления МТА должна быть гибкой и функциональной, поскольку создавать специальные подсистемы для каждого типа орудия нерационально. Предлагается систему автоматическо-

го управления разрабатывать на 3 уровнях: на первом уровне осуществляется непосредственное управление процессом агрегата по реальным измеряемым параметрам и обратной связи; на втором уровне происходит объединение операций контроля управляемых систем агрегата; на третьем уровне проводят процедуры оптимизации [10].

Однако, чем больше система, тем выше должна быть ее организация и лучше управление [11]. Повышенное энергопотребление обусловлено нестационарностью технологических процессов, требующих резерва энергетических мощностей [12]. Установлено, что случайный характер действующих на мобильный агрегат возмущений приводит к колебанию момента сопротивления, что снижает развиваемую двигателем номинальную мощность на 20-30% [9]. Предлагается модель функционирования (контроль и автоматизация) агрегата представлять в виде динамической системы, а расчет ее параметров производить с использованием вероятностно-стохастических методов [13].

С одной стороны, проблему энергосбережения предлагают решать на основе статистических теорий, учитывающих неоднородные свойства почвы и дифференцированные нетрадиционные способы воздействия на нее [6]. При этом твердость служит обобщенным индикатором, характеризующим процессы, протекающие в почве [14]. С другой стороны, ее твердость имеет тесную корреляционную связь с размерными характеристиками разрыхленной почвы и тяговым сопротивлением почвообрабатывающих орудий [15, 16]. Мы предложили новое техническое решение по определению ее твердости, что позволяет учитывать неоднородность почвенного покрова [17].

При выполнении энергоемких технологических операций важно обеспечить максимально возможную производительность и топливную экономичность МТА с сохранением высокого качества работ. При этом используют энергонасыщенные МТА с гидрофицированной коробкой передач трактора и форсированным двигателем внутреннего сгорания (ДВС с газотурбонаддувом). Встроенные информирующие системы о текущих энергетических (скоростном и нагрузочном) режимах малоэффективны из-за того, что тяговое сопротивление МТА изменяется случайным образом (по проходу агрегата оно может измениться в 1,5-2 раза), и требуемое число воздействий на органы управления возрастет на 70-90%, что резко снижает реакцию тракториста на поступающие команды. Обеспечение экстремального автоматического управления энергетическими режимами затруднительно из-за значительной переменности тягового сопротивления МТА. Разработаны и обобщены алгоритмы управления МТА с учетом структуры почвы [18, 19].

Разработанная система автоматического управления режимами (САУР) относится к классу автомати-

ческих адаптивных систем с программным позиционным управлением на входе и обеспечивает нахождение МТА в оптимальной зоне энергетических режимов (рис. 1).

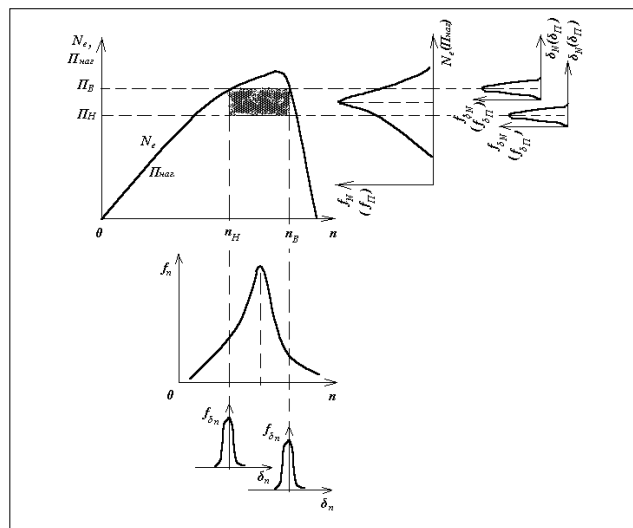


Рис. 1. Зона позиционирования на скоростной статической характеристике ДВС и плотности распределения вероятностей процессов: N_e – эффективная мощность ДВС, кВт; $\Pi_{\text{наг}}$ – параметр нагрузки ДВС; n – частота вращения коленчатого вала ДВС, (т.е. среднее значение угловой скорости за период оборота) (индексы «Н» и «В» отражают нижний и верхний уровни, рад/с; f_n – плотность распределения случайной величины x (частоты вращения коленчатого вала ДВС, n); f_N (f_{Π}) – плотность распределения нагрузки на ДВС; f_N^{δ} (f_{Π}^{δ}) – плотность распределения погрешности измерения параметра нагрузки (N - Π) и f_n^{δ} частоты вращения коленчатого вала ДВС, n

Критерием качества системы позиционного управления считается минимум динамической ошибки позиционирования, мерой которой может служить расстояние между фактическим и программным положением объекта управления, определяемое метрикой махалонобисского типа, в частности хеммингова расстояния.

В разработанной САУР управление режимами работы МТА на входе осуществляется путем силового и кинематического воздействия на двигатель. Проще всего его можно реализовать на тракторах с гидрофицированной коробкой передач, двигатель которых форсирован газотурбонаддувом. В этом случае воздействуют непосредственно на рейку топливного на-



соса или рычаг управления топливоподачей, на рычаг переключения скоростей коробки передач и на рычаги гидронавесной системы. В качестве параметра, характеризующего нагрузочный режим (Π), можно использовать давление наддува P_k или частоту вращения ротора турбокомпрессора, так как они связаны с эффективной мощностью N_e ДВС соотношениями:

$$N_e = k_{\Pi} P_k \omega_d;$$

$$\tilde{P}_k = (\tilde{\omega}_T - \Theta_B \tilde{\omega}_d) / k_B,$$

где N_e – эффективная мощность ДВС, кВт;

P_k – давление наддува, кПа;

k_{Π} , k_B и Θ_B – конструктивные постоянные системы турбонаддува;

ω_d – угловая скорость двигателя, рад/с;

$\tilde{\omega}_d, \tilde{\omega}_T$ – относительные приращения угловых скоростей двигателя ω_d и ротора турбокомпрессора ω_T к их значениям ω_d^* и ω_T^* :

$$\tilde{\omega}_d = \Delta \omega_d / \omega_d^* = (\omega_d - \omega_d^*) / \omega_d^*;$$

$$\tilde{\omega}_T = \Delta \omega_T / \omega_T^* = (\omega_T - \omega_T^*) / \omega_T^*.$$

Обозначим плотность распределения случайной величины x (параметра нагрузки Π или ω_d) f_x . Тогда вероятность нахождения ДВС в оптимальной зоне позиционирования характеризуется зависимостью для Π и ω_d (рис. 1):

$$f_{O.X} = \int_{C_H}^{C_B} f(x) dx, \text{ а вне зоны:}$$

$$\left. \begin{aligned} f_{B.X} &= \int_{C_H}^{C_B} f(x) dx, \\ f_{H.X} &= \int_{-\infty}^{C_H} f(x) dx, \end{aligned} \right\}$$

где в качестве x может выступать параметр нагрузки Π или угловая скорость коленчатого вала ДВС ω_d ; C_H , C_B – нижняя и верхняя границы зоны величины x (Π_H , Π_B , или $\omega_{d.H}$, $\omega_{d.B}$).

Так как элементы САУР (измерительно-преобразовательный, усилительный, исполнительный и др.) имеют погрешность измерения и преобразования δ_x величины x (параметра $\Pi - \delta_{\Pi}$ и величины $\omega_d - \delta_{\omega}$), то попадание в зону обеспечивается с некоторой неопределенностью.

Можно предположить, что величины Π и ω_d , а также δ_{Π} и δ_{ω} в вероятностном смысле независимы. А результат попадания в оптимальную зону описывается композицией: плотности распределения f_x , то есть $f(\Pi)$ или $f(\omega_d)$; величины x (Π или ω_d) и плотности распределения погрешности $\phi(\delta_x)$ измерения (и управления) δ_x (δ_{Π} и δ_{ω}) величины x (Π или ω_d).

На практике для Π и ω_d выполняются условия: $C_B - C_H > \delta_{x.max}$. Поэтому вероятность ошибки первого рода (принятие режима оптимальной нагрузки за режим выхода из зоны) равна:

$$P_{\alpha.x} = \int_0^{C_B - C_H} \left[\int_{C_B - \delta_x}^{C_B} f(x) dx \right] \phi(\delta_x) d\delta_x + \\ + \int_{-(C_B - C_H)}^0 \left[\int_{C_H - \delta_x}^{C_H} f(x) dx \right] \phi(\delta_x) d\delta_x.$$

Вероятность ошибки второго рода (принятие режима нахождения вне зоны оптимального режима) равна (для Π и ω_d):

$$P_{\beta.x} = \int_0^{C_B - C_H} \left[\int_{C_H - \delta_x}^{C_H} f(x) dx \right] \phi(\delta_x) d\delta_x + \\ + \int_{-(C_B - C_H)}^0 \left[\int_{C_B - \delta_x}^{C_B} f(x) dx \right] \phi(\delta_x) d\delta_x.$$

В силу случайного характера изменения нагрузки МТА и влияния множества факторов на это изменение можно полагать, что процесс нагрузки подчиняется нормальному закону распределения вероятностей. Это справедливо и для параметра нагрузки, функционально связанного со степенью нагрузки. Погрешности измерения и преобразования Π и ω_d также можно считать распределенными по нормальному закону.

Рассмотрим случай, когда средние значения Π и ω_d совпадают с серединой оптимальной зоны и с их номинальными значениями (вследствие симметричности законов распределения и границ зоны относительно ее середины полученные результаты можно распространить при нахождении дизеля в любой точке зоны). При этом считаем, что систематические погрешности измерения и преобразования величины x (Π или ω_d) устранены. Введем обозначения, справедливые как для Π , так и для ω_d :

$$\eta = (C_B - C_H) / 2\sigma_x;$$

$$\eta_{\delta} = 6\sigma_{\delta_x} / (C_B - C_H);$$

$$\eta_x = 3\sigma_{\delta_x} / \sigma_x,$$

где σ и σ_{δ} – средние квадратические отклонения величины x и погрешности δ_x .

Тогда для Π и ω_d выражения вероятностей $P_{\alpha.x}$ и $P_{\beta.x}$ примут вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{\alpha.x} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{6\eta/\eta_x} e^{-\delta_x^2/2} d\delta_x \int_{\eta - (\delta_x \eta_x / 3)}^{\eta} e^{-x^2/2} dx, \\ P_{\beta.x} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{6\eta/\eta_x} e^{-\delta_x^2/2} d\delta_x \int_{-\eta - (\delta_x \eta_x / 3)}^{-\eta} e^{-x^2/2} dx. \end{aligned} \right\}$$

Рассмотрим функциональную схему разработанной САУР (рис. 2). Система содержит три независимых контура управления: топливоподачей, переключением передач, положением рабочих органов сельхозмашин. Поскольку параметры, адекватно отражающие степень нагрузки, функционально связаны с N_e , то изменяемые параметры нагрузки и скорости имеют аналогичную зону. Контур управления замыкается только при выходе за пределы зоны скоростной характеристики ДВС (заштрихованной на рис. 1), где в качестве

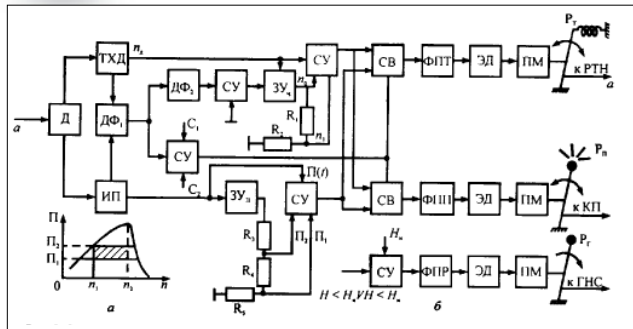


Рис. 2. Оптимальная зона управления энергетическими режимами МТА (а) и упрощенная функциональная схема САУР (б): Д – двигатель; ТХД – тахометр двигателя; ДФ₁ – дифференциатор dP/dn ; ДФ₂ – дифференциатор d^2P/d^2n ; СУ – сравнивающее устройство; ИП – измеритель параметра нагрузки $P(t)$; ЗУ_ч и ЗУ_н – запоминающие устройства, соответственно, частоты вращения двигателя и параметра нагрузки; СВ – схемы выбора команды включения; ФПТ, ФПП и ФПР – функциональные преобразователи сигналов, соответственно, топливоподдачи, переключения передач и положения рабочих органов; ЭД – электродвигатели исполнительных устройств; ПМ – передаточные механизмы исполнительных устройств; P_н, P_п, P_г – рычаги управления соответственно топливоподдачей, переключением передач и гидравлической системой; РТН – рейка топливного насоса; КП – коробка передач; ГНС – гидравлическая система; R₁, R₂, R₃, R₄, R₅ – резисторы

Fig. 2. Optimal control zone of energy modes of a machine-and-tractor unit (a) and simplified functional scheme of SAMR (b): Д – engine; ТХД – engine tachometer; ДФ₁ – differentiator dP/dn ; ДФ₂ – differentiator d^2P/d^2n ; СУ – comparing device; ИП – load parameter meter $P(t)$; ЗУ_ч and ЗУ_н – storage devices of the engine speed and load parameters, respectively; СВ – circuit selection of the switching command; ФПТ, ФПП and ФПР – functional signal converters of fuel supply, gear shift, and position of working elements, respectively; ЭД – electric motor actuators; ПМ – transfer mechanism actuators; P_н, P_п, P_г – control levers of fuel supply, gear shift, and hydraulic system, respectively; ГНС – fuel pump rail; R₁, R₂, R₃, R₄, R₅ – resistors

параметра P использовано давление наддува P_k .

Статические скоростные характеристики ДВС по мощности и расходу топлива имеют экстремумы. Поэтому при нахождении МТА внутри зоны и при достаточно продолжительном участке с незначительной вариабельностью тягового сопротивления существует дополнительная возможность повышения производительности МТА за счет прогнозирования нагрузки и оптимизации управления с помощью предсказывающих устройств – экстраполяторов. Они позволяют определить значение сигнала на выходе МТА, после поступления на его вход управляющего или возмущающего воздействия до того, как это значение фактически будет достигнуто, а также вычислить оптимальные значения управляющих воздействий. Выходные сигналы таких экстраполяторов создают необходимую коррекцию управляющего устройства

(УУ) и позволяют существенно улучшить качество системы управления.

Рассмотрим частный случай, когда конечное состояние МТА может характеризоваться значением только одной из обобщенных координат P или ω_d : $y_1(t_k) = y(t_k)$. Экстраполятор определяет текущую оценку $y(t_k, t)$ конечного значения выходной координаты $y(t)$. Если измеряется возмущающее воздействие, то может быть применен экстраполятор, определяющий текущую оценку $\xi(t_k, t)$ его конечного значения координаты $\xi(t)$.

Принцип действия САУР с предсказывающим блоком (экстраполятором) состоит в следующем (рис. 3).

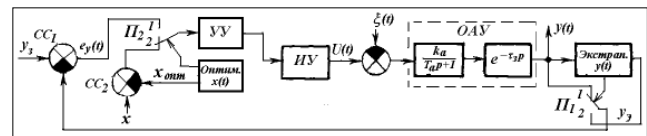


Рис. 3. Функциональная схема САУР с предсказывающим блоком (экстраполятором) и оптимизатором

Fig. 3. Functional scheme of SAMR with a predictive block (extrapolator) and an optimizer

При появлении существенных возмущающих воздействий (резком изменении нагрузки) экстраполятор вычисляет значение $y_3(t)$, которое соответствует заданному моменту t_k . При поступлении команды из экстраполятора, например после второго измерения $y(t)$, на управляемый электронный переключатель Π_1 для установки его во вторую позицию экстраполятор вводит значение $y_3(t)$ на второй вход схемы сравнения CC₁, на первый вход которой подается сигнал с выхода задающего устройства $y_3(t)$. Сигнал рассогласования $e_y(t) = y_3(t) - y_3(t)$ с выхода CC₁ подается на УУ, которое вырабатывает значение и знак управляющего воздействия $U(t)$, поступающего на объект автоматического управления с исполнительного устройства. При достижении $y(t) - y_3(t) < \Delta_{удоп}$, где $\Delta_{удоп}$ – допустимое значение отклонения, с экстраполятора подается команда на установку переключателя в первую позицию. При этом на второй вход схемы сравнения CC₁ поступает сигнал управляемой переменной $y(t)$. Система управления работает в обычном режиме.

Выводы. Установили, что высокая энергоёмкость технологических процессов обусловлена неоднородностью почвенного покрова. Применение встроенных информирующих систем о текущих энергетических (скоростном и нагрузочном) режимах работы МТА малоэффективны из-за того, что тяговое сопротивление МТА изменяется случайным образом. Для контроля и управления неоднородностью почвы по ее твердости предложили новое техническое решение. Разработанные и апробированные теоретические основы и технические средства автоматического управления энергоёмкими технологическими процессами обработки почвы обеспечивают требуемые показатели качества.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стадник А.Т., Кабаков В.М., Кабакова О.Г. Техническая оснащенность сельскохозяйственного производства и пути ее решения // *Вестник НГАУ*. 2018. №1(46). С. 166-173.
2. Утенков Г.Л., Рапопорт Э.О. Метод оценки параметров машинных технологий возделывания зерновых культур // *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*. 2017. №6. С. 22-27.
3. Кирюшин В.И. Актуальные проблемы и противоречия развития земледелия // *Земледелие*. 2019. №3. С. 3-7.
4. Кирюшин В.И. Технологическая модернизация земледелия России: предпосылки и условия // *Земледелие*. 2015. №6. С. 6-10.
5. Дасковский В. Б., Киселев В. Б. Проблемы интенсификации экономики и экономического роста // *Экономика*. 2017. №8. С. 28-46.
6. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс. 2008. 266 с.
7. Жалнин Э.В., Годжаев З.А., Флоренцев С.Н. Концептуальные принципы интеллектуальных сельскохозяйственных машин на примере зерноуборочного комбайна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. №6. С. 9-16.
8. Федоренко В.Ю. Цифровизация сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2018. №6. С. 2-8.
9. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Гончаров Н.Т., Лонин С.Э., Алексеев И.С. Универсальная автоматизированная система управления машинно-тракторными агрегатами // *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*. 2018. №3. С. 10-14.
10. Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С. Управление сельскохозяйственными мобильными агрегатами с использованием навигационной системы ГЛОНАС/GPS // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. №3. С. 15-19.
11. Баутин В.М., Панфилов В.А. Парадигма развития технологий АПК // *Экономика сельского хозяйства России*. 2017. №6. С.18-31.
12. Миндрин А. Энергетический анализ в сельском хозяйстве // *АПК: экономика, управление*. 2008. №9. С. 2-9.
13. Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С., Гончаров Н.Т., Афонина И.И., Алексеев И.С., Лонин С.Э. Автоматизированные системы управления для оптимизации работы МТА // *Сельский механизатор*. 2017. №7. С. 14-16.
14. Медведев В.В. Твердость и твердограммы в исследованиях по обработке почвы // *Почвоведение*. 2009. №3. С. 325-336.
15. Горохов П.В. Некоторые аспекты понятия «твердость почвы» применительно к исследованию процесса рыхления // *Почвоведение*. 1990. №2. С. 56-67.
16. Огрызков Е.П. Оценка сопротивления почв по их твердости // *Тракторы и сельхозмашины*. 2004. №3. С. 14-15.
17. Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P. Improvement of technological processes and improving the quality of tillage in Siberia. *Journal of natural history. Agricultural sciences*. 2016. №4. 4-7.
18. Добролюбов И.П., Утенков Г.Л. Рациональные алгоритмы управления МТА // *Тракторы и сельхозмашины*. 2007. №10. С. 9-11.
19. Утенков Г.Л., Добролюбов И.П. Моделирование рабочих процессов гибких автоматизированных технологических комплексов почвообработки. Новосибирск: СФНЦА РАН, НГАУ. 2018. 204 с.

REFERENCES

1. Stadnik A.T., Kabakov V.M., Kabakova O.G. Tekhnicheskaya osnashchennost' sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva i puti ee resheniya [Technical equipment of farm production and ways of its implementation]. *Vestnik NGAU*. 2018. 1(46). 166-173 (In Russian).
2. Utenkov G.L., Rapoport E.O. Metod otsenki parametrov mashinnykh tekhnologiy vozdeleyvaniya zernovykh kul'tur [Method of estimating the parameters of mechanized technologies of grain crop cultivation]. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2017. 6. 22-27 (In Russian).
3. Kiryushin V.I. Aktual'nye problemy i protivorechiya razvitiya zemledeliya [Acute problems and contradictions of agricultural development]. *Zemledeliye*. 2019. 3. 3-7 (In Russian).
4. Kiryushin V.I. Tekhnologicheskaya modernizatsiya zemledeliya Rossii: predposylki i usloviya [Technological modernization of agriculture in Russia: prerequisites and conditions]. *Zemledeliye*. 2015. 6. 6-10 (In Russian).
5. Daskovskiy V.B., Kiselev V.B. Problemy intensifikatsii ekonomiki i ekonomicheskogo rosta [Problems of economy intensification and economic growth]. *Ekonomika*. 2017. 8. 28-46 (In Russian).
6. Panov I.M., Vetokhin V.I. Fizicheskie osnovy mekhaniki pochv [Physical fundamentals of soil mechanics]. Kiev: Feniks. 2008. 266 (In Russian).
7. Zhalnin E.V., Godzhaev Z.A., Florentsev S.N. Kontseptual'nye printsipy intellektual'nykh sel'skokhozyaystvennykh mashin na primere zernouborochnogo kombaina [Conceptual principles of intelligent agricultural machines as exemplified by a combine harvester]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. 6. 9-16 (In Russian).
8. Fedorenko V.Yu. Tsifrovizatsiya sel'skogo khozyaystva [Digitalization of agriculture]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2018. 6. 2-8 (In Russian).
9. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Khoroshenkov V.K., Goncharov N.T., Lonin S.E., Alekseev I.S. Universal'naya avtomatizirovannaya sistema upravleniya mashinno-traktornymi agregatami [Universal automated control system of machine-tractor units]. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2018. 3. 10-14 (In Russian).
10. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S. Upravlenie sel'skokhozyaystvennymi mobil'nymi agregatami s ispol'zovaniem navigatsionnoy sistemy GLONAS/GPS [Controlling the operation of agricultural mobile units using the navigation system GLONAS/GPS]. *Sel'skokhozyaystvennyye ma-*

shiny i tekhnologii. 2015. 3. 15-19 (In Russian).

11. Bautin V.M., Panfilov V.A. Paradigma razvitiya tekhnologiy APK [Paradigm of the development of farm technologies], *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii*. 2017. 6. 8-31 (In Russian).

12. Mindrin A. Energeticheskiy analiz v sel'skom khozyaystve [Energy analysis in agriculture]. *APK: ekonomika, upravlenie*. 2008. 9. 2-9 (In Russian)

13. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S., Goncharov N.T., Afonina I.I., Alekseev I.S., Lonin S.E. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya dlya optimizatsii raboty MTA [Automated control systems used to optimize the operation of a machine-and-tractor unit] // *Sel'skiy mekhanizator*. 2017. 7. 14-16 (In Russian)

14. Medvedev V.V. Tverdest' i tverdogrammy v issledovaniyakh po obrabotke pochvy [Hardness and its test diagrams used in research on soil tillage]. *Pochvovedeniye*. 2009. 3. 325-336 (In Russian).

15. Gorokhov P.V. Nekotorye aspekty ponyatiya "tverdest' pochvy" primenitel'no k issledovaniyu protsessov rykhleniya [Some aspects of the "soil hardness" concept relating to the study of soil loosening]. *Pochvovedenie*. 1990. 2. 56-67 (In Russian).

16. Ogryzkov E.P. Otsenka soprotivleniya pochv po ikh tverdsti [Evaluating the resistance of soils according to their hardness]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2004. 3. 14-15 (In Russian).

17. Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P. Improvement of technological processes and improving the quality of tillage in Siberia. *Journal of natural history. Agricultural sciences*. 2016. 4. 4-7 (In English).

18. Dobrolyubov I.P., Utenkov G.L. Ratsional'nye algoritmy upravleniya MTA [Rational algorithms of the MTU control]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2007. 10. 9-11 (In Russian).

19. Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P. Modelirovanie rabochikh protsessov gibkikh avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksov pochvoobrabotki [Modeling of operation processes of flexible automated technological units for soil tillage]. Novosibirsk: SFNTsA RAN, NGAU. 2018. 204 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 05.09.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 05.09.2019

Статья принята к публикации 21.10.2019
The paper was accepted
for publication on 21.10.2019

Экспериментальные исследования теплоносителя при воздействии поля сверхвысокой частоты

Ирина Георгиевна Ершова,
кандидат технических наук, научный сотрудник,
e-mail: eig85@yandex.ru;

Алексей Николаевич Васильев,
доктор технических наук, профессор,
руководитель научного направления;
Дмитрий Витальевич Поручиков,
научный сотрудник

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Оценить исходные требования к теплоносителю при проектировании установки для получения энергии фазового перехода «вода – лед», необходимо провести экспериментальные исследования по теплофизическим и электрофизическим параметрам теплоносителя. Выбор теплоносителя определяет мощность разработанной установки. (*Цель исследования*) Экспериментально определить теплофизические и электрофизические параметры теплоносителя при воздействии на него электромагнитным полем сверхвысокой частоты, с перспективой применения этого теплоносителя в разработанной установке. (*Материалы и методы*) Использовали в качестве теплоносителя в разработанной экспериментальной установке для получения энергии фазового перехода «вода – лед» воду и солевой раствор хлорида натрия концентрацией 1-20 процентов. При воздействии электромагнитного поля сверхвысокой частоты (микроволновая печь Mystery MMW-2315G) мощностью 800 Ватт, при частоте магнетрона 2450 мегагерц изменяли продолжительность обработки: 30, 60 и 120 секунд. Измерили температуру замерзания, pH воды и растворов, удельную электропроводность, концентрацию соли. (*Результаты и обсуждение*) Выявили, что при воздействии электромагнитного поля сверхвысокой частоты на раствор хлорида натрия концентрацией 20 процентов температура его замерзания понижается с минус 16,6 до минус 18,5 градуса Цельсия, для эвтектического раствора – с минус 21,2 до минус 25 градусов Цельсия, pH и концентрация соли повышается, а удельная электропроводность уменьшается. (*Выводы*) Подобрали оптимальный теплоноситель для разработанной экспериментальной установки: солевой раствор хлорида натрия концентрацией 20 процентов, температура замерзания составляет минус 16,6 градуса Цельсия. Рекомендовали предусмотреть дополнительную емкость для электрофизической обработки теплоносителя. Определили, что после обработки электромагнитной обработкой сверхвысокой частоты температура замерзания солевого раствора понизилась до минус 18,5 градуса Цельсия. **Ключевые слова:** фазовый переход «вода – лед», солевой раствор, теплоноситель, электрофизическое воздействие, электромагнитное поле сверхвысокой частоты.

■ Для цитирования: Ершова И.Г., Васильев А.Н., Поручиков Д.В. Экспериментальные исследования параметров теплоносителя при воздействии электромагнитным полем сверхвысокой частоты // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 33-37. DOI 10.22314.2073-7599-2019-13-5-33-37.

Experimental Research of Heat Carrier Parameters when Exposed to Electromagnetic Field of Super-High Frequency

Irina G. Ershova,
PhD (Eng.), Research Associate,
e-mail: eig85@yandex.ru;

Aleksey N. Vasiliev
Dr.Sc.(Eng.), professor, head of research area;
Dmitriy V. Poruchikov,
research associate

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. In order to evaluate the initial requirements for a coolant when designing an installation for obtaining the energy of the “water – ice” phase transition, it is necessary to conduct experimental studies on the thermophysical and electrophysical parameters of the coolant. The type of chosen coolant determines the power of the developed installation. (*Research purpose*) Experimental determination of the thermophysical and electrophysical parameters of the coolant when exposed to an electromagnetic field of super-high frequency, with the prospect of using this coolant in the developed installation. (*Materials and methods*) The authors used water and a saline solution of sodium chloride at a concentration of 1–20 percent as a coolant in the developed experimental installation for obtaining the energy of the “water-ice” phase transition. When exposed to an electromagnetic field of super-high frequency (microwave oven Mystery MMW-2315G) with a power of 800 watts and a magnetron frequency of 2450 megahertz, the

treatment time was alternatively set at 30, 60 and 120 seconds. Measurements were taken of freezing temperature, pH of water and solutions, electrical conductivity, and salt concentration. (*Results and discussion*) It has been found that when a super-high-frequency electromagnetic field affects a sodium chloride solution at a concentration of 20 percent, its freezing temperature decreases from 16.6 degrees Celsius below zero to 18.5 degrees Celsius below zero, for a eutectic solution - from 21.2 degrees Celsius below zero to 25 degrees Celsius below zero, while pH and salt concentration increase, and specific electrical conductivity decreases as well. (*Conclusions*) The authors have selected an optimal coolant for the developed experimental installation: a saline solution of sodium chloride at a concentration of 20 percent and a freezing temperature of 16.6 degrees Celsius below zero. It is recommended to provide additional capacity for the electrophysical treatment of the coolant. It has been determined that after the super-high frequency electromagnetic treatment, the freezing temperature of the saline solution dropped to 18.5 degrees Celsius below zero.

Keywords: “water – ice” phase transition, saline solution, coolant, electrophysical effect, electromagnetic field of super-high frequency.

For citation: Ershova I.G., Vasiliev A.N., Poruchikov D.V. Eksperimental'nye issledovaniya parametrov teplonositelya pri vozdeystvii elektromagnitnogo pole sverkhvysokoy chastoty [Experimental studies of coolant parameters when exposed to electromagnetic field of super-high frequency]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 33-37 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-33-37.

Исследования процесса образования льда в экспериментальной установке позволяют выявить теплоноситель, при использовании которого можно получить необходимое количество энергии для отопления сельскохозяйственных объектов. В разработанной экспериментальной установке в качестве теплоносителя рекомендованы водопроводная вода и солевой раствор хлорида натрия различной концентрации [1]. Однако вода будет замерзать и снизит эффективность работы установки. Температура замерзания солевого раствора определяется концентрацией соли в растворе. Например, водный раствор хлористого натрия может не замерзать до температуры минус 21,2°C при содержании соли 23,1% (рис. 1).

С ростом концентрации хлорида натрия в водной среде температура замерзания раствора падает, что объясняется понижением барьера вращения молекул воды в присутствии молекул $NaCl$. Чем больше водных димеров взаимодействует с молекулами соли, тем активнее вращаются молекулы воды и раствор труднее перевести в твердое состояние. Теплофизические свойства воды и водных растворов могут меняться при внешних электрофизических воздействиях.

Теплофизические параметры теплоносителя (температура замерзания, температуропроводность, растворимость соли, плотность) – воды и солевых растворов различной концентрации, а также электрофизические параметры (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, электропроводность, температурный коэффициент электропроводности) изменяются при воздействии электрического и магнитного поля [2].

Известно, при фазовом переходе «вода – лед» выделяется энергия 334 кДж. Эта энергия может быть использована для отопления и горячего водоснабжения сельскохозяйственных объектов. Для получения энергии фазового перехода «вода – лед» разработана экспериментальная установка [3, 4]. С использованием микроволновой печи *Mystery MMW-2315G* мощно-

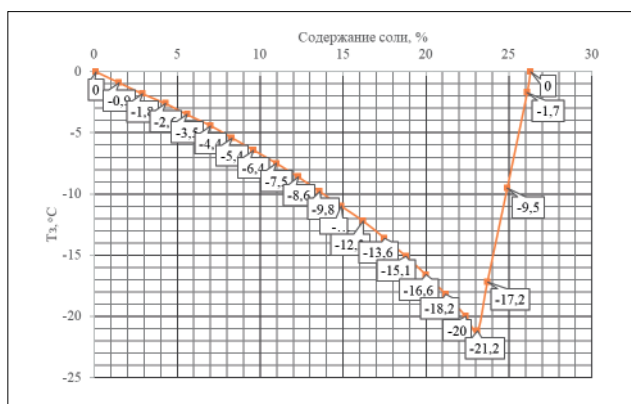


Рис. 1. Зависимость температуры замерзания раствора хлористого натрия от содержания в нем соли

Fig. 1. Relationship between the freezing temperature of a sodium chloride solution and its salt content

стью 800 Вт, с частотой магнетрона 2450 МГц изучено электрофизическое воздействие электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) [5].

Отмечено, что водный раствор хлорида натрия замерзает при разной температуре в зависимости от его концентрации и продолжительности обработки электромагнитным полем СВЧ.

Цель исследования – экспериментально определить теплофизические и электрофизические параметры теплоносителя при воздействии на него электромагнитным полем сверхвысокой частоты, с перспективой применения этого теплоносителя в разработанной установке.

Материалы и методы. Чтобы выбрать теплоноситель для получения энергии при отоплении 100 м² здания сельскохозяйственного объекта, применяли воду и солевой раствор хлорида натрия концентрацией 1-20%.

Измерили температуру замерзания, pH, удельную электропроводность солевого раствора. Источником ЭМП СВЧ служила микроволновая печь *Mystery MMW-2315G* мощностью 800 Вт, с частотой магнетрона 2450 МГц. Продолжительность обработки составляла 30;

60 и 120 с. Концентрация раствора – 1%, 5; 10; 15 и 20%, объем 50 мл (высота жидкости 3 см, диаметр стакана – 4 см). Температура холодной воды в водопроводной сети в отопительный период равна 5°C; в неоптоительный период – 15°C (Постановление Правительства РФ № 306 от 23.05.2006 в редакции от 16.04.2013 «Об утверждении Правил установления и определения нормативов потребления коммунальных услуг»).

Использовали методику трехфакторного активного планирования эксперимента типа 23 и программу *Statistic V5.0* [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При воздействии ЭМП СВЧ на водопроводную воду и раствор с концентрацией от 1 до 15% температура замерзания не изменилась (рис. 2). При концентрации 20% температура замерзания раствора снижается с минус 16,6 до минус 18,5°C. Концентрация эвтектического раствора равна 23,1%. При этом значении температуры замерзания падает с минус 21,2 до минус 25°C.

При воздействии ЭМП СВЧ pH раствора увеличивается (рис. 3). Особенно это заметно в варианте с концентрацией 5% – с 5,7 до 6,5. В случае 20%-го раствора этот показатель увеличился с 6,2 до 6,4. Для теплоносителя в разработанной установке это приемлемый результат. Удельная электропроводность 15%-го солевого раствора уменьшилась с 1451 до 1262 мкСм/см. Это соответствует требованиям к теплоносителю в разработанной установке. Для растворов концентрацией 1% и 5% значения не изменились.

Концентрация соли в водопроводной воде при обработке ЭМП СВЧ увеличилась с 263 до 306 мг/л (рис. 5).

Составили матрицу планирования эксперимента по оптимизации режимов регулирования электрофи-

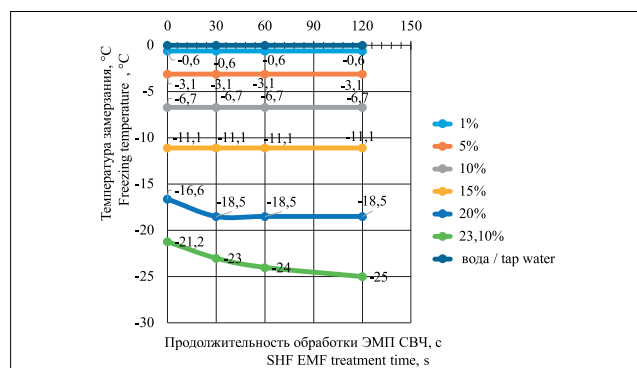


Рис. 2. Зависимость температуры замерзания воды и раствора от продолжительности обработки ЭМП СВЧ

Fig. 2. Relationship between the freezing temperature of water and a solution and the SHF EMF treatment time, sec.

зического воздействия на солевой раствор (таблица).

Пользуясь методикой трехфакторного активного планирования эксперимента типа 23 и программой *Statistic V5.0* [6] построили следующие поверхности откликов и их двумерные сечения в изолиниях: температуры замерзания, кислотности и удельной электропро-

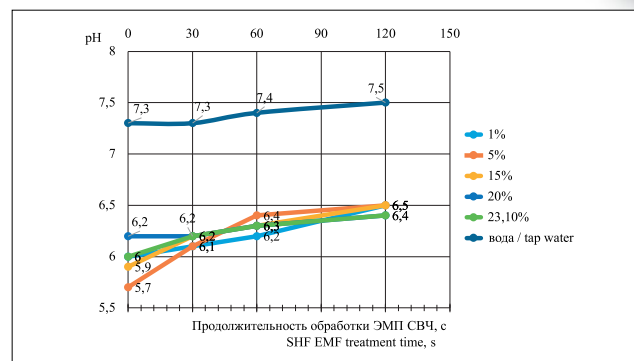


Рис. 3. Зависимость pH раствора от его концентрации и продолжительности обработки ЭМП СВЧ

Fig. 3. Relationship between the pH factor of a solution and the SHF EMF treatment time

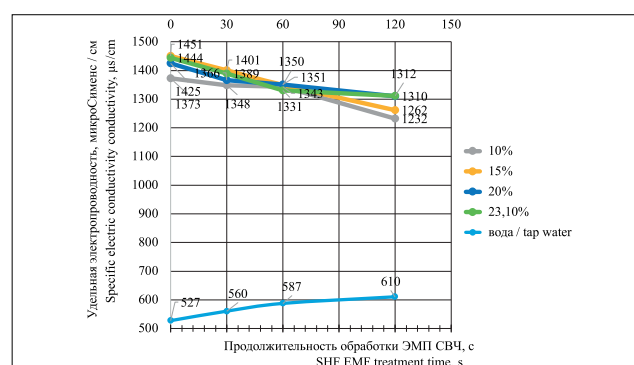


Рис. 4. Зависимость удельной электропроводности от концентрации раствора и продолжительности обработки ЭМП СВЧ

Fig. 4. Relationship between specific electric conductivity and the concentration of a solution and the SHF EMF treatment time

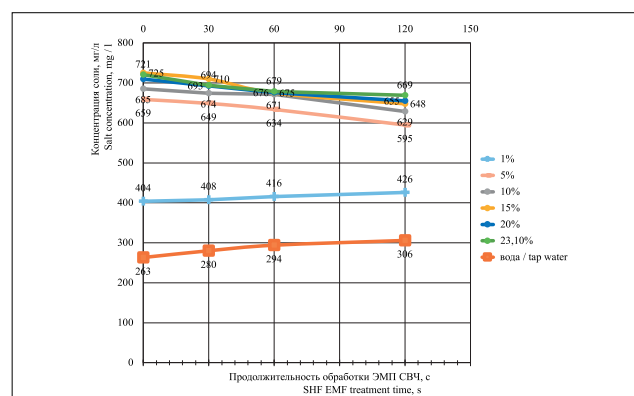


Рис. 5. Зависимость концентрации соли в водопроводной воде при обработке ЭМП СВЧ

Fig. 5. Relationship between salt concentration in tap water and the SHF EMF treatment time

водности солевого раствора (рис. 6-8). Эмпирическое выражение модели температуры замерзания раствора в зависимости от продолжительности обработки ЭМП СВЧ и концентрации раствора будет иметь вид:

$$T_3 = -0,6693 - 0,0018\tau - 0,1037c + 6,5789 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 - 0,0013\tau c - 0,0353c^2.$$

Эмпирическое выражение модели удельной электропроводности раствора в зависимости от продол-

Таблица					Table		
МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМП СВЧ НА СОЛЕВОЙ РАСТВОР NaCl							
PLANNING MATRIX OF THE EXPERIMENT TO OPTIMIZE THE REGULATION MODES OF THE MICROWAVE EMF EFFECTS ON NaCl SALINE SOLUTION							
№	Варьируемые параметры Variable parameters				Критерии оптимизации Optimization criteria		
	продолжительность обработки ЭМП СВЧ, с SHF EMF treatment time, s		концентрация раствора, % solution concentration,%				
	x_1	τ	x_2	c	Y_1	Y_2	Y_3
1	+	120	+	23,1	−25,0	6,4	1312
2	+	120	−	1	−0,6	6,5	852
3	−	0	+	23,1	−21,2	6,0	1444
4	−	0	−	1	−0,6	6,0	833
5	0	60	0	15	−11,1	6,3	1350
6	−	0	0	15	−11,1	5,9	1451
7	+	120	0	15	−11,1	6,5	1262
8	0	60	−	1	−0,6	6,2	817
9	0	60	+	23,1	−24,0	6,3	1331
10	0	60	0	15	−11,1	6,3	1350
11	0	60	0	15	−11,1	6,3	1350
Примечание: Y_1 – температура заморзания, T_3 , °C; Y_2 – pH, кислотность; Y_3 – удельная электропроводность, σ , мкСм/см							
Note: Y_1 – freezing temperature, T_3 , °C; Y_2 – pH, acidity; Y_3 – specific electrical conductivity, σ , $\mu\text{S}/\text{cm}$							

жительности обработки ЭМП СВЧ и концентрации раствора выглядит следующим образом:

$$\sigma = 778,8615 - 0,7394\tau + 68,1052c + 0,0062\tau^2 - 0,0643\tau c - 1,6739c^2.$$

Расчетным путем установлено, что для отопления сельскохозяйственного объекта площадью 100 м² мощность теплосилового оборудования составит 12,8 кВт, в сутки – 306 кВт·ч. Требуемый объем льда – 3602,8 л, объем выработки льда теплообменника – 150,1 л/ч. Объем бака для сбора льда составит 2 м³, бака теплообменника с силиконовыми трубками – 2 м³, бака для электрофизической обработки воды – 1 м³, общий объем бака теплообменника – 5 м³. Длина силиконовой трубки диаметром 30 мм для осуществления процесса образования льда составит 1,5 м. Внутри силико-

новой трубки перемещается солевой раствор, а на поверхности намораживается лед, его расход составляет 2 м³/ч. Максимальная толщина льда – 3,5 см.

Выводы. Обработка электрофизическим воздействием в разработанной установке понижает температуру заморозания теплоносителя, что подтверждено экспериментально. При воздействии ЭМП СВЧ (частота магнетрона 2450 МГц, номинальная мощность – 800 Вт, продолжительность 120 с) на раствор хлорида натрия концентрацией 20% наблюдается понижение температуры заморозания раствора с минус 16,6 до минус 18,5°C, для эвтектического раствора концентрацией 23,1% температура заморозания падает с

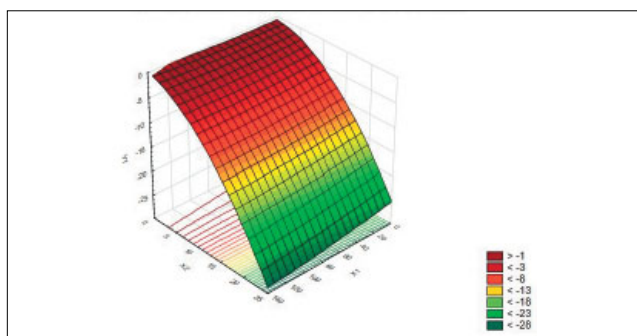


Рис. 6. Двумерные сечения в изолиниях и поверхность отклика трехфакторной модели температуры заморозания раствора в зависимости от продолжительности обработки ЭМП СВЧ и концентрации раствора

Fig. 6. Two-dimensional cross-sections in contour curves and the response surface of a three-factor model of the freezing temperature of a solution, depending on the SHF EMF treatment time and the solution concentration

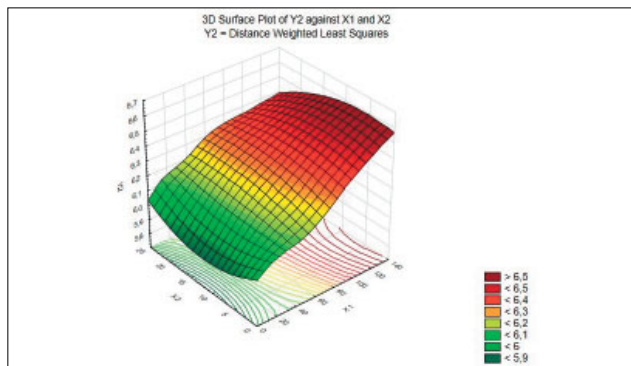
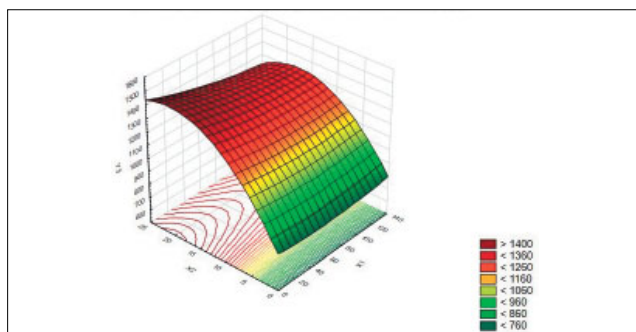


Рис. 7. Двумерные сечения в изолиниях и поверхность отклика трехфакторной модели кислотности раствора в зависимости от продолжительности обработки ЭМП СВЧ и концентрации раствора

Fig. 7. Two-dimensional cross-sections in contour curves and the response surface of a three-factor model of the acidity of a solution, depending on the SHF EMF treatment time and the solution concentration



минус 21,2 до минус 25°C. При воздействии ЭМП СВЧ на водопроводную воду температура замерзания не изменилась. Наиболее заметное изменение pH (а именно – увеличение с 5,7 до 6,5) соответствует раствору с концентрацией 5%. Уменьшение удельной электропроводности более выражено в варианте с концентрацией раствора 15% – с 1451 до 1262 мкСм/см. Концентрация соли отчетливо повысилась в водопроводной

Рис. 8. Двумерные сечения в изолиниях и поверхность отклика трехфакторной модели удельной электропроводности раствора в зависимости от продолжительности обработки ЭМП СВЧ и концентрации раствора

Fig. 8. Two-dimensional cross-sections in contour curves and the response surface of a three-factor model of the specific electric conductivity of a solution, depending on the SHF EMF treatment time and the solution concentration

воде – с 263 до 306 мг/л. В разработанной экспериментальной установке следует рекомендовать в качестве теплоносителя солевой раствор хлорида натрия концентрацией 20%, температура замерзания которого составляет минус 16,6°C. Необходимо предусмотреть дополнительную емкость для электрофизической обработки теплоносителя. После обработки ЭМП СВЧ температура замерзания солевого раствора понизилась до минус 18,5°C.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорохов А.С. Эффективность оценки качества сельскохозяйственной техники и запасных частей // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»*. 2015. N1(65). С. 31-35.
2. Dykstra C.E. External electric field effects on the water trimer. *Chemical Physics Letters*. 1999. Vol. 299. Issue 2. 132-136.
3. Васильева И.Г. Инновационная энергосберегающая установка // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И.Я. Яковлева*. 2011. N4(72). Ч.1. С. 7-12.
4. Ershova I., Poruchikov D., Vasiliev A., Samarin G., Ruzhy-

ev V., Zhukov A., Normov D. Technical and economic efficiency assessment of heat pump electric regulator application on agricultural object. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*. 2019. 877-885.

5. Родионова А.В., Боровков М.С., Ершов М.А. Обоснование выбранной частоты электромагнитных излучений при физиопрофилактике крольчат // *Нива Поволжья*. 2012. N1(22). С. 108-110.

6. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ. 2004. 357 с.

REFERENCES

1. Dorokhov A.S. Effektivnost' otsenki kachestva sel'skokhozyaystvennoy tekhniki i zapasnykh chastey [Effectiveness of assessing the quality of agricultural machinery and spare parts]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina"*. 2015. N1(65). 31-35 (In Russian).
2. Dykstra C.E. External electric field effects on the water trimer. *Chemical Physics Letters*. 1999. Vol. 299. Issue 2. 132-136 (In English).
3. Vasilieva I.G. Innovatsionnaya energosberegayushchaya ustanovka [Innovative energy-saving installation]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni I.Ya. Yakovleva*. 2011. N4(72). Part 1. 7-12 (In Russian).
4. Ershova I., Poruchikov D., Vasiliev A., Samarin G., Ruzhy-

ev V., Zhukov A., Normov D. Technical and economic efficiency assessment of heat pump electric regulator application on agricultural object. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*. 2019. 877-885 (In English).

5. Rodionova A.V., Borovkov M.S., Ershov M.A. Obosnovanie vybrannoy chastoty elektromagnitnykh izlucheni pri fizioprofilaktike krol'chat [Rationalizing the selected frequency of electromagnetic radiation during physioprophylaxis treatment of rabbits]. *Niva Povolzh'ya*. 2012. N1(22). 108-110 (In Russian).

6. Spirin N.A., Lavrov V.V. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhenernogo eksperimenta [Methods of planning and processing the results of an engineering experiment]. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet – UPI. 2004. 357 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 31.07.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 31.07.2019

Статья принята к публикации 22.11.2019
The paper was accepted
for publication on 22.11.2019

Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве

Леонид Анатольевич Марченко,

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: marchenko1312@mail.ru;

Анатолий Алексеевич Артюшин,

член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, ведущий специалист;

Игорь Геннадьевич Смирнов,

доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;

Татьяна Васильевна Мочкова,

кандидат сельскохозяйственных наук, главный специалист, e-mail: naukavim@mail.ru;

Артем Юрьевич Спиридонов,

младший научный сотрудник, e-mail: artyom-spiridonov@yandex.ru;

Рашид Курбанович Курбанов,

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: celeba@outlook.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Цифровое сельское хозяйство предопределяет развитие роботизированных агротехнологий применения пестицидов и удобрений с использованием беспилотных авиационных систем, основу которых составляют беспилотные летательные аппараты с определенной полезной нагрузкой для мониторинга сельскохозяйственных угодий и внесения агрохимикатов. (*Цель исследований*) Разработать технологию дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с помощью беспилотных летательных аппаратов в цифровом сельском хозяйстве. (*Материалы и методы*) В ходе работы использовали Методические рекомендации по применению средств химизации в системе точного земледелия (ВИМ), нормативно-техническую документацию на беспилотные авиационные системы. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что разрабатываемая технология включает последовательное выполнение информационных и технологических операций в режимах off-line и on-line. Установили, что норма внесения рабочей жидкости пестицидов 10-20 литров на гектар сокращает потери вследствие сноса из зоны обработки и обеспечивает наибольшую производительность внесения пестицидов с применением беспилотных летательных аппаратов. Определили, что производительность обработки поля возрастает с повышением длины гона и уменьшается с увеличением нормы расхода рабочей жидкости. Выявили рациональные значения длины гона – 0,8-3,2 километра. Установили требования к качеству авиационного опрыскивания. Доказали, что для увеличения производительности беспилотных летательных аппаратов при подкормке растений необходимо использовать их с большой полезной нагрузкой – 300-400 килограммов. (*Выводы*) Разработали технологию дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с помощью беспилотных летательных аппаратов, алгоритмы подготовки аппаратов к полету, мониторинга сельскохозяйственных угодий, создания ортофотоплана полей, электронных карт вегетационных индексов, фитосанитарного состояния посевов, дифференцированного внесения пестицидов и удобрений.

Ключевые слова: цифровое сельское хозяйство, точное земледелие, беспилотные летательные аппараты, пестициды, удобрения, дифференцированное внесение.

■ **Для цитирования:** 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. №5. С. 38-45. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-38-45.

Technology of Pesticides and Fertilizers Application with Unmanned Aerial Vehicles in Digital Agriculture

Leonid A. Marchenko,

Ph.D.(Eng.), key research engineer;

Anatoliy A. Artushin,

corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc.(Eng.), professor, leading specialist;

Igor G. Smirnov,

Dr.Sc.(Agr.), key research engineer;

Tatyana V. Mochkova,

Ph.D.(Agr.), chief specialist;

Artem Yu. Spiridonov,

junior research engineer;

Rashid K. Kurbanov,

Ph.D.(Eng.), key research engineer

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation



Abstract. Digital agriculture predetermines the development of robotic agricultural technologies for the application of pesticides and fertilizers using unmanned aerial systems, which are based on unmanned aerial vehicles (UAVs) with a certain working load for monitoring agricultural land and applying agrochemicals. (*Research purpose*) To develop a technology for variable-rate application of pesticides and fertilizers using unmanned aerial vehicles in digital agriculture. (*Materials and methods*) In the process of study, the authors used the methodological recommendations on the application of chemicals in the precision farming system (offered by VIM), as well as the normative and technical documentation for unmanned aircraft systems. (*Results and discussion*) It was shown that the developed technology includes the sequential execution of information and technological operations in off-line and on-line modes. It was found that the application rate of the liquid pesticides of 10-20 liters per hectare reduces losses due to drift from the treatment area and ensures the highest productivity of pesticide application using unmanned aerial vehicles. It was determined that the field processing performance increases as the run length increases, and decreases with the increasing flow rate of the liquid chemical. The rational run length was established to equal 0.8-3.2 kilometers. The authors established requirements for the spraying quality of unmanned aerial vehicles. It was proved that to increase the productivity of unmanned aerial vehicles during plant top-dressing, it is necessary to use unmanned aerial vehicles with a larger working load of 300-400 kilograms. (*Conclusions*) The authors have developed a technology for variable-rate application of pesticides and fertilizers using unmanned aerial vehicles, algorithms for preparing them for flight, monitoring agricultural lands, making a field orthophotomap, electronic maps of vegetation indices, the phytosanitary status of crops, and variable-rate application of pesticides and fertilizers.

Keywords: digital agriculture, precision farming, unmanned aerial vehicles, pesticides, fertilizers, variable-rate application.

For citation: Marchenko L.A., Artushin A.A., Smirnov I.G., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Tekhnologiya vneseniya pestitsidov i udobreniy bespilotnymi letatel'nyimi apparatami v tsifrovom sel'skom khozyaystve [Technology of pesticides and fertilizers application with unmanned aerial vehicles in digital agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 38-45 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-38-45.

В проекте «Цифровое сельское хозяйство», разработанном Минсельхозом РФ, поставлена задача превратить сельское хозяйство в высокотехнологичную отрасль, обеспечивающую население России высококачественным продовольствием на основе реализации цифровых технологий.

Цифровое сельское хозяйство требует более высокого уровня технического обеспечения, основанного на комплексах автоматических или дистанционно-управляемых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для мониторинга агроценозов, управления агротехнологиями путем дифференцированного внесения пестицидов и удобрений. БЛА обеспечивают качественное внесение средств защиты растений и удобрений в оптимальные агротехнические сроки, при высокой влажности почвы, на сложных рельефах поля, горных склонах садов и виноградников, рисовых полях, в поздние периоды развития агроценозов, что минимизирует риски, связанные с недобором урожая и снижением его качества, убытками сельхозтоваропроизводителей. В то же время, несмотря на широкое применение в развитых странах мира точного земледелия, дифференцированное внесение удобрений и пестицидов осуществляется в основном наземной техникой.

По оценкам *J'son & Partners Consulting* основную долю беспилотных летательных аппаратов сельскохозяйственного назначения на мировом рынке в 2018 г. занимали мультикоптеры – 56% и дроны-планеры – 39%. При этом 69% БЛА используют для мониторинга сельскохозяйственных угодий и только 24% при-

меняют для внесения средств защиты растений и удобрений.

За последнее время отмечен рост производства российских БЛА в связи с увеличением спроса на них, переходом на импортозамещение в условиях санкций, бюджетным, грантовым и частным финансированием разработок беспилотной авиационной техники [1].

В сельскохозяйственном производстве России БЛА применяют в основном для мониторинга сельскохозяйственных и лесных угодий, создания электронных карт полей с определением нормализованного вегетационного индекса, прогноза урожайности, оценки фитосанитарного состояния посевов, экологического мониторинга, контроля объемов и качества выполнения сельскохозяйственных работ. Обоснованы основные параметры БЛА сельскохозяйственного назначения [2-4]. БЛА с полезной нагрузкой до 10 кг применяют для обработки посевов биологическими средствами защиты растений, в частности для внесения трихограммы, а также разбрасывания приманок для борьбы с полевыми грызунами. Для внесения удобрений и пестицидов требуются БЛА с полезной нагрузкой 80-400 кг.

Технологии точного земледелия требуют более высокого уровня технического обеспечения, основанного на программируемых, полностью автономно функционирующих или дистанционно управляемых беспилотных авиационных системах (БАС), содержащих комплексы автоматических или дистанционно управляемых БЛА для мониторинга агроценозов, управления агротехнологиями путем дифференци-

рованного внесения минеральных удобрений, пестицидов и других агрохимикатов [5-7].

Цель исследований – разработать технологию дифференцированного внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Разработку проводили на основании Методических рекомендаций по применению средств химизации в системе точного земледелия (М.: ВИМ, 2016), нормативно-технической документации: ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения; ГОСТ 56122-2014. Воздушный транспорт. Беспилотные авиационные системы. Общие требования; Циркуляра 328 ИКАО. Беспилотные авиационные системы (БАС); Правил проведения авиационно-химических работ в соответствии с Приказом Минтранса РФ от 17.07.2008 № 108 (ред. от 23.06.2009) «Об утверждении федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖ-

ДЕНИЕ. Основу технологии дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с использованием БЛА составляет беспилотная авиационная система (БАС), которая включает беспилотный авиационный комплекс (БАК), содержащий определенное число БЛА для мониторинга сельскохозяйственных угодий, внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов, технические средства их транспортировки к полю, заправки рабочими жидкостями пестицидов и удобрений, взлетно-посадочные технические средства, устройства управления и связи с пунктом управления полетом и программное обеспечение. Отдельными модулями входят средства интеграции с другими

системами в воздушном пространстве, средства ремонта и технического обслуживания, вспомогательные средства, эксплуатационно-техническая документация и технический персонал (рисунк).

Для дифференцированного внесения средств защиты растений и удобрений предпочтительны БЛА многократного использования, безаэродромного базирования, с небольшой разбежкой для взлета или с вертикальным взлетом и вертикальной посадкой, низковысотные, вертолетного, винтокрылого и мультироторного типов, оснащенные автопилотом и системой дифференцированного распределения рабочих жидкостей удобрений и пестицидов по заданной программе.

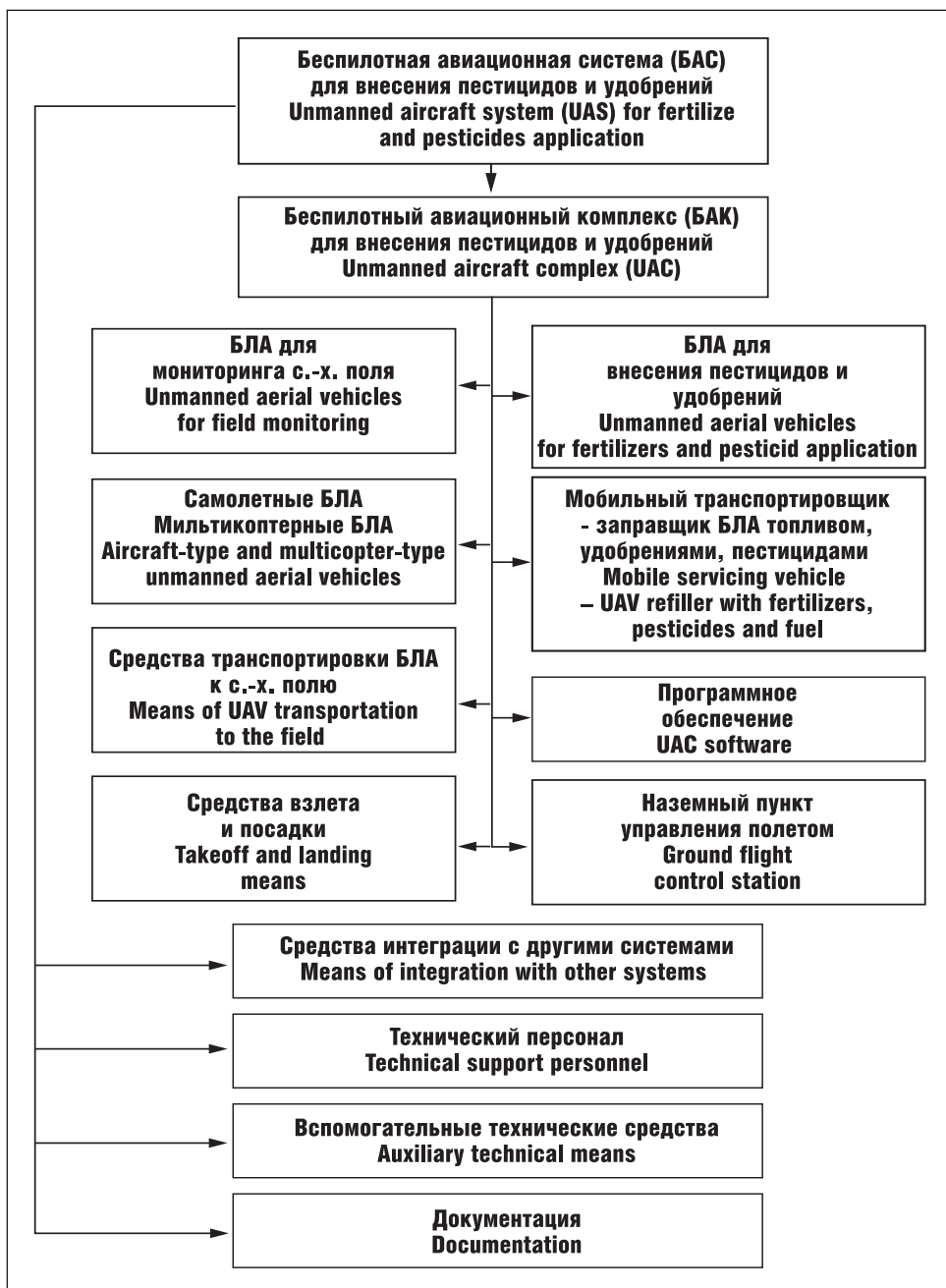


Рис. 1. Блок-схема беспилотной авиационной системы для внесения удобрений и пестицидов
Fig. 1. Block diagram of an unmanned aircraft system for fertilizers and pesticides application

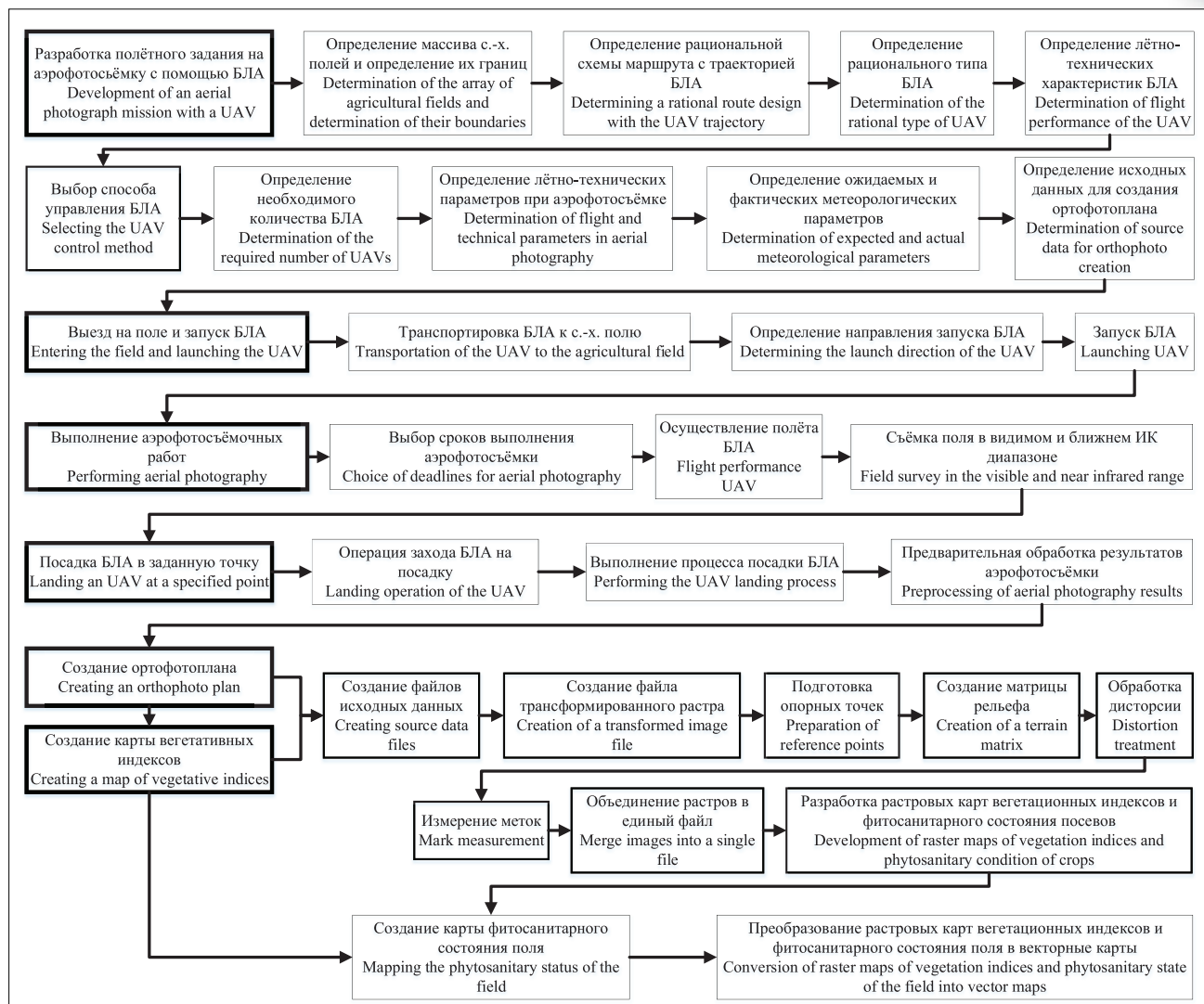


Рис. 2. Блок-схема основных операций по сбору исходной информации для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений и разработки карт-заданий для БЛА

Fig. 2. Block diagram of basic operations to collect initial information for differentiated application of pesticides and fertilizers and the development of task maps for UAVS

Технология дифференцированного внесения удобрений и пестицидов при возделывании сельскохозяйственных культур в системе точного земледелия выполняется в режимах *off-line* и *on-line*.

Реализация технологической операции в режиме *off-line* предусматривает предварительную подготовку на стационарном компьютере карты-задания на дифференцированное внесение пестицидов, удобрений и других агрохимикатов в виде электронной карты, где указывают их дозы для каждого выделенного и пространственно привязанного с помощью GPS-приемника элементарного участка поля.

Алгоритм разработки карт-заданий для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений (представлен на рисунке 2) предусматривает:

- составление полетного задания на аэрофотосъемку, включающего определение массива сельскохозяйственных полей и их границ, выбор сроков выполнения

аэрофотосъемки, рациональную схему маршрута БЛА с траекторией полета, выбор рационального типа БЛА с необходимыми лётно-техническими характеристиками для аэрофотосъемки при создании ортофотоплана, количество БЛА в полете, способ управления БЛА, ожидаемые и фактические метеорологические параметры;

- транспортировку БЛА к сельскохозяйственному полю, определение направления запуска БЛА и его непосредственный запуск;

- выполнение аэрофотосъёмочных работ, состоящих из полета комплекса БЛА по заданным траекториям и осуществление съёмки поля в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах;

- посадку БЛА в заданную точку, включающую заход БЛА на посадку;

- разработку ортофотоплана, включающую предварительную обработку результатов аэрофотосъемки, создание файлов входных данных и файлов транс-

формированного раstra, подготовку опорных точек, создание матрицы рельефа, обработку дисторсии, измерение меток, объединение растров в единый файл;

- создание карты вегетационных индексов, предусматривающее разработку растровых карт вегетационных индексов и фитосанитарного состояния посевов и их преобразование в векторные соответствующего назначения.

Алгоритм технологического процесса дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с применением БЛА включает разработку полетного задания, предполетную подготовку, взлет, программируемый полет БЛА с внесением рабочих жидкостей пестицидов или удобрений, посадку БЛА в заданную точку.

Полетное задание содержит выбор рационального типа БЛА с заданной полезной нагрузкой для внесения пестицидов и удобрений, регистрационный номер БЛА, дату полета, маршрут полета (траекторию при обработке каждого сельскохозяйственного поля) и его регистрацию, электронную карту-задание на обработку пестицидами и внесение удобрений с координатами участков поля, реперные точки начала полета, участков разворота, рабочую скорость и высоту полета.

Предполетная подготовка БЛА предусматривает доставку БЛА, вспомогательных технических средств, топлива, удобрений, пестицидов к месту начала работы, подготовку модуля опрыскивания и бортового оборудования БЛА к полету, заправку соответствующих емкостей топливом, рабочими жидкостями пестицидов или удобрений, мониторинг метеоусловий, загрузку в автопилот электронной карты-задания на полет, установку БЛА на исходную позицию, запуск двигателя.

Технологическая операция дифференцированного внесения пестицидов и удобрений включает взлет БЛА, набор высоты, подлет к реперной точке, установление заданных параметров полета (высоты, скорости, стабилизации углов ориентации), программируемый полет по заданной траектории, внесение рабочей жидкости пестицидов или удобрений, контроль параметров полета и нормы внесения рабочей жидкости, контроль уровня топлива и расхода рабочей жидкости, посадку БЛА к месту заправки топливом и рабочей жидкостью.

Режим *on-line* предполагает только предварительную разработку агротехнических требований для заданной операции – количественную зависимость дозы удобрений от показаний, установленных на БЛА оптических датчиков.

В режиме *on-line* дозы внесения удобрений БЛА по элементарным участкам определяются бортовым компьютером непосредственно во время выполнения технологического процесса на основании показаний датчиков, установленных на БЛА, и агротехнических требований (количественных зависимостей дозы от показаний датчиков), заложенных предварительно в

программу бортового компьютера. Этот режим внесения удобрений используют при подкормке растений азотными удобрениями в период их вегетации на зерновых культурах, начиная с фазы начала выхода в трубку.

Из поставляемых сельскому хозяйству азотных удобрений наиболее эффективными и технологичными для применения в точном земледелии считаются жидкие азотные удобрения – карбамид-аммиачная смесь (КАС, ТУ 113-03-629-90), содержащая три формы азота (аммонийную, нитратную и амидную), что обеспечивает пролонгированное питание растений. При активной вегетации азот, внесенный в форме КАС, усваивается растениями быстрее (в течение 2-6 ч), чем при использовании твердых азотных удобрений (2-6 сут.) [8].

Азотные удобрения вносят под озимые зерновые культуры (пшеницу, рожь, тритикале), размещенные по занятым парам и непаровым предшественникам до посева (основное внесение). Дозы азота составляют 20-30 кг/га, с учетом показателей почвенной диагностики минерального азота. Практикуется также поздняя осенняя некорневая подкормка (доза азота – 20-30 кг/га) по данным диагностики состояния посевов.

Первую весеннюю подкормку проводят в фазу кушения озимых культур. Дозы азота составляют 60-70 кг/га (по данным почвенной и растительной диагностики). Подкормку растений проводят с целью ускорения отрастания посевов для усиления мощности кушения в максимально сжатые сроки (не более 10 дней), так как при более поздних сроках подкормки формируются непродуктивные боковые побеги, которые не успевают созреть до уборки урожая.

Вторую подкормку проводят в фазу начала выхода в трубку, когда закладывается основной потенциал урожайности озимых зерновых культур (длина колоса, число зерен в колосе, масса зерна одного колоса). Рекомендуемые дозы азота по результатам растительной диагностики – 35-40 кг/га.

Третью подкормку проводят в фазу выхода в трубку для получения высокой урожайности зерна. Оптимальная доза – 20-25 кг азота на 1 га.

Четвертая подкормка озимых зерновых совпадает с фазой колошения, когда синтез белковых веществ в зерне протекает в результате реутилизации азота из вегетативных органов, поскольку в почве к этому сроку остаются только следы минерального азота.

Азотные удобрения при возделывании яровых зерновых культур вносят весной под предпосевную культивацию (основное внесение) в дозах 60-70 кг азота на 1 га (2/3 нормы) по результатам почвенной диагностики содержания минерального азота. Первую подкормку проводят в фазу начала выхода в трубку (1 узел), средняя доза азота составляет 20-40 кг/га по результатам растительной диагностики. Вторую подкормку яровых зерновых культур планируют в фазу вы-

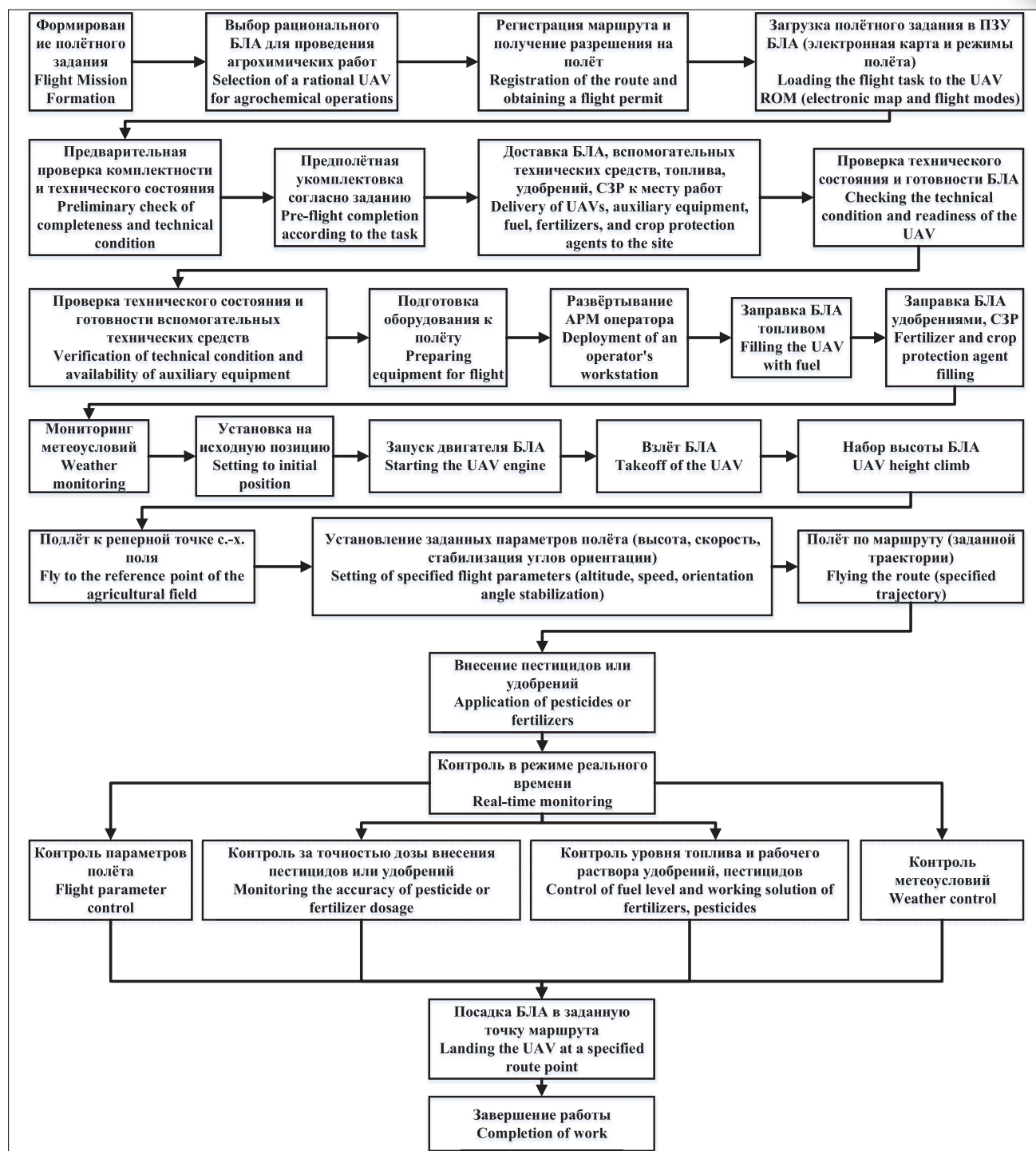


Рис. 3. Блок-схема алгоритма подготовки беспилотного летательного аппарата к полету и дифференцированного внесения удобрений и пестицидов

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for preparing an unmanned aerial vehicle for flight and differentiated application of fertilizers and pesticides

хода в трубку в дозах 30-40 кг азота на 1 га. Для повышения содержания белка в зерне рекомендуется проводить некорневую подкормку в фазу колошения. Дозы в соответствии с результатами тканевой диагностики составляют 15-20 кг азота на 1 га.

При второй и последующих подкормках озимых и яровых зерновых культур для предотвращения ожо-

гов растений КАС разводят водой в соотношении 1:2 или 1:3 в фазу колошения, либо используют 10%-ный раствор мочевины в фазу выхода в трубку и 30%-ный раствор в фазы колошения – начала цветения [8].

С использованием БЛА можно вносить микроудобрения, регуляторы роста растений при расходе рабочей жидкости 20-50 л/га.

Определены основные параметры технологических процессов дифференцированного внесения удобрений и пестицидов с помощью БЛА и требования к качеству авиационного опрыскивания:

- нормы внесения рабочих жидкостей азотных удобрений 50-200 л/га с дискретностью доз 25-40 л/га, пестицидов – 10-20 л/га с дискретностью доз 5 л/га;
- отклонение фактической дозы рабочей жидкости от заданной – не более 5%;
- диапазон медианно-массовых диаметров в спектре распыла при внесении инсектицидов и фунгицидов – 80-120 мкм, гербицидов – 150-300 мкм, удобрений 700-1500 мкм;
- неравномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата – не более 10%;
- снос рабочих жидкостей за пределы обрабатываемого участка – не более 10%;
- время установки заданной дозы на границах выделенных участков площадью 0,5 га при рабочей ширине захвата 5 м и скорости полета 40 км/ч – не более 4,5 с;
- рабочая скорость полета – 40-70 км/ч;
- высота полета при внесении удобрений и пестицидов – 0,5-1,5 м;
- точность позиционирования на границах, выделенных на карте-задании участков поля, – 0,1 м.

Производительность БЛА при обработке сельскохозяйственного поля в летный час в первом приближении является функцией летно-технических и технологических параметров:

$$W = f(G, H, \rho, B_p, V_p, L_r, L_n, T_{вп}, T_{раз}, T_n),$$

где W – производительность БЛА;

G – полезная нагрузка;

H – норма внесения рабочей жидкости;

ρ – плотность рабочей жидкости;

B_p – рабочая ширина внесения;

V_p – скорость полета;

L_r – длина гона сельскохозяйственного поля;

L_n – расстояние перелета с одного поля на другое;

$T_{вп}$ – время на взлет и посадку;

$T_{раз}$ – время разворота при заходе на очередной гон;

T_n – время подготовки на очередной полет.

Установлено, что норма внесения рабочей жидкости пестицидов 10-20 л/га сокращает потери вследствие сноса из зоны обработки и обеспечивает наибольшую производительность внесения пестицидов с применением БЛА. Производительность обработки сельскохозяйственного поля БЛА возрастает с повышением длины гона и уменьшается с увеличением нормы расхода рабочей жидкости. Рациональные значения длины гона, обеспечивающие незначительное изменение производительности БЛА в установленных пределах, составляют 0,8-3,2 км. При некорневой подкормке растений, в частности растворами азотных удобрений, нормы внесения увеличиваются до 200 л/га, что вызывает снижение производи-

сти БЛА более чем в 2 раза. Для увеличения производительности БЛА при подкормке растений необходимо использовать БЛА с большой полезной нагрузкой – 300-400 кг.

Для реализации технологии на базе государственного-частного партнерства ФНАЦ ВИМ, АО «Камов» и ООО «Гироплан-РУС» разработали беспилотную авиационную систему БАС-137 ВИМ на базе беспилотного воздушного судна БВС-137 ВИМ соосной схемы (взлетная масса 280 кг, полезная нагрузка 80 кг) и БЛА на базе гироплана (взлетная масса 750 кг, полезная нагрузка до 400 кг) для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений.

Расчеты показывают, что технология внесения пестицидов и удобрений с помощью БЛА в системе точного земледелия повышает урожайность сельскохозяйственных культур до 20%, окупаемость минеральных удобрений – в 1,5-1,8 раза, уменьшает нормы внесения пестицидов – на 20-50% и, как следствие, снижает экологическую нагрузку на окружающую среду.

Выводы. Технология дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с применением беспилотных летательных аппаратов в цифровом сельском хозяйстве включает последовательное выполнение в режимах *off-line* и *on-line* информационных и технологических операций формирования банка данных внутрипольной неоднородности плодородия каждого элементарного участка, фитосанитарного состояния посевов, составляемого на основе дистанционного мониторинга почвы и агроценозов с помощью БЛА, для получения программируемой урожайности с учетом ограничений и допустимых рисков, создания электронной карты-задания на применение удобрений и пестицидов и их дифференцированного внесения с использованием беспилотной авиационной системы, состоящей из определенного числа БЛА с необходимой и достаточной полезной нагрузкой для мониторинга сельскохозяйственных угодий, внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов, мобильных технических средств транспортировки БЛА к сельскохозяйственному полю, заправки их рабочими жидкостями пестицидов и удобрений, взлетно-посадочных технических средств, устройств управления и связи.

Представлены алгоритмы подготовки БЛА к полету, мониторинга сельскохозяйственных угодий, создания ортофотопланов полей, электронных карт вегетационных индексов и фитосанитарного состояния посевов, дифференцированного внесения пестицидов и удобрений.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Г.А., Кудрявцев И.В., Крылов Е.Д. Ретроспективный анализ, современное состояние и тенденции развития отечественных беспилотных летательных аппаратов // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018. №9. С. 1-19.
2. Марченко Л.А., Мочкова Т.В., Курбанов Р.К., Краснобородко В.В. Основные требования к беспилотным летательным аппаратам для внесения удобрений и пестицидов // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. №4(33). С. 107-112.
3. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Smirnov I.G., Kolesnikova V.A., Marchenko L.A. Substantiation of parameters of unmanned aerial vehicles for pesticides and fertilizers application in precision farming system. *International scientific journal mechanization in agriculture & conserving of the resources*. 2017. №5. 168-171.
4. Спиридонов А.Ю., Курбанов Р.К. Обоснование параметров беспилотного летательного аппарата для дифферен-

- цированного внесения трихограммы // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. №4(33). С. 101-106.
5. Измайлов А.Ю., Артюшин А.А., Колесникова В.А. и др. Методические рекомендации по применению средств химизации в системе точного земледелия. М.: ВИМ. 2016. 100 с.
6. Марченко Л.А., Смирнов И.Г., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Колесникова В.А. Дифференцированное внесение пестицидов с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. №4. С. 17-23.
7. Михайленко И.М. Беспилотная малая авиация в сельском хозяйстве // *Агрофизика*. 2015. №2. С. 16-24.
8. Семененко Н.Н. Прогрессивные системы применения азотных удобрений. Минск: Хата. 2003. 162 с.

REFERENCES

1. Kuznetsov G.A., Kudryavtsev I.V., Krylov Ye.D. Retrospektivnyy analiz, sovremennoe sostoyanie i tendentsii razvitiya otechestvennykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Retrospective analysis, current status, and development trends of domestic unmanned aerial vehicles]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2018. №9. 1-19 (In Russian).
2. Marchenko L.A., Mochkova T.V., Kurbanov R.K., Krasnoborod'ko V.V. Osnovnye trebovaniya k bespilotnym letatel'nykh apparatam dlya vneseniya udobreniy i pestitsidov [Basic requirements for unmanned aerial vehicles for applying fertilizers and pesticides]. *Vestnik VIESH*. 2018. №4(33). 107-112 (In Russian).
3. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Smirnov I.G., Kolesnikova V.A., Marchenko L.A. Substantiation of parameters of unmanned aerial vehicles for pesticides and fertilizers application in precision farming system. *International scientific journal mechanization in agriculture & conserving of the resources*. 2017. №5. 168-171 (In English).
4. Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Obosnovanie parametrov bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya differentsirovannogo vneseniya trikhogrammy [Determination of the parameters of

- an unmanned aerial vehicle for variable-rate introduction of trichograms]. *Vestnik VIESH*. 2018. №4(33). 101-106. (In Russian).
5. Izmaylov A.Yu., Artyushin A.A., Kolesnikova V.A. et al. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu sredstv khimizatsii v sisteme tochnogo zemledeliya [Guidelines for the use of chemicals in the precision farming system]. Moscow: VIM. 2016. 100 (In Russian).
6. Marchenko L.A., Smirnov I.G., Lichman G.I., Mochkova T.V., Kolesnikova V.A. Differentsirovannoe vnesenie pestitsidov s ispol'zovaniyem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Variable-rate application of pesticides by means of unmanned aerial vehicles]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. Vol. 11. №4. 17-23 (In Russian).
7. Mikhaylenko I.M. Bespilotnaya malaya aviatsiya v sel'skom khozyaystve [Use of unmanned small aircraft in agriculture]. *Agrofizika*. 2015. №2. 16-24 (In Russian).
8. Semenenko N.N. Progressivnye sistemy primeneniya azotnykh udobreniy [Advanced nitrogen fertilizer application systems]. Minsk: Khata. 2003. 162 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 01.11.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 01.11.2019

Статья принята к публикации 29.11.2019
The paper was accepted
for publication on 29.11.2019

Algorithm for Selecting a Base Tractor Model to Form a Tractor Train

Makhamad T. Toshboltaev,

Dr.Sc.(Eng.), professor, senior research engineer;

Bakhtiyor A. Kholikov,

junior research engineer, e-mail: paytbaev@list.ru

Research Institute of Agricultural Mechanization, Tashkent region, the Republic of Uzbekistan

Abstract. The main quality indicators of tractor trains (the number of trailers and their total load capacity, speed and stability of movement, braking distance, etc.) depends largely on the correct choice of the type of a base tractor. The existing methodological principles for optimizing the dimension range of agricultural tractors do not take into account the type of trailers. Therefore, the task of a rational choice of the base tractor type, taking into account the most complete utilization of the capacity of existing trailers and engine power, has become rather relevant. (*Research purpose*) Selection of a tractor model for hitching a group of 2PTS-4-793-03A two-axle trailers according to the criteria for carrying capacity and energy consumption of a tractor train. (*Materials and methods*) The authors have studied mass, weight and velocity parameters of the 2PTS-4-793-03A two-axle trailers, as well as the parameters characterizing the mechanical capabilities of the studied tractor. The studies employed the methods of implement mounting on machine-tractor units and elements of the theory of a tractor. (*Results and discussion*) The authors offer an algorithm of solving a problem of choosing a tractor. As a results, the TTZ 60.10 tractor with a wheel formula of 4K2 available at farm enterprises and included in machine-and-tractor fleets and clusters has been selected as a power base of a tractor train. The authors have determined the number of trailers, which equals four, the tractor train speed ranges of 4-28 kilometers per hour, the tractor engine power amounting to 8.5-59.5 kilowatts, changes in critical values of the effective engine power corresponding to 13.492-94.444 kilowatts, as well as specified some other criteria. (*Conclusions*) The TTZ 60.10 tractor with a wheel formula 4K2 and 46.7 kilowatt of effective engine capacity has been considered the optimal choice. It has been proved that this tractor can move four 2PTS-4-793-03A two-axle trailers with a total weight of 15,600 kilograms along asphalt-concrete roads with a rational speed of 9.505 kilometers per hour. The rationality of choice has been proved by calculating energy saving criteria: full traction efficiency accounts for 60 percent, engine load factor is 89 percent, and traction power utilization amounts to 96 percent.

Keywords: tractor train, tractor, trailer, choosing a base tractor, number of trailers, required tractor power, energy use indicators.

For citation: Toshboltaev M.T., Kholikov B.A. Algoritim podbora modeli bazovogo traktora dlya formirovaniya traktornogo poezda [Algorithm for selecting a base tractor model to form a tractor train]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 46-50 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-46-50.

Алгоритм подбора модели базового трактора для формирования тракторного поезда

Махамад Тожалиевич Тошболтаев,

доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник;

Бахтиер Абдугаппарович Холиков,

младший научный сотрудник

Научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, Ташкентская область, Республика Узбекистан

Реферат. Основные качественные показатели тракторных поездов (количество прицепов и их общая грузоподъемность, скорость и устойчивость движения, длина тормозного пути) во многом зависят от правильного выбора типажа базового трактора. Существующие методологические принципы оптимизации типоразмерного ряда сельскохозяйственных тракторов не учитывают типаж прицепов. Поэтому важной задачей стал рациональный выбор типажа базового трактора с учетом наиболее полного использования грузоподъемности существующих прицепов и мощности двигателя. (*Цель исследования*) Выбрать модель трактора для агрегатирования с группой двухосных прицепов 2ПТС-4-793-03А по критериям грузоподъемности и энергозатрат тракторного поезда. (*Материалы и методы*) Изучили массовые, весовые и скоростные параметры двухосного прицепа 2ПТС-4-793-03А, а также параметры, характеризующие механические возможности искомого трактора. Использовали методы комплектования машинно-тракторных агрегатов и элементы теории трактора. (*Результаты и обсуждение*) Предложили алгоритм решения задачи по подбору модели трактора. В качестве энергетиче-

ской базы тракторного поезда выбрали трактор ТТЗ 60.10 с колесной формулой 4К2, состоящий на балансе фермерских хозяйств, машинно-тракторных парков и кластеров. Вычислили число прицепов, которое оказалось равным четырем, диапазоны скоростей движения тракторного поезда – 4-28 километров в час, мощностей двигателя трактора – 8,5-59,5 киловатт, изменения критических значений эффективной мощности двигателя – 13,492-94,444 киловатта и другие критерии. (Выводы) Признали оптимальным выбор трактора ТТЗ 60.10 с колесной формулой 4К2 и эффективной мощностью двигателя 46,7 киловатта. Показали, что он может передвигать четыре двухосных прицепа модели 2ПТС-4-793-03А общей массой 15 600 килограммов на дорогах с асфальто-бетонным покрытием с рациональной скоростью 9,505 километра в час. Доказали рациональность выбора с помощью расчетов критериев энергосбережения: полный тяговый коэффициент полезного действия составляет 60 процентов, коэффициент загрузки двигателя – 89 процентов, коэффициент использования тяговой мощности – 96 процентов.

Ключевые слова: тракторный поезд, трактор, прицеп, выбор базового трактора, число прицепов, требуемая мощность трактора, показатели энергоиспользования.

■ **Для цитирования:** Тошболтаев М.Т., Холиков Б.А. Алгоритм подбора модели базового трактора для формирования тракторного поезда // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 46-50. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-46-50.

Many qualitative indicators of tractor trains (the number of aggregated trailers and their total load capacity, speed and stability of movement, the length of the braking distance) are primarily determined by the traction and energy characteristics of the basic tractor [1]. Therefore, the rational choice of the type (model) of the basic tractor is important, taking into account the fullest use of its weight and power as part of the tractor train.

The basic methodological principles of optimization of the standard-size range of agricultural tractors are known [2-5]. But in this principals the type of tractors is not connected with the type of trailers [6-11].

When completing energy-saving machine-tractor units it's necessary to perform three tasks [12]:

- the first – to choose a machine for agricultural work in the unit with the known tractor;
- the second – to choose a tractor to a known agricultural machine to perform a given technological operation;
- the third – to determine the rational speed of the machine-tractor unit with its known composition.

These algorithms do not concern transport units. Nevertheless, the second option is quite suitable for the selection of the basic tractor to the known model of the tractor trailer after a small improvement.

RESEARCH PURPOSE is to choose a tractor model for aggregation with a group of 2-axle trailers 2PTS-4-793-03A and according to the criteria of load capacity and energy consumption of a tractor train.

MATERIALS AND METHODS. The initial constructional weight of the trailer $m_{\Pi K} = 1700$ kg, the average weight of the load $m_r = 2200$ kg. The permissible maximum speed of the tractor with trailers is 28 km/h. It is assumed to use a tractor with the following characteristics [11, 13-15]:

- wheel formula 4K2;
- mechanical transmission efficiency $\eta_{mp} = 0.9$;
- permissible coefficient of slipping $\delta = 18\%$;

- coupling weight utilization factor $\lambda = 0.75$;
- coefficient of traction of tractor wheels with soil $\mu = 0.75$;

- coefficient of wheels rolling resistance on roads with asphalt concrete covering typical for a tractor train $f = 0.018$.

In the process of research, the basic provisions of the theory of the tractor and methods of acquisition of machine-tractor units were used.

RESULTS AND DISCUSSION. We take the following algorithm for solving the task.

1. At the first stage, as the energy base of a tractor train, it is advisable to choose a tractor ТТЗ 60.10 with a wheel formula 4К2, consisting of a balance of farms, machine-tractor parks and clusters. The operating weight of this tractor $m_T = 3341$ kg satisfies the condition $m_T > 2600$ kg, then the maximum value of the hook force P_{kp}^{max} is determined by the formula:

$$P_{kp}^{max} = 0.373 m_T g = 0.373 \cdot 3341 \cdot 9.81 = 12.225 \text{ kN} [15].$$

2. Next, we calculate the number of trailers n in the tractor train from the condition $P_{kp} \leq P_{kp}^{max}$, where P_{kp} – the total resistance force of the group of trailers in the train:

$$P_{kp} = n G_{\Pi} (\sin \alpha + f \cos \alpha), \text{ kN} [15],$$

where $G_{\Pi} = (m_{\Pi K} + m_r)g$ – the weight of one trailer 2PTS-4-793-03A with a load, kN;

α – the angle of longitudinal inclination of the support surface of the road.

$$\text{Then } n G_{\Pi} (\sin \alpha + f \cos \alpha) \leq P_{kp}^{max}, \text{ or:}$$

$$n \leq \frac{P_{kp}^{max}}{G_{\Pi} (\sin \alpha + f \cos \alpha)}. \quad (1)$$

If $m_{\Pi K} = 1700$ kg and $m_r = 2200$ kg the weight of the trailer with the load is equal to: $G_{\Pi} = 3900 \cdot 9.81 = 38259 \text{ H} = 38.259 \text{ kN}$.

Then:

$$n \leq \frac{12.225}{38.259 (\sin 3^\circ + 0.018 \cos 3^\circ)} = 4.5.$$

We take $n = 4$.

3. The speed range of a tractor train consisting of a tractor TTZ 60.10 and four trailers on internal roads with asphalt and concrete pavement is $V_{\min} \div V_{\max} = 4 \div 28$ km/h.

4. The power range of the tractor engine ($N_T^{\min} \div N_T^{\max}$), providing the moving of four trailers (each weighing G_{Π} with a given speed $V_{\min} \div V_{\max}$):

$$(N_T^{\min} \div N_T^{\max}) = \frac{V_{\min} \div V_{\max}}{3.6} n G_{\Pi} \frac{i}{100}, \quad (2)$$

where i – the slope of the road.

If $V_{\min} \div V_{\max} = 4 \div 28$ km/h and $G_{\Pi} = 38.259$ kN we have:

$$(N_T^{\min} \div N_T^{\max}) = \frac{(4 \div 28)}{3.6} 4 \cdot 38.259 \frac{5}{100} = (8.5 \div 59.5) \text{ kW}.$$

5. The range of critical values of the tractor engine effective power:

$$(N_e^{\min} \div N_e^{\max}) = \frac{(N_T^{\min} \div N_T^{\max})}{\eta_{TP} (1 - \frac{\delta}{100} \cdot \frac{f + \frac{i}{100}}{\lambda \mu})}. \quad (3)$$

If $(N_T^{\min} \div N_T^{\max}) = (8.5 \div 59.5)$ kW we'll get

$$(N_e^{\min} \div N_e^{\max}) = \frac{(8.5 \div 59.5)}{0.9 (1 - \frac{18}{100} \cdot \frac{0.018 + \frac{5}{100}}{0.75 \cdot 0.75})} = (13.492 \div 94.444) \text{ kW}.$$

6. Minimum $G_T^{\min}$ and maximum $G_T^{\max}$ limits of the required tractor operational weight:

$$(G_T^{\min} \div G_T^{\max}) = \frac{3.6(N_e^{\min} \div N_e^{\max})\eta_{TP}}{(V_{\min} \div V_{\max})\lambda \mu}, \quad (4)$$

or:

$$(G_T^{\min} \div G_T^{\max}) = \frac{3.6(13.492 \div 94.444)0.9}{(4 \div 28)0.75 \cdot 0.75} = \frac{43.584}{15.75} \div \frac{305.998}{2.25} = (2.767 \div 135.999) \text{ kN}.$$

The range of variation of the tractor's operating weight: $(m_T^{\min} \div m_T^{\max}) = (282.0 \div 13863)$ kg.

7. According to available data, the range of power ($N_e^{\min} \div N_e^{\max}$) = (13.492 ÷ 94.444) kW and weight ($m_T^{\min} \div m_T^{\max}$) = (282.0 ÷ 13863) kg corresponds to the tractor TTZ 60.10 with a wheel formula 4K2, power $N_e^H = 46.7$ kW and operating weight $m_T = 3341$ kg [16]. Operating weight of this tractor:

$$G_T = m_T g = 3341 \cdot 9.81 = 32775 \text{ N} = 32.775 \text{ kN}.$$

8. We define the range of hook power change of the tractor TTZ 60.10 on coupling properties of wheels:

$$(N_{\text{кр}}^{\mu \max} \div N_{\text{кр}}^{\mu \min}) = \frac{G_T (V_{\min} \div V_{\max}) [\lambda \mu - (f + \frac{i}{100})]}{3.6} - N_e^H \eta_{TP} \frac{\delta}{100}. \quad (5)$$

We substitute values and get:

$$(N_{\text{кр}}^{\mu \max} \div N_{\text{кр}}^{\mu \min}) = \frac{32.775(4 \div 28)[0.75 \cdot 0.75 - (0.018 + \frac{5}{100})]}{3.6} -$$

$$- 46.7 \cdot 0.9 \cdot \frac{18}{100} = (10.439 \div 118.463) \text{ kW}.$$

9. The maximum power on the tractor hook is:

$$N_{\text{кр}}^{\max} = N_e^H \eta_{TP} (1 - \frac{\delta}{100} - \frac{f + \frac{i}{100}}{\lambda \mu}), \quad (6)$$

or

$$N_{\text{кр}}^{\max} = 46.7 \cdot 0.9 (1 - \frac{18}{100} - \frac{0.018 + \frac{5}{100}}{0.75 \cdot 0.75}) = 29.42 \text{ kW}.$$

10. The total traction resistance of four loaded trailers in a tractor train [17]:

$$P_{\text{кр}} = n G_{\Pi} (f \cos \alpha + \sin \alpha), \quad (7)$$

or $P_{\text{кр}} = 4 \cdot 38.259 (0.018 \cos 3^\circ) = 10.752$ kN.

11. We determine the train's rational speed:

$$V_{\text{рац}} = \frac{3.6 N_e^H \eta_{TP} (1 - \frac{\delta}{100})}{P_{\text{кр}} + G_T (f \cos \alpha + \sin \alpha)}. \quad (8)$$

If $P_{\text{кр}} = 10.752$ kN we'll get:

$$V_{\text{рац}} = \frac{3.6 \cdot 46.7 \cdot 0.9 (1 - \frac{18}{100})}{10.752 + 32.775 (0.018 \cdot \cos 3^\circ + \sin 3^\circ)} = 9.505 \text{ km/h}.$$

Thus,

$$V_{\min} (4 \text{ km/h}) < V_{\text{рац}} (9.505 \text{ km/h}) < V_{\max} (28 \text{ km/h}).$$

12. The power expended when moving a train at a speed of $V_{\text{рац}}$:

$$N_{\text{рац}} = \frac{P_{\text{кр}} V_{\text{рац}}}{3.6}, \quad (9)$$

$$\text{That is } N_{\text{рац}} = \frac{10.752 \cdot 9.505}{3.6} = 28.388 \text{ kW}.$$

13. The effective power of the tractor engine, spent on overcoming the traction resistance $P_{\text{кр}}$ at the speed of the train $V_{\text{рац}}$, is equal to:

$$N_e = \frac{V_{\text{рац}}}{3.6} \left\{ P_{\text{кр}} [2 - \eta_{TP} (1 - \frac{\delta}{100})] + G_T (f + \frac{i}{100}) \right\}. \quad (10)$$

If $P_{\text{кр}} = 10.752$ kN and $V_{\text{рац}} = 9.505$ km/h we'll get:

$$N_e = \frac{9.505}{3.6} \left\{ 10.752 [2 - 0.9 (1 - \frac{18}{100})] + 32.775 (0.018 + \frac{5}{100}) \right\} = 41.72 \text{ kW}.$$

14. We determine the calculated values of the tractor TTZ 60.10 characteristics:

- traction power utilization factor:

$$\eta_{\text{им}} = N_{\text{рац}} / N_{\text{кр}}^{\max} = 28.388 / 29.421 = 0.96, \text{ or } 96\%;$$

- the engine load factor:

$$\eta_{\text{д}} = N_e / N_e^H = 41.705 / 46.7 \text{ or } 89\%;$$

- total traction efficiency:



$$\eta_T = N_{\text{паш}}/N_{\text{с}}^{\text{н}} = 28.388/46.7 = 0.60, \text{ or } 60\%;$$

- the maximum possible traction efficiency in the train operating conditions under consideration:

$$\eta_T^{\text{max}} = (N_{\text{кр}}^{\text{max}}/N_{\text{с}}^{\text{н}}) = (29.421/46.7) = 0.63, \text{ or } 63\%.$$

CONCLUSIONS.

The TTZ 60.10 tractor with a wheel formula 4K2 and 46.7 kW of effective engine capacity has been considered the optimal choice. It has been proved that this tractor can

move four 2PTS-4-793-03A two-axle trailers with a total weight of 15.600 kg along asphalt-concrete roads with a rational speed of 9.505 km/h.

The rationality of choice has been proved by calculating energy saving criteria: full traction efficiency accounts for 60%, engine load factor is 89 %, and traction power utilization amounts to 96%.

REFERENCES

1. Artem'yev P.P., Atamanov Yu.E., Bogdan N.V. Traktornye poyezda [Tractor trains.] Moscow: Mashinostroenie. 1982. 183 (In Russian).
2. Pozin B.M., Troyanovskaya I.P., Noradoviy D.I. Effektivnost' transportnogo agregata na baze traktora "Uralets" [Efficiency of a transport unit based on the "Uralets" tractor]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2015. N7. 22-26 (In Russian).
3. Guterman A.B. Sistemnyy podkhod k optimizatsii tiporazmernogo ryada sel'skokhozyaystvennykh traktorov [System approach to optimize the dimension range of agricultural tractors]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaystva*. 1981. N5. 4-6 (In Russian).
4. Ksenevich I.P. O prognozirovaniy parametrov tiporazmernykh ryadov traktorov s ispol'zovaniyem metodov matematicheskoy statistiki [Forecasting parameters of the dimension range of tractors using mathematical statistics methods]. *Traktory i sel'khozma-shiny*. 1984. N5. 8-11 (In Russian).
5. Toshboltaev M., Dzhiyanov M. Obshchaya metodika opredeleniya sprosa na novuyu tekhniku [General method of determining the demand for new equipment]. *Mir agrotekhniki*. Tashkent: 2019. N2. 16-18 (In Russian).
6. Anikin N.V., Kokorev G.D., Kulik S.N. Analiz issledovaniy ustoychivosti dvizheniya pritsepnykh zven'yev mnogozvennykh traktornykh poyezdov [Analysis of studies on the movement stability of trailed units of multi-link tractor trains]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2016. N12. 22-24 (In Russian).
7. Mirkitanov V.I. Obosnovanie i postroyenie parametricheskogo ryada modeley traktornykh pritsepov: Obzorno-analiticheskii material [Determination and designing of a parametric range of tractor trailer models: Survey and analytical material]. Orenburg: 1988. 44 (In Russian).
8. Shchitov S.V., Tikhonchuk P.V., Spiridanchuk N.V. Energozatratty kak kriterii vybora traktora [Energy costs as the criteria for choosing a tractor]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2012. N9. 75-76 (In Russian).
9. Toshboltaev M., Kholikov B. Povyshenie tochnosti otsenki ekspluatatsionnykh svoystv traktornogo poezda [Improving the accuracy of evaluating the performance properties of a tractor train]. *Mir agrotekhniki*. Tashkent: 2018. N8. 18-19 (In Russian).
10. Shalyagin V.N. Transportnyye i transportno-tekhnologicheskie sredstva povyshennoy prokhodimosti [Transport and transport-and-technological means of increased cross-country capacity]. Moscow: Agropromizdat. 1986. 254 (In Russian).
11. Rashidov N.R. Traktornyye mnogozvennyye poyezda [Multilink tractor trains]. Tashkent: Uzbekistan. 1981. 368 (In Russian).
12. Karabanitskiy A.P., Chebotarev M.I. Komplektovanie energoberegayushchikh mashinno-traktornykh agregatov [Implement mounting on energy-saving machine-tractor units]. Krasnodar: KubGAU. 2012. 97 (In Russian).
13. Rashidov N., Kurtsenko L., Satvoldiev N. Puti snizheniya poter' khlopka-syrtsa pri transportirovke (obzor) [Ways to reduce the loss of raw cotton during transportation (review)]. Tashkent: UzNIINTI. 1983. 20 (In Russian).
14. Smirnov G.A. Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin [Theory of the movement of wheeled vehicles]. Moscow: Mashinostroeniye. 1981. 271 (In Russian).
15. Zangiev A.A., Shpil'ko A.V., Levshin A.G. Ekspluatatsiya mashinno-traktornogo parka [Operation of the machine and tractor fleet]. Moscow: Kolos. 2004. 320 (In Russian).
16. Regulirovka i effektivnaya ekspluatatsiya khlopkovodcheskikh i zernovodcheskikh mashin [Adjustment and efficient operation of cotton and grain growing machines]. Ed. by M. Toshboltaev. Tashkent: Fan. 2012. 200 (In Russian).
17. Toshboltaev M., Kholikov B. Opredeleniye ratsional'nogo chisla pritsepov v sostave traktornogo poyezda [Determination of the rational number of trailers in a tractor train]. *Problemy mekhaniki*. Tashkent. 2018. N2. 76-79 (In Russian).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артемьев П.П., Атаманов Ю.Е., Богдан Н.В. Тракторные поезда. М.: Машиностроение. 1982. 183 с.
2. Позин Б.М., Трояновская И.П., Норадовий Д.И. Эффек-

тивность транспортного агрегата на базе трактора «Ура-лец» // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2015. N7. С. 22-26.

3. Гутерман А.Б. Системный подход к оптимизации типоразмерного ряда сельскохозяйственных тракторов // *Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства*. 1981. N5. С. 4-6.
4. Ксенович И.П. О прогнозировании параметров типоразмерных рядов тракторов с использованием методов математической статистики // *Тракторы и сельхозмашины*. 1984. N5. С. 8-11.
5. Тошболтаев М., Джиянов М. Общая методика определения спроса на новую технику // *Мир агротехники*. Ташкент. 2019. N2. С. 16-18.
6. Аникин Н.В., Кокорев Г.Д., Кулик С.Н. Анализ исследований устойчивости движения прицепных звеньев многозвенных тракторных поездов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2016. N12. С. 22-24.
7. Миркитанов В.И. Обоснование и построение параметрического ряда моделей тракторных прицепов: Обзорно-аналитический материал. Оренбург, 1988. 44 с.
8. Щитов С.В., Тихончук П.В., Спириданчук Н.В. Энергозатраты как критерии выбора трактора // *Достижения науки и техники АПК*. 2012. N9. С. 75-76.
9. Тошболтаев М., Холиков Б. Повышение точности оценки эксплуатационных свойств тракторного поезда // *Мир агротехники*. Ташкент: 2018. N8. С. 18-19.
10. Шалягин В.Н. Транспортные и транспортно-технологические средства повышенной проходимости. М.: Агропромиздат. 1986. 254 с.
11. Рашидов Н.Р. Тракторные многозвенные поезда. Ташкент: Узбекистан. 1981. 368 с.
12. Карабаницкий А.П., Чеботарев М.И. Комплектование энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов. Краснодар: КубГАУ. 2012. 97 с.
13. Рашидов Н., Курценко Л., Сатволдиев Н. Пути снижения потерь хлопка-сырца при транспортировке (обзор). Ташкент: УзНИИТИ. 1983. 20 с.
14. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин: М.: Машиностроение. 1981. 271 с.
15. Зангиев А.А., Шпилько А.В., Левшин А.Г. Эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: Колос. 2004. 320 с.
16. Регулировка и эффективная эксплуатация хлопководческих и зерноводческих машин / ответ. редактор М. Тошболтаев. Ташкент: Фан. 2012. 200 с.
17. Тошболтаев М., Холиков Б. Определение рационального числа прицепов в составе тракторного поезда // *Проблемы механики*. Ташкент. 2018. N2. С. 76-79.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 11.06.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 11.06.2019

Статья принята к публикации 20.11.2019
The paper was accepted
for publication on 20.11.2019



Оценка и снижение энергозатрат зерноочистительно-сушильного комплекса

Юрий Николаевич Сапьян,
старший научный сотрудник;
Владимир Андреевич Колос,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;

Магомедсалам Иминович Сулейманов,
кандидат технических наук, научный сотрудник;
Елена Николаевна Кабакова,
ведущий специалист, e-mail: icgsmvim@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Снижение энергозатрат на зерноочистительно-сушильных комплексах – актуальная, но сложная задача для сельхозпроизводителей. При организации работы зерносушильного комплекса возникает задача формирования оптимальных с позиции энергосбережения вариантов конфигурации поточных линий с учетом свойств исходного материала и товарной продукции, состояния и технического уровня оборудования и других факторов. Применение метода энергосберегающей оптимизации для повышения энергоэффективности и сокращения энергозатрат зернокомплекса в научно-методической литературе освещено недостаточно. *(Цель исследования)* Адаптировать критерии и алгоритм энергосберегающей оптимизации полевой технологии к оценке и повышению статуса энергоэффективности, снижению энергозатрат и выявлению максимально доступного потенциала энергосбережения зернокомплекса при энергоаудите. *(Материалы и методы)* Рассмотрели проблему снижения энергоемкости поточных линий зернокомплекса. Обосновали применимость метода и частных критериев энергоэффективности послеуборочных технологий к задаче его энергосберегающей оптимизации. Разработали алгоритм оптимизации с математическим описанием и набором входных данных. *(Результаты и обсуждение)* Сформулировали условие присвоения зернокомплексу статуса энергоэффективного. Установили, что при использовании эталонного базового аналога, дефиците финансовых средств у производителя и отсутствии спонсоров данный статус недостижим, а ожидаемый потенциал прямого энергосбережения практически нереализуем. Предложили целевую функцию энергосберегающей оптимизации зернокомплекса – максимум доступного потенциала прямого энергосбережения и метод вычисления. *(Выводы)* Обосновали критерии, разработали алгоритм энергосберегающей оптимизации зернокомплекса, обеспечивающей снижение прямой энергоемкости поточных линий и энергозатрат. Разработали методики определения и анализа входных и выходных данных, оценки статуса энергоэффективности, принципы обновления оборудования. Предложили метод вычисления потенциала прямого энергосбережения в рамках существующих технико-технологических и финансовых ограничений. Практическое применение результатов работы обеспечит корректную, достоверную и оперативную оценку энергозатрат на зернокомплексе и их снижение до доступного минимума.

Ключевые слова: зерноочистительно-сушильный комплекс, поточные линии, энергозатраты, энергосберегающая оптимизация, вычислительный алгоритм, энергоэффективность, потенциал энергосбережения.

Для цитирования: Сапьян Ю.Н., Колос В.А., Сулейманов М.И., Кабакова Е.Н. Оценка и снижение энергозатрат зерноочистительно-сушильного комплекса // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 51-55. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-51-55.

Assessing and Reducing Energy Consumption of Grain Cleaning and Drying Equipment

Yuriy N. Sap'yan,
senior research engineer;
Vladimir A. Kolos,
Ph.D.(Eng.), key research engineer;

Magomedsalam I. Suleymanov,
Ph.D.(Eng.), research engineer;
Elena N. Kabakova,
key expert

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Reducing energy costs of using grain cleaning and drying equipment is an urgent, but difficult task for agricultural producers. When organizing the operation of grain drying equipment, the problem arises of forming optimal configuration options for production lines from the standpoint of energy saving, taking into account the properties of the source material and commercial

products, the condition and technical level of the equipment, and other factors. The use of the energy-saving optimization method to increase energy efficiency and reduce the energy consumption of grain drying equipment in the scientific and methodological literature is not sufficiently covered. (*Research purpose*) To adapt the criteria and algorithm of energy-saving optimization of field technology to assess and improve the status of energy efficiency, reduce energy consumption and identify the maximum available energy saving potential of grain drying equipment during energy audit. (*Materials and methods*) The authors examined the problem of reducing the energy intensity of the production lines of grain drying equipment. They justified the applicability of the method and particular criteria for the energy efficiency of post-harvest technologies to the task of its energy-saving optimization. They also developed an optimization algorithm with a mathematical description and a set of input data. (*Results and discussion*) The authors determined the requirements for grain drying equipment to be considered energy efficient. It was established that when using the reference basic analogue, the manufacturer's shortage of financial resources and the absence of sponsors, this status is unattainable, and the expected direct energy saving potential is practically unachievable. The authors proposed the target function of energy-saving optimization of grain drying equipment - the maximum available direct energy-saving potential and the calculation method. (*Conclusions*) The paper provides the offered criteria and a developed algorithm for energy-saving optimization of grain drying equipment, which reduces the direct energy consumption of production lines and energy costs. The authors developed methods for determining and analyzing input and output data, evaluating energy efficiency status, and principles for updating equipment. They proposed a method for calculating the direct energy-saving potential taking into account the existing technical, technological and financial limitations. The practical application of the study results will ensure correct, reliable and efficient assessment of energy costs of using grain drying equipment and their reduction to an affordable minimum.

Keywords: grain cleaning and drying equipment, production lines, energy consumption, energy saving optimization, computational algorithm, energy efficiency, energy saving potential.

■ **For citation:** Sapyan Yu.N., Kolos V.A., Suleymanov M.I., Kabakova E.N. Otsenka i snizhenie energozatrat zernoochistitel'no-sushil'nogo kompleksa [Evaluation and reduction of energy consumption of grain cleaning and drying equipment]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 51-55 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-51-55.

Снижение энергозатрат на зерноочиститель-но-сушильных комплексах (ЗСК) – актуальная, но сложная для сельхозпроизводителей задача, которая решается с помощью сертифицированных энергоаудиторов. Уровень снижения характеризуется энергосберегающим потенциалом относительно базового образца – эталонного аналога с самыми высокими технико-экономическими показателями в данном районе, местности или регионе [1, 2]. При организации работы ЗСК возникает задача формирования оптимальных с позиции энергосбережения вариантов конфигурации поточных линий с учетом назначения, физических, биохимических и технологических свойств исходного материала и товарной продукции, состояния и технического уровня оборудования, систем контроля-управления процессами и других действующих факторов [3-5]. Однако применение энергосберегающей оптимизации как средства повышения энергетической эффективности (ЭЭ) и сокращения энергозатрат ЗСК, в отличие от технологий выращивания зерновых и других культур [3, 6, 7], в научно-методической литературе освещено недостаточно.

Цель исследования – адаптировать критерии и алгоритм энергосберегающей оптимизации полевой технологии к оценке и повышению статуса ЭЭ, снижению энергозатрат и выявлению максимально доступного потенциала энергосбережения ЗСК при энергоаудите.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Обработка урожая уменьшает энергопотенциал конечной продукции, поэтому для энергосберегающей оптимизации ЗСК неприменимы такие интегральные критерии полевой технологии, как коэффициент и индекс уровня полной и прямой ЭЭ, включающие этот показатель [1].

В связи со сравнительно небольшой номенклатурой используемых топливно-энергетических (ТЭР) и других ресурсов оптимизацию ЗСК достаточно проводить в технологическом цикле с оценкой результатов частными критериями. К ним относятся базовые, начальные и прогнозные расходы ТЭР на единицу продукции поточных линий, прямая энергоемкость ее производства, прямые энергозатраты и потенциал прямого энергосбережения (ППЭС).

Для их вычисления необходим математический алгоритм и набор постоянных и вариативных входных данных, таких как производительность и операционные расходы ТЭР поточных линий, масса поступившего зерна и конечной продукции обследуемого и базового ЗСК. Эти данные определяют после ознакомления с техдокументацией, наблюдения за работой, верификации и актуализации схем поточных линий и операционных карт. При сомнениях в соответствии фактических и паспортных данных отдельных машин проводят выборочные эксперименты с приборными измерениями на штатных технологических операциях. Часовой расход жидкого топлива сушилкой измеряют объемным расходомером *Promass 80/83F*



DNS, природного газа – Prowirl 72F DN40. Расход биотоплива (БТ) определяют по взвешенной массе, сгоревшей в топочном агрегате за время опыта. Потребляемую машинами электрическую мощность измеряют анализатором качества электроэнергии MI 2492 PowerQ без разрыва электрических цепей.

Сопоставимый операционный расход топлива z -й сушилкой на традиционном топливе (ТТ), жидком или газообразном, на сушке s -й продукции t -й культуры рассчитывают по формулам, физ. ед./пл. т:

$$g_{\text{TTzst}} = G_{\text{TTzst}} / W_{\text{ПЛzst}}; \quad (1)$$

где G_{TTzst} – измеренный при экспериментах часовой расход ТТ, физ. ед./ч;

$W_{\text{ПЛzst}} = W_{0\text{zst}} k_{\text{в}} k_{\text{кн}}$ – сопоставимая производительность сушилки, пл. т/ч;

$W_{0\text{zst}} = W_{3\text{zst}}(100 - \omega_3)/(100 - \omega_0)$ и $W_{0\text{zst}} = M_{0\text{zst}}/T_{\text{stz}}$ – производительность по сырому зерну сушилки непрерывного и периодического действия, т/ч;

$k_{\text{в}}$ – коэффициент влажности зерна до сушки (ω_0) и после сушки (ω_3) [3];

$k_{\text{кн}}$ – коэффициент вида культуры и назначения продукции [3];

$W_{3\text{zst}} = M_{\text{stz}} T_{\text{stz}}$ – производительность сушилки по сухой продукции, т/ч;

M_{stz} и $M_{0\text{stz}}$ – фактическая масса сухого и сырого зерна, т;

T_{stz} – продолжительность эксперимента, ч.

Расход топлива сушилкой на БТ $g_{\text{БТzst}}$ рассчитывают по формуле, аналогичной (1), после подстановки соответствующих переменных.

Сопоставимый расход электроэнергии сушилкой на ТТ (БТ), бункером активного вентилирования, кВт·ч/пл. т:

$$g_{\text{эзst}} = P_{\text{zst}} / W_{\text{ПЛzst}}, \quad (2)$$

где P_{zst} – измеренная потребляемая мощность, кВт.

Сопоставимый расход электроэнергии зерноочистительной машиной (эксплуатационный), кВт·ч/эк. т:

$$g_{\text{эзst}} = P_{\text{zst}} / W_{\text{ЭКzst}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{ЭКzst}} = W_{0\text{zst}} k_1 k_2$ – эксплуатационная производительность машины, эк. т/ч;

k_1 – коэффициент, учитывающий вид культуры;

k_2 – коэффициент, учитывающий влажность и засоренность исходного зерна.

Расход электроэнергии новыми исправными машинами, а также транспортерами, нориями и т.п. рассчитывают по установленной мощности, коэффициентам ее использования и паспортной производительности. Сопоставимый расход ТЭР на базовом ЗСК определяют по данным мониторинга, энергоаудита или паспортов машин; при расчетах исходную массу, влажность и засоренность зерна принимают такими же, как на обследуемом ЗСК.

Алгоритм определения оценочных показателей

ЭЭ ЗСК следующий.

Расход ТТ поточной линией на продукцию s -го вида t -й культуры вычисляют по формулам, физ. ед./пл. т:

$$g_{\text{TTst}} = g_{\text{TTzst}} M_{\text{stz}} / M_{\text{st}}, \quad (4)$$

где M_{st} – масса продукции поточной линии с сушилкой на ТТ, пл. т.

Для линии с сушилкой на БТ в виде дров, соломы, пеллет [1, 4, 8, 9] его расход $g_{\text{БТst}}$ вычисляют по формуле, аналогичной (4), физ. ед./пл. т

Расход ТТ на внутрихозяйственное производство и транспортировку БТ, переходящий на продукцию, равен, физ. ед./пл. т:

$$g_{\text{TTстБТ}} = g_{\text{ТТБТ}} g_{\text{БТst}},$$

где $g_{\text{ТТБТ}}$ – суммарный расход ТТ оборудованием, производящим БТ, и средствами доставки его к сушилке, физ. ед./физ. ед.;

Расход электроэнергии линией на s -ю продукцию t -й культуры составит, кВт·ч/пл. т:

$$g_{\text{эст}} = (\sum g_{\text{эзst}} M_{\text{stz}}) / M_{\text{st}}, \quad (5)$$

где $g_{\text{эст}}$ – операционный расход z -й машиной, установкой или другим потребителем, имеющим отношение к линии, кВт·ч/пл. т.

К расходу электроэнергии на продукцию линии с сушилкой на БТ добавляют переходящий расход на производство БТ, кВт·ч/пл. т:

$$g_{\text{ТТэст}}^{\text{БТ}} = g_{\text{ТТ}}^{\text{БТ}} g_{\text{БТst}},$$

где $g_{\text{ТТ}}^{\text{БТ}}$ – расход электроэнергии оборудованием, производящим БТ, кВт·ч/физ. ед.

Определим прямую энергоемкость продукции линии с сушилкой на ТТ, МДж/пл. т:

$$\mathcal{E}_{\text{Пst}} = g_{\text{ТТst}} e_{\text{ТТ}} + g_{\text{эст}} K_{\text{э}}, \quad (6)$$

где $e_{\text{ТТ}}$ – энергосодержание ТТ, МДж/физ. ед. [1];

$K_{\text{э}} = 3,6 \text{ МДж/кВт·ч}$ – коэффициент пересчета единиц электроэнергии.

Прямая энергоемкость линии с сушилкой на БТ, МДж/пл. т:

$$\mathcal{E}_{\text{Пst}} = g_{\text{БТst}} e_{\text{БТ}} + g_{\text{ТТst}}^{\text{БТ}} e_{\text{ТТ}} + (g_{\text{эст}} + g_{\text{эст}}^{\text{БТ}}) K_{\text{э}}. \quad (7)$$

По полученным значениям энергоемкости вычисляют начальные прямые энергозатраты соответственно поточной линии $Q_{\text{Пst}}$ и всего ЗСК $Q_{\text{П}}$, МДж:

$$Q_{\text{Пst}} = \mathcal{E}_{\text{Пst}} M_{\text{st}}; \quad Q_{\text{П}} = \sum \mathcal{E}_{\text{Пst}} Q_{\text{Пst}}. \quad (8)$$

Ожидаемый ППЭС по определению представляет собой соотношение (%):

$$П_{\text{ПО}} = 100 (Q_{\text{П}} - Q_{\text{ПБ}}) / Q_{\text{П}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{ПБ}}$ – энергозатраты базового аналога ЗСК, МДж.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Статус энергоэффективного может быть присвоен обследуемому ЗСК при условии:

$$\frac{\mathcal{E}_{\text{Пст}}}{\mathcal{E}_{\text{ПБст}}} \leq 1, \quad (10)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ПБст}}$ – прямая энергоёмкость s -й продукции t -й культуры базового ЗСК, МДж /пл. т.

На практике уменьшение энергоёмкости поточных линий до базовых значений и ниже требует больших финансовых издержек на обновление оборудования. Поэтому при использовании для сравнения показателей ЭЭ эталонного базового аналога, дефиците финансовых средств и отсутствии спонсоров условие (10) невыполнимо. Аналогично, не может быть реализован ожидаемый (теоретический) ППЭС обследуемого ЗСК (9), производный от энергоёмкости поточных линий. При отсутствии базового аналога выражения (9) и (10) не имеют смысла.

Для снижения энергозатрат после определения по (6)–(10) начальных показателей ЭЭ разрабатывают энергосберегающие мероприятия: организационно-административные – для непосредственного стимулирования экономии ТЭР и технико-технологические (опорные, финансируемые хозяйством, и инновационные, инвестируемые спонсорами) – для реновации объекта. Их анализируют методом экспертных оценок с использованием энергетических и экономических критериев [6-10], а также итеративной процедуры оценки ЭЭ и предлагаемых вариантов состава и схем поточных линий ЗСК.

Наиболее масштабные мероприятия – замена и модернизация машин, не отвечающих современным требованиям к конструкции и параметрам, качеству выполнения операций, надежности, универсальности, технике безопасности и экологии. По этим же показателям на основе прямого сравнения выбирают перспективные энергосберегающие машины с учетом стоимости, модульности, габаритов, операционной производительности и расходов ТЭР.

По результатам дальнейших итеративных оптимизационных вычислений по вариативным входным данным и анализа полученных данных выбирают состав оборудования и конфигурацию поточных линий. Следует начинать с анализа операции сушки – как самой энергоёмкой и лимитирующей производительность поточных линий. Целесообразность применения сушилки на БТ (типа КС-8, «Астра-Ингул», «Риела») или комплектования штатной твердотопливным топочным агрегатом (ВУ-Т-1,5, АТ-1) оценивают по комплексу параметров и фактических эксплуатаци-

онных показателей и, в конечном счете, по соотношениям, аналогичным (10). При этом за базовый вариант принимают линию с сушилкой на ТТ. Не менее важна модернизация систем контроля-управления работой ЗСК, обеспечения качества и сохранности продукции [3-5, 8-10].

По завершении энергоаудита ЗСК формируют план экономически эффективных мероприятий по практической реализации ППЭС, рассматривают факторы, препятствующие его выполнению, и компромиссные решения [6, 7]. Функция цели энергосберегающей оптимизации ЗСК – максимум доступного ППЭС ($P_{\text{ПД}}$), %:

$$P_{\text{ПД}} = 100 (Q_{\text{П}} - Q_{\text{ПД}}) / Q_{\text{П}} \rightarrow \max, \quad (11)$$

где $Q_{\text{ПД}}$ – доступные прогнозные энергозатраты, определяемые по формулам, аналогичным (8), подстановкой соответствующих переменных, МДж.

Решение задачи сводится к поиску условных экстремумов РПД в рамках объективных ограничений подстановкой в (11) различных значений $Q_{\text{ПД}}$, получаемых путем алгоритмизированных итеративных вычислений по формулам (1) – (8).

Выводы

Обосновали критерии и разработали алгоритм энергосберегающей оптимизации ЗСК для повышения ЭЭ, снижения энергозатрат и реализации максимально доступного ППЭС. Представили методики определения и анализа входных и выходных данных, оценки статуса ЭЭ, принципы отбраковки устаревших и выбора новых машин для поточных технологических линий ЗСК, целевую функцию энергосберегающей оптимизации и метод решения в рамках существующих технико-технологических и финансовых ограничений.

Практическое применение алгоритмизированных итеративных вычислений при энергосберегающей оптимизации ЗСК обеспечит корректную, достоверную и оперативную оценку и снижение энергозатрат до доступного минимума.

Материалы статьи могут быть использованы при разработке типовых инструкций по энергоаудиту в сельскохозяйственном производстве, позволяющих существенно повысить ЭЭ и обеспечить практическую реализацию ППЭС послеуборочных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елизаров В.П., Колос В.А., Сапьян Ю.Н., Максимов Д.А., Морозов Ю.Л. Методика топливно-энергетической оценки производства продукции растениеводства. М.: ВИМ. 2012. 84 с.
2. Ушаков В.Я., Харлов Н.Н., Чубик П.С. Потенциал энергосбережения и его реализация на предприятиях ТЭК. Томск: ТПУ. 2015. 283 с.
3. Чеботарев В.П. Сушка зерна. Теория, расчет, эксперимент. Минск: НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. 2012. 520 с.
4. Данилов Ю.Д. Мероприятия по снижению энергозатрат при сушке зерна // *Успехи современной науки*. Т. 4. №4. 2017. С. 15-17.
5. Сычугов Н.П., Сычугов Ю.В., Исупов В.И. Машины,



агрегаты и комплексы послеуборочной обработки зерна и семян трав (монография). Киров: Веси. 2015. 404 с.

6. Колос В.А., Сапьян Ю.Н., Кабакова Е.Н. Энергосберегающая оптимизация технологии растениеводства при энергоаудите // *Вестник ВИЭСХ*. 2016. N3(18). С. 24-30.

7. Колос В.А., Сапьян Ю.Н., Михеев В.В., Ловкис В.Б. Повышение энергоэффективности выращивания биомассы для переработки в биотопливо. *Агропанорама*. 2018. N3(127). С. 18-20.

8. Голубкович А.В., Павлов С.А., Марин С.А., Дадыко А.Н. Сушка зерна с использованием топок на твердом топливе // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. N6. С. 9-15.

9. Чижиков А.Г. Пути снижения затрат энергии при сушке зерна // *Наука в Центральной России*. 2014. N3(9). С. 75-81.

10. Чеботарев В.П. Низкотемпературная сушка и режимное хранение зерна. Минск: НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. 2011. 201 с.

REFERENCES

1. Elizarov V.P., Kolos V.A., Sap'yan Yu.N., Maksimov D.A., Morozov Yu.L. Metodika toplivno-energeticheskoy otsenki proizvodstva produktsii rasteniyevodstva [Methodology of fuel and energy assessment of crop production]. Moscow: VIM. 2012. 84 (In Russian).

2. Ushakov V.Ya., Kharlov N.N., Chubik P.S. Potentsial energosberezheniya i yego realizatsiya na predpriyatiyakh TEK [Prospects for energy conservation and its implementation in the energy sector]. Tomsk: TPU. 2015. 283 (In Russian).

3. Chebotarev V.P. Sushka zerna. Teoriya, raschet, eksperiment [Grain drying theory, calculation, experiment]. Minsk: NPTS NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva. 2012. 520 (In Russian).

4. Danilov Yu.D. Meropriyatiya po snizheniyu energozatrat pri sushke zerna [Measures to reduce energy consumption during grain drying]. *Uspekhi sovremennoy nauki*. Vol. 4. N4. 2017. 15-17 (In Russian).

5. Sychugov N.P., Sychugov Yu.V., Isupov V.I. Mashiny, agregaty i komplekсы posleuborochnoy obrabotki zerna i semyan trav (monografiya) [Machines, units and facilities of post-harvest processing of grain and grass seeds (monograph)]. Kirov: Vesi. 2015. 404 (In Russian).

6. Kolos V.A., Sap'yan Yu.N., Kabakova Ye.N. Energosberezgayushchaya optimizatsiya tekhnologii rasteniyevodstva pri energoaudite [Energy-saving optimization of crop production technology with energy audit]. *Vestnik VIESH*. 2016. N3(18). 24-30 (In Russian).

7. Kolos V.A., Sap'yan Yu.N., Mikheev V.V., Lovkis V.B. Povyshenie energoeffektivnosti vyrashchivaniya biomassy dlya pererabotki v biotopливо [Improving the energy efficiency of growing biomass for processing into biofuels]. *Agropanorama*. 2018. N3(127). 18-20 (In Russian).

8. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Marin S.A., Dadyko A.N. Sushka zerna s ispol'zovaniyem topok na tverdom toplive [Drying grain using solid fuel furnaces]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2017. N6. 9-15 (In Russian).

9. Chizhikov A.G. Puti snizheniya zatrat energii pri sushke zerna [Ways to reduce energy costs when drying grain]. *Nauka v Tsentral'noy Rossii*. 2014. N3(9). 75-81 (In Russian).

10. Chebotarev V.P. Nizkotemperaturnaya sushka i rezhimnoye khraneniye zerna [Low-temperature drying and monitoring grain storage]. Minsk: NPTS NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva. 2011. 201 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 18.10.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 18.10.2019

Статья принята к публикации 26.11.2019
The paper was accepted
for publication on 26.11.2019

Оптимизация зернопотоков по маршруту «поле – ток» в ходе уборки семян зерновых в Республике Казахстан

Айгерим Султановна Альчимбаева,
магистр, докторант, e-mail: aigerim-kaz@mail.ru

Казахский национальный аграрный университет, г. Алматы, Республика Казахстан

Реферат. Транспортировка зерна от зерноуборочного комбайна до пункта послеуборочной обработки зерна (условно «ток») в условиях Республики Казахстан имеет свою специфику: значительные расстояния перевозок зерна – более 5 километров, проселочные дороги без специального покрытия, с неровным рельефом и по пересеченной местности, большие размеры полей, неопределенность маршрутов перевозки зерна от поля до тока. Это снижает скорость транспортировки зерна, увеличивает время нахождения транспорта в пути, требует много транспортных средств, создает трудности в обеспечении ритмичного взаимодействия транспорта и комбайна. Особенно важно это учитывать при перевозке семян в семеноводческих хозяйствах, в которых применяется технология предпосевного облучения семян для повышения урожайности. (*Цель исследования*) Классифицировать регионы Казахстана по масштабам производства зерна, обосновать параметры типовых семеноводческих хозяйств и для них рассчитать параметры транспортного зернопотока с одновременным облучением зерна во время перевозки, максимально снизив вероятность взаимных простоев комбайнов и транспорта в ходе уборки зерновых культур в Республике Казахстан. (*Материалы и методы*) Исследование проводили с применением наиболее типичных для Казахстана комбайнов СК-5М «Нива» и автомобиля типа ГАЗ-53. Кузов автомобиля оборудовали низкочастотными электромагнитными излучателями и специальным разравнивающим устройством для зерна, поступающего из комбайна по зерновому шнеку. Разработали методику выбора параметров зональных типовых хозяйств. За базовые параметры транспортного зернопотока приняли продолжительность циклорейса по маршруту «поле – ток – поле», количество циклорейсов в день, грузоподъемность транспортного средства, продолжительность, объемы, дальность и скорость перевозки, коэффициент использования грузоподъемности. Выявили, что наиболее варьируемым параметром стала продолжительность циклорейса. (*Результаты и обсуждение*) Предложили алгоритм расчета параметров типовых (модельных) семеноводческих хозяйств Казахстана на основе статистических данных Статуправления республики. Выделили три категории зернопроизводящих областей, для каждой из которых определили количество семеноводческих хозяйств: для I категории – 171, для II – 128, для III – 282 хозяйства, всего 581. Средние площади каждого хозяйства равны, соответственно, 2760; 656 и 276 гектаров; время циклорейсов – 68,4; 49,5 и 35,5 минуты. (*Выводы*) Определили, что общая потребность в семенах зерновых культур для Казахстана составляет около 2 миллионов тонн. Рассчитали необходимое для их производства число семеноводческих хозяйств – 581. Вычислили общую потребность в транспортных средствах, оборудованных низкочастотными электромагнитными облучателями, – 5700 единиц. **Ключевые слова:** уборка зерновых, транспортирование зерна, зерноуборочный комбайн, циклорейс, цифровизация семеноводства, семеноводческое хозяйство, низкочастотный магнитный облучатель, оптимизация зернопотоков.

■ **Для цитирования:** Альчимбаева А.С. Оптимизация зернопотоков по маршруту «поле – ток» в ходе уборки семян зерновых в Республике Казахстан // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 56-62. DOI 10.22314.2073-7599-2019-5-56-62.

Optimization of Grain Flows in the “Field-Elevator” Chain During the Harvesting of Grain Seeds in the Republic of Kazakhstan

Aigerim S. Alchimbaeva,
MSc, post-doctorate researcher

Kazakh National Agrarian University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract. Grain transportation from a combine harvester to a post-harvest grain processing center (hereinafter referred to as “elevator”) in Kazakhstan has its own specific features: significant grain transportation distances of more than 5 kilometers, country roads without a special paving, uneven and rough terrains, large field sizes, uncertain grain transportation routes from the field to the elevator. This reduces the speed of grain transportation, increases the time spent on transportation, requires a



lot of vehicles, and makes difficulties in ensuring the coherent interaction of transport vehicles and combine harvesters. It is especially important to take this into account when transporting seeds on seed farms that use the pre-sowing seed irradiation technology to increase the productivity of seeds. (*Research purpose*) To classify the regions of Kazakhstan by the scale of grain production, determine the parameters of typical seed farms and to calculate their optimal parameters of grain transporting with simultaneous grain irradiation during transportation, minimizing mutual downtime of combine harvesters and transport vehicles during grain crop harvesting in the Republic of Kazakhstan. (*Materials and methods*) The study was carried out using the most typical for Kazakhstan SK-5M Niva combine harvesters and a GAZ-53 vehicles. The vehicle body was equipped with low-frequency electromagnetic radiators and a special leveling device for grain input from a combine harvester through the grain auger. The authors developed a methodology for choosing the parameters of zonal typical farms based on the following parameters of the transport grain flow: the trip duration along a “field – elevator – field” route, the number of round trips per day, loading capacity of a vehicle; duration, volume, range and speed of transportation, and the coefficient of capacity utilization. It has been revealed that the round trip duration is the most variable parameter. (*Results and discussion*) The authors have proposed an algorithm for calculating the parameters of typical (model) seed farms in Kazakhstan based on statistics obtained from the Statistical Office of the Republic. Three categories of grain-producing regions were distinguished, for each of which the number of seed-growing farms was determined: 171 – for category I, 128 – for category II, 282 – for category III, with a total of 581 farms. The average area of each farm amounts to 2760; 656, and 276 hectares, respectively; round trip periods last for 68.4; 49.5, and 35.5 minutes. (*Conclusions*) It has been determined that the total demand for grain seeds in Kazakhstan is about 2 million tons. The authors have calculated the required number of seed farms, which equals 581. The total demand for vehicles equipped with low-frequency electromagnetic irradiators has been estimated as equaling 5700 units.

Keywords: grain harvesting, grain transportation, combine harvester, round trip duration, digitalization of seed production, seed production, low-frequency magnetic irradiator, optimization of grain flows.

For citation: Alchimbaeva A.S. Optimizatsiya zernopotokov po marshrutu «pole – tok» v khode uborki semyan zernovykh v Respublike Kazakhstan [Optimization of grain flows in the “field – elevator” chain during the harvesting of grain seeds in the Republic of Kazakhstan]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 56-62 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-56-62.

Эффективность работы уборочного агрегата в составе «комбайн – транспорт» зависит от ритмичного взаимодействия, что снижает количество случаев простоя, повышает коэффициент использования времени смены и, соответственно, сменную производительность. Теоретически это можно обеспечить в строго определенных условиях: расстояние перевозок менее 5 км, наличие дорог с твердым покрытием, четко определенные маршруты перевозки зерна. Подобных условий в Казахстане очень мало. Наиболее типичны такие варианты: расстояние от полей до пункта послеуборочной обработки зерна (тока) превышает 10 км, проселочные дороги без твердого покрытия, проходят по холмистой местности, в течение рабочего дня маршруты движения транспорта могут измениться в зависимости от убранной площади. В этих условиях весьма затруднительно организовать четкое взаимодействие комбайна и транспорта, так как время ожидания транспорта трудно прогнозировать с достаточной точностью (1-2 мин). К тому же урожайность зерна в поле также может варьировать в больших пределах, что обуславливает переменное время заполнения зерном бункера комбайна.

Цель исследования – рассчитать параметры транспортного зернопотока по маршруту «поле – ток» для уборочных условий Казахстана на примере модельного семеноводческого хозяйства, определить потребность в транспорте, оборудованном низкочастотными электромагнитными излучателями для стимули-

рования посевных качеств семян.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследование проводили применительно к наиболее типичным для Казахстана вариантам уборочных агрегатов в составе: комбайн СК-5М «Нива» или «Енисей-1200» и автомобили типа ЗИЛ-130 и ГАЗ-53. В качестве основного параметра транспортного зернопотока приняли продолжительность циклорейса транспорта («туда и обратно»). Автомобили оборудовали низкочастотными электромагнитными излучателями для повышения посевных качеств семян. Эффективность этого метода доказана патентами ЕР 2 684 444 В1 от 19.08.2015, ЕР 2 661 950 от 01.06.2016, а также многими исследованиями [1-5].

Расчет провели для модельных семеноводческих хозяйств по регионам Казахстана. Предложили алгоритм их выбора с учетом статистических данных Статистического управления РК:

1. Сбор и обработка статистических показателей производства зерна: S – уборочная площадь, U_z – урожайность зерна, W_z – валовый сбор зерна, T_{yb} – продолжительность уборки, N_x – количество хозяйств в области.
2. Обобщение и ввод статистических данных по показателям производства зерна в областях РК.
3. Группирование областей по показателям производства зерна и выявление однородных статистических выборок в виде категорий хозяйств.
4. Определение средних значений показателей производства зерна по каждой однородной статистической выборке (категории).

5. Определение необходимого сбора семян в каждой однородной статистической выборке по категориям хозяйств.

6. Определение потребного количества модельных хозяйств в каждой категории.

7. Определение территориальных параметров модельных хозяйств S , га; U , т/га; L , км; V , км/ч.

8. Формирование сводной таблицы показателей производства семян по регионам РК в модельных хозяйствах.

9. Формирование рекомендаций по параметрам модельных хозяйств.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. С помощью описанного алгоритма все зернопроизводящие области Казахстана классифицировали по трем категориям (табл. 1).

Средняя урожайность по областям определяли как средневзвешенную с учетом размера посевных площадей в каждой области по формуле:

$$\bar{y} = \frac{\sum S_i \cdot y_i}{\sum S_n} = \frac{S_1 \cdot y_1}{\sum S_n} + \frac{S_2 \cdot y_2}{\sum S_n} + \dots + \frac{S_n \cdot y_n}{\sum S_n}, \quad (1)$$

где n – количество областей с урожайностью y_i ;

$\sum S_n$ – общая сумма площадей в регионе;

S_i – площадь с урожайностью y_i .

Учитывая выявленную вариабельность данных по отдельным областям, каждую категорию хозяйств характеризовали средневзвешенным значением каждого параметра.

Анализ расчетов показал, что в целом по Казахстану за последние три года наблюдается достаточно стабильная устойчивость общих показателей производства зерна. Колебания по посевным площадям не превышают 2%, урожайности – 6%, валовых сборов зерна – 6%. Это дает возможность в дальнейшем ориентироваться на актуализированные показатели производства зерна в 2018 г.

Классификация уборочных площадей под зерновыми культурами выявила три наиболее характерных региона по категориям:

– I категория: с общей площадью 11,2 млн га, средней урожайностью 1,44 т/га, общим валовым сбором зерна 16,1 млн т;

– II категория: 2 млн га, 1,63 т/га и 3,26 млн т соответственно;

– III категория: 1,18 млн га, 1,6 т/га и 2,94 млн т соответственно.

Анализ расчетов показал, что все области Казахстана по производству зерна можно классифицировать на три категории. В первую категорию вошли Акмолинская, Костанайская и Северо-Казахстанская области. Во вторую – Алматинская, Карагандинская, Павлодарская. В третью – Актюбинская, Западно-Казахстанская, Туркестанская, Восточно-Казахстанская, Жамбылская.

Годовые поставки семян от каждой категории областей предположительно составляют 1,37 млн т; 0,28 млн и 0,25 млн т соответственно, при общей по-

требности 1,9 млн т.

Рекомендуемые средние площади зерновых культур в одном семеноводческом хозяйстве по их категориям составляют: I – 2,76 тыс. га; II – 656 га; III – 276 га (табл. 1).

Общее количество семеноводческих хозяйств I категории должно быть равно 171, II – 128, III – 282, а всего 581 таких хозяйств.

Для типовых семеноводческих хозяйств рассчитали параметры зернопотоков по маршрутам «поле – ток» и «ток – поле». Продолжительность циклоreyса $T_{цр}$ определили по формуле [6-8]:

$$T_{цр} = t_{ож} + t_{ман} + t_{выгр} + t_{пт} + t_{рт} + t_{обр}, \quad (1)$$

где $t_{ож}$ – время ожидания заполнения бункера комбайна зерном, мин;

$t_{ман}$ – время маневрирования автотранспорта при подъезде к комбайну с заполненным бункером, мин;

$t_{выгр}$ – время на выгрузку зерна из бункера комбайна в кузов автотранспорта, мин;

$t_{пт}$ – время движения автотранспорта по маршруту «поле – зерноток», мин;

$t_{рт}$ – время на разгрузку кузова на зерноток и оформление документов, мин;

$t_{обр}$ – время на движение автотранспорта по маршруту «зерноток – поле», мин.

Время заполнения бункера комбайна зерном определили по формуле, мин:

$$t_{ож} = t_6 = 6V_6 y_3 / B_{ж} U_3 V_{к}, \quad (2)$$

где t_6 – время заполнения бункера комбайна, мин;

V_6 – вместимость бункера комбайна, м³;

y_3 – плотность зерна, кг/м³;

$B_{ж}$ – ширина захвата жатки, м;

U_3 – урожайность зерна, кг/га;

$V_{к}$ – рабочая скорость движения комбайна, м/с.

В уравнении (2) знаменатель представляет собой произведение трех случайных величин – $B_{ж}$, U_3 , $V_{к}$. Они определяют фактическую подачу зерна в комбайн q_3 , которая не должна превышать его пропускную способность с учетом соломистости, то есть:

$$q_3 = B_{ж} U_3 V_{к}, \quad (3)$$

где q_3 – фактическая подача зерна в комбайн, кг/с.

Однако в реальных условиях фактическая ширина захвата жатки $B_{ж}$ варьирует в некоторых пределах, так как комбайнер не может постоянно точно вести комбайн по кромке стеблестоя, чтобы фактическая рабочая ширина захвата жатки $B_{ф}$ была равна конструктивной величине $B_{к}$. Разница может доходить до 0,6-0,8 м. Таким образом, в уравнении (3) вместо конструктивной ширины захвата жатки должно быть математическое ожидание ее рабочей ширины. Урожайность зерна U_3 по площади поля – также величина переменная. К краю поля она больше, в середине меньше, и фактическая урожайность определяется ее



Таблица 1

Table 1

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ТИПОВЫХ СЕМЕНОВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ ПО КАТЕГОРИЯМ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН (2016-2018)
CALCULATION OF THE AMOUNT OF GRAIN CROP SEEDS AND TYPICAL SEED FARMS CLASSIFIED BY CATEGORIES IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN (2016-2018)

Показатели / Indicators	Категории хозяйств Farm categories		
	I	II	III
Общая уборочная площадь, S_o , млн га Total harvested area, S_o , million/ha	11,182	2,000	1,184
Средневзвешенная урожайность, V_3 , т/га Weight-average yield, V_3 , t/ha	1,44	1,63	1,60
Средневзвешенный годовой сбор зерна, W_3 , млн т Annual weight-average grain harvest, W_3 , mln t	16,10	3,26	2,94
Количество зерна, оставшегося после очистки от примесей, W_o , млн т Amount of grain remaining after cleaning from impurities, W_o , mln t	13,70	2,77	2,50
Выделенная доля семян от оставшегося зерна после очистки (0,1), W_c , млн т Amount of seeds separated from the grain remaining after cleaning (0.1), W_c , mln t	1,370	0,277	0,250
Общее количество зерновых хозяйств в регионе (по данным Стат. управления РК), N_x , шт. Total number of grain farms in the region, N_x , according to the RK Department of Statistics	4054	3049	6669
Средняя уборочная площадь одного зернотоварного хозяйства, S_x , га Average harvesting area of one grain farm, S_x , ha	2760	656	276
Урожайность семян в семеноводческих хозяйствах, V_c , т/га Seed yield on seed farms, V_c , t/ha	2,9	3,3	3,2
Необходимая уборочная площадь для сбора семян, S_{nc} , тыс. га Harvested area required to obtain the seeds, S_{nc} , thousand ha	472,4	84,0	78,1
Необходимое количество семеноводческих хозяйств, N_c , шт. Required number of seed farms, N_c , units	171	128	282

математическим ожиданием $\bar{B}_j$. Аналогично рабочая скорость комбайна определяется ее математическим ожиданием $\bar{V}_k$. В итоге математическое ожидание фактической подачи зерна в комбайн должно определяться из выражения:

$$\bar{q}_3 = \bar{B}_j \bar{V}_3 \bar{V}_k. \quad (4)$$

Практика показала, что текущее изменение параметров B_i , V_{3i} , V_{ki} подчиняется нормальному закону распределения. Однако в уравнении (4) очень мала вероятность того, что все его составляющие во время реальной работы комбайна сочетались бы одновременно на верхних, нижних или средних уровнях. Возможны различные варианты их сочетания, так как они между собой не коррелируют в каждый момент времени. Таким образом, определение математического ожидания величины подачи зерна в комбайн представляет собой решение одной из задач статистического моделирования: как влияют текущие отклонения переменных B_i ; V_{3i} ; V_{ki} на конечное значение математического ожидания их произведения.

По методу Монте-Карло для расчета статистических характеристик величины подачи зерна в бункер комбайна разыгрывали значения переменных B_i , V_{3i} , V_{ki} с помощью случайных чисел ϕ_1 [9].

Проведя процедуру разыгрывания (более 40), выяснили, что доверительный интервал для случайной функции q_3 при варьировании B_j , V_3 , V_k сузился до 90%, так как действительно ситуация встречи аргументов B_j , V_3 , V_k на крайних значениях маловероят-

на. Это дало основание в формуле (2) в знаменателе перед аргументами B_j , V_3 , V_k поставить коэффициент $K_{ст} = 0,9$.

При расчете $t_{ож}$ рассмотрены три варианта реальной ситуации.

Первый вариант: транспорт приехал на поле, а комбайн с пустым бункером только начал работать. Тогда время ожидания транспорта будет равно времени заполнения бункера комбайна зерном, то есть $t_{ож} = t_6$. Это самый нежелательный случай, так как время циклофорейса максимально.

Второй вариант: автотранспорт появился на поле, а комбайн уже стоит с заполненным бункером. Тогда $t_{ож} = 0$. Это самый благожелательный случай.

Третий вариант – промежуточный.

В общем случае с некоторой вероятностью принято, что $t_{ож} = 0,5t_6$. В этом варианте ошибка в расчете $T_{пр}$ будет наименьшей. Урожайность зерна в Казахстане колеблется в пределах 1,0-3,5 т/га, скорость движения комбайна – 5-9 км/ч. При таких параметрах рассчитали возможные варианты времени заполнения бункера комбайна зерном и построили соответствующие графики при $V_6 = 3 \text{ м}^3$, $\gamma = 750 \text{ кг/м}^3$, $B_j = 6 \text{ м}$ (рисунк 1).

В соответствии с принятым допущением, что время $t_{ож}$ в формуле (1) можно принять равным $0,5t_6$, при $V_k = 5 \text{ км/ч}$ для I категории хозяйств этот показатель составляет 17,35 мин, для II – 9,8 мин, для III категории – 8,7 мин.

Время на маневрирование автотранспорта при подъезде к комбайну с заполненным бункером зави-

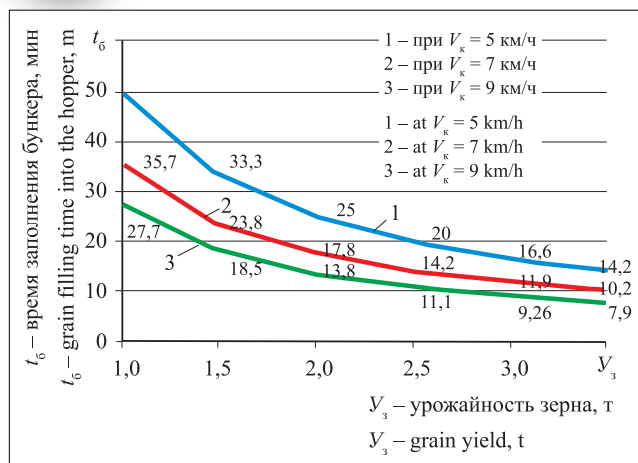


Рис. Продолжительность заполнения зерном бункера комбайна «Енисей-1200» в зависимости от урожайности и скорости движения комбайна

Fig. Grain filling time into the hopper of the Enisey-1200 combine harvester, depending on the yield and the combine harvester speed

сит от расстояния до него и скорости движения транспорта по полю. С помощью мобильной связи комбайнер всегда может определить место необходимой встречи, то есть время маневрирования сейчас сократилось до минимума. По данным ряда машиноиспытательных станций, $t_{\text{ман}} = 2-3$ мин. Время выгрузки зерна из бункера комбайна определили по формуле:

$$t_{\text{выгр}} = V_6 \cdot \gamma_3 / q_{\text{ш}}, \quad (5)$$

где $q_{\text{ш}}$ – производительность выгрузного шнека комбайна, кг/мин.

Для комбайна «Енисей-1200» при $q_{\text{ш}} = 650$ кг/мин, $t_{\text{выгр}}$ равно 3,5 мин.

Время движения автотранспорта по маршруту «поле – ток» определили по формуле:

$$t_{\text{пт}} = 60 \cdot L_{\text{пт}} / V_{\text{пт}}, \quad (6)$$

где $L_{\text{пт}}$ – расстояние от зернотока до поля, км;

$V_{\text{пт}}$ – эксплуатационная скорость движения автотранспорта по этому маршруту, км/ч.

Пользуясь статистическими данными по типовым условиям уборки зерновых в Казахстане, построили серию графиков при разных значениях $L_{\text{пт}}$ и $V_{\text{пт}}$ применительно к типовым хозяйствам:

I категория – $L_{\text{пт}} = 20$ км, $V_{\text{пт}} = 55$ км/ч, $t_{\text{пт}} = 22$ мин; II категория – 12 км, 45 км/ч и 16 мин; III категория – 6 км, 40 км/ч и 9 мин соответственно.

Время движения автотранспорта по маршруту «зерноток – поле» определили по формуле:

$$t_{\text{обр}} = 60 L_{\text{пт}} / V_{\text{пт}}, \quad (7)$$

где $L_{\text{пт}}$ – расстояние от зернотока до поля к возможному месту встречи с комбайном, так как за время $t_{\text{пт}}$, $t_{\text{рт}}$ и $t_{\text{обр}}$ комбайн может изменить свое место расположения (переехать на другой край поля или на другое поле);

$V_{\text{пт}}$ – эксплуатационная скорость движения авто-

транспорта по маршруту «зерноток – поле», км/ч; $V_{\text{пт}}$ больше $V_{\text{тп}}$, так как автотранспорт не загружен.

На практике $L_{\text{пт}} = (1,0 \div 1,1) \cdot L_{\text{тп}}$, а $V_{\text{пт}} = (1,15 \div 1,25) \cdot V_{\text{тп}}$, то есть для хозяйств:

I категории – $L_{\text{пт}} = 1,05 \cdot 20 = 21$ км; $V_{\text{пт}} = 60$ км/ч;

II категории – $L_{\text{пт}} = 1,05 \cdot 12 = 12,6$ км, $V_{\text{пт}} = 54$ км/ч;

III категории – $L_{\text{пт}} = 1,05 \cdot 6 = 6,3$ км, $V_{\text{пт}} = 48$ км/ч.

Тогда для типового хозяйства I категории $t_{\text{обр}} = 19$ мин, II категории – 14 мин, III категории – 7,8 мин.

Время на выгрузку зерна из кузова на зерноток $t_{\text{рт}}$ зависит от организации работ на зерноток, весового оборудования, места складирования семенного зерна. Обычно $t_{\text{рт}} = 3-5$ мин. Принимаем среднее значение – 4 мин.

Подводя итог расчетов времени циклоreyса для типовых хозяйств Казахстана, сложив все составляющие уравнения (1), получили: для хозяйств I категории $T_{\text{цр}} = 68,4$ мин, II – 49,5, III – 35,5 мин.

Приведенный расчет времени циклоreyса транспорта на отвозке зерна по маршруту «поле – ток – поле» отличается от общепринятого, то есть от того, что приводят в различных учебных пособиях по машиноиспользованию [5, 10]. Прежде всего, время на ожидание комбайна с полным бункером принято $0,5t_6$, то есть как половина времени заполнения зерном бункера комбайна, что снижает общую ошибку в сравнении с другими промежуточными вариантами в течение рабочего времени работы комбайна. Далее, сокращено время на маневрирование транспорта при подъезде к комбайну с полным бункером благодаря наличию мобильной связи между комбайнером и водителем. Затем, время движения транспорта по маршруту «поле – ток» и «ток – поле» рассчитано при разных расстояниях перевозки и скоростях движения (раньше учитывали только среднее значение, что менее точно [10]). Грузоподъемность транспорта используется не полностью ввиду специфики технологии перевозки зерна с одновременным облучением его в кузове транспорта, что предполагает равномерное распределение зерна в кузове автотранспорта (без горки). Время облучения зерна в кузове (10-20 мин) всегда меньше $T_{\text{цр}}$, то есть не влияет на продолжительность циклоreyса и количество рейсов.

После расчетов всех составляющих времени циклоreyса $T_{\text{цр}}$ определили производительность одного транспортного средства $W_{\text{цр}}$ за один циклоreyс, т/ч:

$$W_{\text{цр}} = Q_{\text{тр}} K_{\text{ис}} / 60 T_{\text{цр}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{тр}}$ – грузоподъемность транспортного средства, т;

$K_{\text{ис}}$ – коэффициент использования грузоподъемности транспортного средства, который учитывает недоиспользование грузоподъемности автотранспорта, вызванное совмещением операции перевозки зерна в кузове с одновременным облучением его в процессе движения.

Особенность этого процесса заключается в том,

что облучение зерна происходит в слое, который находится строго между двумя панелями облучателя. Зерно выше верхней кромки облучателя не попадает под воздействие. Поэтому кузов заполняют зерном не выше верхней кромки облучателей, то есть без горки над кузовом. С этой целью предложено специальное устройство для выравнивания верхнего слоя зерна (патенты N 2019/0038 от 17.01.2019; N 15435 от 16.04.2019).

Коэффициент использования грузоподъемности транспорта безразмерный:

$$K_{ис} = V_k / V_3, \quad (9)$$

где V_k – объем зерна в кузове автомобиля автотранспорта в пределах габаритов кузова, m^3 ;

V_3 – объем зерна в кузове автотранспорта с горкой, m^3 .

Наблюдения за работой комбайнов совместно с автотранспортом и сделанные измерения показали, что $K_{ис} = 0,85-0,95$, (принимая 0,90). Количество циклов $Z_{цр}$ за один рабочий день определили по формуле [11]:

$$Z_{цр} = T_{см} / T_{цр}, \quad (10)$$

где $T_{см}$ – продолжительность смены, ч.

После этого производительность транспорта за смену W_3 можно вычислить по формуле (8), умножив

$W_{цр}$ на $Z_{цр}$. Общий объем перевозимого зерна с темпом уборки t_y в день известен из характеристики типовых хозяйств по их категориям (табл. 2). Количество потребного транспорта определили из выражения:

$$N_{ат} = t_y / W_{цр} Z_{цр}. \quad (11)$$

Для всех семеноводческих хозяйств Республики Казахстан необходимо иметь 5714 автомобилей, оборудованных облучателями зерна. Для хозяйств I категории требуется 4792 ед., II категории – 640 ед., III категории – 282 ед. и, соответственно, для одного хозяйства в каждой категории: I – 28 ед., II – 5 ед., III – 1 ед.

Выводы

1. Предложили алгоритм классификации зернопроизводящих областей Республики Казахстан по посевным площадям, урожайности зерна, годовым валовым сборам в соответствии со статистическими данными Статуправления Казахстана.

2. Зернопроизводящие области Казахстана объединили в три категории: I – Акмолинская, Костанайская и Северо-Казахстанская области с посевной площадью 11,2 млн га, урожайностью – 1,44 т/га и сбором зерна 16,1 млн т; II категория – Алматинская, Карагандинская, Павлодарская области с соответствующими показателями: 2 млн га; 1,63 т/га; 3,26 млн т, и III категория

Таблица 2

Table 2

ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УБОРОЧНЫХ РАБОТ В ТИПОВЫХ СЕМЕНОВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВАХ ПО ИХ КАТЕГОРИЯМ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН
TECHNICAL AND OPERATIONAL INDICATORS OF HARVESTING OPERATIONS PERFORMED ON TYPICAL SEED FARMS CLASSIFIED BY THEIR CATEGORIES IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Показатели / Indicators	Категории хозяйств Farm categories		
	I	II	III
Общая уборочная площадь под семена, S_n , тыс. га Total harvested area under seeds S_n , thousand ha	472,4	84,0	78,1
Необходимое количество семеноводческих хозяйств, N_c , шт. Required number of seed farms, N_c , units	171	128	282
Общая потребность в семенах ($0,1W_o$), W_c , тыс. т 0,1 W_o / Total amount of seeds required ($0,1W_o$), W_c , thousand tons, 0.1 W_o	1370	277	250
Необходимый сбор семян на одно хозяйство, N_c , тыс. т Required seed yield per one farm, N_c , thousand tons	80,000	2,160	0,986
Средняя площадь одного зернооварного хозяйства, S_x , га Average area of one grain farm, S_x , ha	2800	660	280
Продолжительность уборочного периода, T_y , дней Length of the harvesting period T_y , days	10,0	9,5	9,1
Темп уборки семян в день, t_y Rate of seed harvesting per a day, t_y	800	216	98
Время одного циклорейса, t_y , ч Time of one round trip, t_y , hours	1,14	0,83	0,74
Производительность транспорта за один циклорейс, т/ч Transport performance in one round trip, t/h	3,20	4,33	6,00
Продолжительность рабочего дня, ч Length of a working day, h	10	10	10
Количество рейсов за рабочий день Number of trips per a working day	9	12	17
Производительность одного транспорта в день, т Performance of a single transport unit per a day, t	29	52	102
Необходимое количество транспорта на одно хозяйство, ед. Required number of transport vehicles per a farm, units	28	5	1

– Актюбинская, Западно-Казахстанская, Туркестанская, Восточно-Казахстанская, Жамбылская с показателями: 1,18 млн га; 1,6 т/га 2,94 млн т соответственно.

3. Рекомендуемые годовые поставки семян от каждой категории областей: I – 1,37 млн т, II – 0,28 млн т, III – 0,25 млн т, всего около 2 млн т семян.

4. Рекомендуемое количество семеноводческих хозяйств по категории областей: I – 171, II – 128 и III – 282, всего 581.

5. Для транспортировки зерна с одновременным его

облучением в кузове с целью стимулирования посевных качеств требуется около 5714 автомобилей, из них для хозяйств I категории – 4792, II – 640, III – 282 ед.

6. Определили основные параметры зернопотоков для различных категорий хозяйств. Для I категории: время циклорейса – 68,4 мин, среднесуточной темп уборки – 800 т, производительность автомобиля за один циклорейс – 3,2 т, количество рейсов в день – 9; для II категории, соответственно, 49,5 мин; 216 т; 4,33 т; 12 циклорейсов; для III категории – 35,5 мин; 98 т; 6,0 т; 17 циклорейсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шибряева Л.С., Садыков Ж.С. Влияние воздействия разных видов излучения на зерновой материал СВМ. Алматы: Агроуниверситет. 2015. 119 с.
2. Жалнин Э.В., Шибряева Л.С., Садыков Ж.С. Низкочастотное электромагнитное облучение зерна в зерноуборочном комбайне // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. №2. С. 16-20.
3. Кондратенко Е.П., Соболева О.М., Егорова И.В., Вербицкая Н.В. Моделирование признаков посевных качеств семян пшеницы под влиянием электромагнитной обработки // *Вестник Краснодарского ГАУ*. 2014. №2. С. 157-161.
4. Ерохин А.И. Применение электромагнитных полей для предпосевной обработки семян // *Земледелие*. 2012. №5. С. 46-48.
5. Соболева О.М. Изменчивость биометрических показателей проростков пшеницы под влиянием электромагнит-

- ного поля // *Вестник Алтайского аграрного университета*. 2014. Т. 119. С. 45-50.
6. Свиричевский Б.С. Эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: Госиздательство сельскохозяйственной литературы. 1958. 660 с.
7. Гоберман В.А. Вопросы проектирования и расчета в сельском хозяйстве // *Научные труды ВИМ*. 1972. Вып. 47. 139 с.
8. Пьянов В.С. Крупнотоварное производство зерна. Ставрополь: АГРУС. 2014. 244 с.
9. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука. 1978. 700 с.
10. Шепелев С.Д., Окунев Г.А. Проектирование поточных линий на уборке урожая: Монография. Челябинск, 2006. 162 с.
11. Евтюшенков Н.Е., Бисенов Г.С. Совершенствование транспортно-погрузочных работ // *Сельский механизатор*. 2013. №8. С. 39.

REFERENCES

1. Shibryaeva L.S., Sadykov Zh.S. Vliyanie vozdeystviya raznykh vidov izlucheniya na zernovoy material SVM [Influence of different types of irradiation on grain material in SVM grain dryer]. Almaty: Agrouniversitet. 2015. 119 (In Russian).
2. Zhalnin E.V., Shibryaeva L.S., Sadykov Zh.S. Nizkochastotnoye elektromagnitnoye obluchenie zerna v zernouborochnom kombaine [Low-frequency electromagnetic irradiation of grain inside a combine harvester]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016. №2. 16-20 (In Russian).
3. Kondratenko E.P., Soboleva O.M., Egorova I.V., Verbitskaya N.V. Modelirovaniye priznakov posevnykh kachestv semyan pshenitsy pod vliyaniem elektromagnitnoy obrabotki [Modeling some indicators of sowing qualities of wheat seeds under the influence of electromagnetic treatment]. *Vestnik Krasnodarskogo GAU*. 2014. №2. 157-161 (In Russian).
4. Erokhin A.I. Primeneniye elektromagnitnykh poley dlya predposevnoy obrabotki semyan [Use of electromagnetic fields for pre-sowing treatment of seeds]. *Zemledeliye*. 2012. №5. 46-48 (In Russian).
5. Soboleva O.M. Izmenchivost' biometricheskikh pokazateley prorostkov pshenitsy pod vliyaniem elektromagnitnogo po-

- lya [Variability of biometric indicators of wheat germs under the influence of an electromagnetic field]. *Vestnik Altayskogo agrarnogo universiteta*. 2014. Vol. 119. 45-50 (In Russian).
6. Svirshchevskiy B.S. Ekspluatatsiya mashinnotraktornogo parka [Operation of the machine and tractor fleet]. Moscow: Gosizdatel'stvo sel'skokhozyaystvennoy literatury. 1958. 660 (In Russian).
7. Gberman V.A. Voprosy proektirovaniya i rascheta v sel'skom khozyaystve [Some aspects of design and calculation in agriculture]. *Nauchnye trudy VIM*. 1972. Issue 47. 139 (In Russian).
8. P'yanov V.S. Krupnotovarnoye proizvodstvo zerna [Large-scale grain production]. Stavropol': AGRUS. 2014. 244 (In Russian).
9. Sobol' I.M. Metod Monte-Karlo [Monte-Carlo method]. Moscow: Nauka. 1978. 700 (In Russian).
10. Shepelev S.D., Okunev G.A. Proektirovaniye potochnykh liniy na uborke uroznya: Monografiya [Designing production lines for harvesting: Monograph]. Chelyabinsk, 2006. 162 (In Russian).
11. Evtyushenkov N.E., Bisenov G.S. Sovershenstvovaniye transportno-pogruzochnykh rabot [Improving cargo handling operations]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2013. №8. 39 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 24.06.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 24.06.2019

Статья принята к публикации 07.11.2019
The paper was accepted
for publication on 07.11.2019



Анализ процессов взаимодействия семян с рабочими органами машин предпосевной обработки циклического действия*

Виктор Петрович Забродин,
доктор технических наук, профессор;

Суханова Майя Викторовна,
доцент, кандидат технических наук,
e-mail: m_suhanova@list.ru

Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета, Российская Федерация

Реферат. Повреждение и разрушение семян рабочими органами машин в результате предпосевной обработки сказывается на качестве будущего урожая. Предпосевную обработку семян обычно осуществляют машинами периодического циклического действия. (*Цель исследования*) Определить степень травмирования семян при предпосевной обработке химическими и биологическими препаратами в машинах циклического действия, провести анализ процессов взаимодействия семян с рабочими органами протравливателей, предложить пути снижения механических повреждений семенного материала. (*Материалы и методы*) Изучили возможные варианты последовательности взаимодействия рабочих органов машин с семенами. Определили влияние ударного механического воздействия рабочих органов машин на семена. На основании исследований ученых, опираясь на широкий спектр теоретических, экспериментальных работ и производственный опыт, сравнили существующие технологические схемы. (*Результаты и обсуждение*) Рассмотрели влияние рабочих органов на степень повреждения семян на различных этапах протравливания: во время загрузки, смешения, выгрузки. (*Выводы*) Выявили наиболее щадящий технологический процесс, включающий загрузку барабана ковшовой норией и выгрузку материала в бурты или эластичную тару. При этом повреждение семян зерновых культур составит 2,2-4,5 процента, а бобовых – не более 6 процентов. Рекомендовали при конструировании машин циклического действия не использовать шнековые погрузчики и лопастные мешалки, так как они сильно травмируют семена, особенно бобовых культур – до 20-32 процентов. С целью снижения степени повреждения семян в конструкциях протравливателей предложили применять современные материалы, обладающие высокой эластичностью, способные испытывать значительные растяжения в пределах упругих деформаций.

Ключевые слова: механический удар, травмирование семян, предпосевная обработка семенного материала, протравливание семян, протравливатели, высокоэластичные материалы.

■ Для цитирования: Забродин В.П., Суханова М.В. Анализ процессов взаимодействия семян с рабочими органами машин предпосевной обработки циклического действия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 63-68. DOI 10.22314.2073-7599-2019-13-5-63-68.

Analyzing Interaction between Seeds and Pre-Seeding Treatment Machines of Cyclic Action*

Viktor P. Zabrodin,
Dr.Sc.(Eng.), professor;

Maya V. Sukhanova,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: m_suhanova@list.ru

Azov-Black Sea Engineering Institute – Branch of Don State Agrarian University, Russian Federation

Abstract. Damage and destruction of seeds by working parts of agricultural machinery affects the quality of future harvest. Pre-sowing treatment of seeds is carried out, as a rule, with machines of periodic cyclic action. (*Research purpose*) To determine the degree of damage caused to seeds during pre-sowing treatment with chemical and biological dressing agents in cyclic machines, to analyze the interaction processes between seeds and working parts of pre-sowing treatment machines of cyclic action. (*Materials and methods*) The authors examined possible options of sequencing the interaction between working parts of machines and seeds

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-01-00250, гранта РФФИ №17-01-00323.

*Acknowledgments. This research was carried out with the financial support of the RFBR grant, project No. 19-01-00250 and No. 17-01-00323.

and determined the shock mechanical impact on seeds made by working parts. Basing on research results obtained by other scientists as well as a wide range of theoretical and experimental studies and the best available practices, the authors have made a comparative analysis of the existing technological solutions. (*Results and discussion*) The authors have examined the effect of working parts on the degree of damage caused to seeds at various stages of pre-sowing treatment: while loading, mixing, and unloading. (*Conclusions*) The most sparing technological process has been identified, including loading the drum with a bucket elevator and unloading the material into piles or elastic containers. In this case, damage caused to grain seeds will amount to 2.2-4.5 percent, and those of legumes – not more than 6 percent. It is recommended not to use auger loaders and paddle mixers when designing cyclic machines, since they cause severe damage to seeds, especially those of legumes, of up to 20-32 percent. The seed damage rate can be decreased due to the use of modern materials featuring high elasticity and capable of withstanding considerable stretching within the limits of elastic deformations.

Keywords: mechanical impact, seed damage, pre-seeding treatment of seed material, seed dressing, dressing agents, highly elastic materials.

For citation: Zabrodin V.P, Sukhanova M.V. Analiz protsessov vzaimodeystviya semyan s rabochimi organami mashin predposevnoy obrabotki tsiklicheskogo deystviya [Analysis of interaction between seeds and pre-seeding treatment machines of cyclic action]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 63-68 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-63-68.

Чтобы сохранить всхожесть семян, перед посевом их обрабатывают химическими и биологическими препаратами против болезней и вредителей. Машины для предпосевной обработки семян бывают периодического и циклического (порционного) действия. Последние обладают следующими достоинствами:

- простота конструкции;
- минимальное число рабочих органов, взаимодействующих с семенами;
- простота обслуживания при минимальном числе персонала;
- высокая равномерность смешивания.

Однако машины циклического действия имеют недостатки:

- малую производительность;
- ограниченную область применения (чаще всего их используют для сухого смешивания);
- при сухом смешивании препарат плохо удерживается на семенах, что требует повышенных доз;
- низкий уровень экологической защиты обслуживающего персонала.

Вследствие простоты конструкции и низкой стоимости машины циклического действия применяют в основном в хозяйствах малых форм собственности.

Цель исследования – определить степень травмирования семян при предпосевной обработке химическими и биологическими препаратами в машинах циклического действия, провести анализ процессов взаимодействия семенного материала с рабочими органами протравливателей, предложить пути снижения механических повреждений.

Материалы и методы. Процесс предпосевной обработки семян химическими и биологическими препаратами заключается в следующем. В смесительную камеру загружается определенная порция семян и соответствующее требуемой норме количество ядохи-

миката. В зависимости от принципа действия и конструкции смесителя процесс перемешивания смеси продолжается заданное время, или продолжительность смешивания определяют визуально.

Обработка семян аналогична процессу смешения [1]. Равномерность покрытия препаратом зависит от продолжительности смешивания с протравителем (рис. 1).

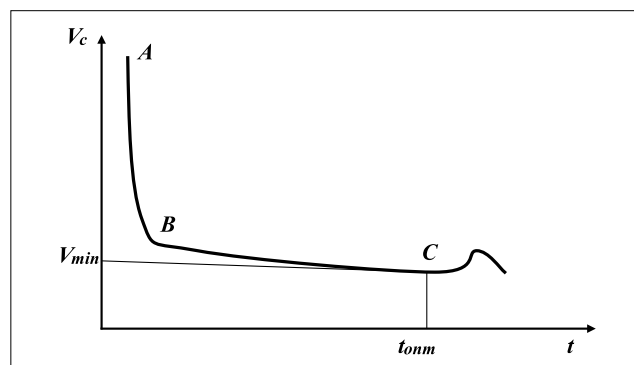


Рис. 1. Зависимость коэффициента неоднородности смеси от времени смешения в протравливателе

Fig. 1. Relationship between the coefficient of mixture heterogeneity and mixing time in a seed pre-sowing treatment machine

Процесс смешения происходит в основном на трех участках. На участке $A-B$ при конвективном смешивании частицы перемещаются в микрообъемах. На участке $B-C$ в ходе диффузионного смешивания частицы перераспределяются на уровне микрообъемов.

В зависимости от времени смешения неоднородность смеси быстро убывает, достигая минимального значения $V_{\min}$ при $t = t_{\text{опт}}$. Затем она возрастает вследствие сегрегации. Следовательно, достижение минимальной неоднородности требует от оператора повышенного внимания при выборе режима работы протравливателя.

Рассмотрим технологический процесс предпосев-ной обработки семян химическими и биологическими препаратами в машинах циклического (порцион-ного) действия (рис. 2).

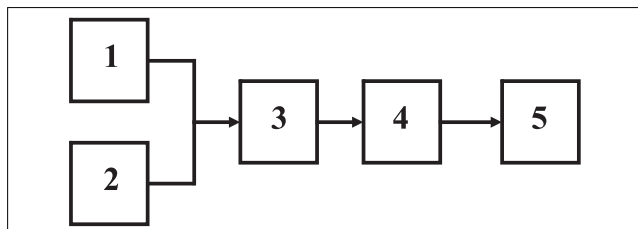


Рис. 2. Общая схема операций технологического процесса протравливания семян машинами циклического действия:

- 1–3 – загрузка семян в емкость для смешивания;
- 2–3 – загрузка препарата в емкость для смешивания;
- 3–4 – смешивание компонентов;
- 4–5 – выгрузка обработанных семян

Fig. 2. General flow chart of seed pre-sowing treatment operations with machines of cyclic action:

- 1–3 – loading seeds into a mixing tank;
- 2–3 – loading a dressing agent into a container for mixing;
- 3–4 – mixing of components;
- 4–5 – unloading of treated seeds

Каждая из операций технологического процесса может осуществляться несколькими типами рабочих органов [1]. Возможны несколько вариантов последовательности воздействия рабочих органов машин на семена, в результате чего они повреждаются (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. С целью выбора наиболее щадящей технологической схемы предпосев-ной обработки рассмотрим влияние рабочих органов на степень повреждения семян в каждом из указанных процессов (таблица).

При реализации процесса 1–6–3 загрузка семян выполняется вручную. Это самый непроизводитель-ный процесс, он оправдан при малых объемах работ. Кроме того, он самый опасный с экологической точ-ки зрения, так как препарат загружается в емкость вручную. В зависимости от используемых средств за-грузки повреждение семян не превышает 0,5–0,8% [2].

При загрузке емкости для смешивания шнековым транспортером (процесс 1–7–3) на повреждение се-мян оказывает влияние технологическая схема по-грузчика. При использовании погрузчиков с горизон-тальным и наклонным шнеками степень поврежде-ния семян возрастает. Кроме того, травмирование за-висит от вида культуры, размеров семян, конструк-тивных и кинематических параметров транспортера. Повреждение семян зерновых культур составляет 2,3–7,3%, а бобовых культур (горох) – 15–25% [3, 4].

Загрузка с помощью скребкового транспортера (схема 1–8–3) приводит к повреждению семян в ос-новном в зонах изменения направления вектора ско-рости поступательного движения от горизонтально-

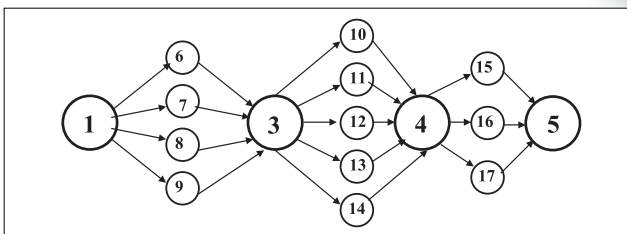


Рис. 3. Воздействие рабочих органов машин циклического действия на семена:

- 1–6–3 – ручная загрузка 6 семян из бурта 1 в емкость 3 для смешивания;
- 1–7–3 – загрузка семян из бурта 1 в емкость 3 для смешивания шнековым транспортером 7;
- 1–8–3 – загрузка семян из бурта 1 в емкость 3 для смешивания скребковым транспортером 8;
- 1–9–3 – загрузка семян из бурта 1 в емкость 3 для смешивания с помощью ковшовой норы 9;
- 3–10–4 – смешение семян с протравителем в барабанном сме-сителе;
- 3–11–4 – смешение семян с протравителем с помощью ло-пастной мешалки;
- 3–12–4 – смешение семян с протравителем шнековым аппа-ратом;
- 3–13–4 – смешение семян с протравителем центробежным аппаратом (центробежный диск);
- 3–14–4 – смешение семян с протравителем воздушным потоком;
- 4–15–5 – выгрузка обработанных семян в эластичные контей-неры (мешки);
- 4–16–5 – выгрузка обработанных семян в бурт;
- 4–17–5 – выгрузка обработанных семян в транспортное сред-ство

(примечание: цифра 2 отсутствует, так как обозначает опе-рацию загрузки препарата до обработки им семян)

Fig. 3. The impact of the working parts of cyclic action machines on seeds:

- 1–6–3 – manual loading of seeds 6 from pile 1 into container 3 for mixing;
 - 1–7–3 – loading seeds from pile 1 into container 3 for mixing with screw conveyor 7;
 - 1–8–3 – loading seeds from pile 1 into container 3 for mixing with scraper conveyor 8;
 - 1–9–3 – loading seeds from pile 1 into container 3 for mixing using bucket elevator 9;
 - 3–10–4 – mixing of seeds with a dressing agent in a drum mixer;
 - 3–11–4 – mixing of seeds with a dressing agent using a paddle mixer;
 - 3–12–4 – mixing of seeds with a dressing agent using a screw device;
 - 3–13–4 – mixing of seeds with a using a centrifugal device (a centrifugal disk);
 - 3–14–4 – mixing of seeds with a dressing agent by air flow;
 - 4–15–5 – unloading of treated seeds into elastic containers (bags);
 - 4–16–5 – unloading of treated seeds into a storage pile;
 - 4–17–5 – unloading of treated seeds into a vehicle
- (note: position 2 is absent, as it indicates the operation of loading a dressing agent before seed treatment)

го к наклонному. Это вызвано тем, что семена защемляются между цепью и звездочками. Степень травмирования на этом этапе для зерновых культур достигает 0,1-0,6%, бобовых – 1,6-2,0% [5, 6].

При загрузке емкости с помощью ковшовой норрии (процесс 1–9–3) повреждение семян зерновых культур равно 0,7-1,5%, бобовых – 1,0-3,0% [7].

Операция 3–4 покрытия семян протравителем или биопрепаратом может быть осуществлена в барабанном смесителе (процесс 3–10–4), с помощью лопастных мешалок (3–11–4), шнеком (3–12–4), центробежным диском (3–13–4) или воздушным потоком (3–14–4).

На степень повреждения семян рабочими органами смесителей барабанного типа (процесс 3–10–4) значительное влияние оказывают конструкция барабана, наличие дополнительных рабочих поверхностей, кинематический режим и другие параметры. Из всего многообразия барабанов для предпосевной обработки семян чаще всего используют барабаны цилиндрического типа с осью вращения, совпадающей с осью симметрии цилиндра или с наклонной к оси цилиндра осью вращения – «пьяная бочка» [1].

Для интенсификации процесса смешения на внутренней поверхности барабана устанавливают лопатки прямолинейной или криволинейной формы. Лопатки, кроме того, способствуют сообщению смеси поступательного движения вдоль продольной оси барабана.

Степень повреждения семян барабанными устройствами достигает 1,3-2,5% [2, 8].

Применение лопастных мешалок (процесс 3–11–4) способствует интенсификации процесса предпосевной обработки посевного материала, но и вызывает повышенное повреждение семян из-за ударного воздействия лопаток. Травмирование в случае зерновых культур составляет 3-5%, бобовых 5-8% [7, 8].

Повреждение семян смесителями шнекового типа (процесс 3–12–4) зависит от конструкции шнека, угла наклона к горизонту, формы витков, кинематических и других параметров.

Из-за отсутствия данных по повреждению семян шнековыми смесителями при анализе технологического процесса воспользуемся данными, полученными для шнековых транспортеров. При этом будем учитывать то, что шнековый смеситель, установленный в барабане, работает аналогично шнековому транспортеру в открытом желобе, что исключает повреждение семян из-за заклинивания их между кожухом и витками шнека. Вследствие этого степень повреждения семян снижается на 40-50% [9]. Тогда для зерновых культур этот показатель равен 0,7-2,5%, бобовых – 2,0-3,5%.

Центробежные дисковые смесители (процесс 3–13–4) в практике сельхозмашиностроения не встречаются. Однако некоторые товаропроизводители используют центробежно-бегунковые смесители промышленного машиностроения. Повреждение семян в этом случае зависит от многих параметров, например, от организации места подачи компонентов в барабан, кинематических и конструктивных параметров аппарата и других. Травмирование семян зерновых культур такими смесителями достигает 1,0-2,6%, бобовых – 2,3-4,5% [2].

Применение воздушного потока (процесс 3–14–4) для предпосевной обработки семян в аппаратах циклического действия оправдано лишь при наличии источника сжатого воздуха. Конструкция смесителя несколько усложняется, а на степень повреждения семян значительное влияние оказывают скорость воздушного потока и материал барабана, так как для обеспечения процесса смешения скорость воздушного потока должна быть не ниже скорости витания семян

Таблица		Table	
ПРИЧИНЫ И СТЕПЕНЬ ПОВРЕЖДЕНИЯ СЕМЯН ПРИ ПРОТРАВЛИВАНИИ CAUSES AND RATE OF SEED DAMAGE DURING SEED PRE-TREATMENT			
Операции Operations	Источники травмирующего воздействия Sources of damaging effect	Повреждение семян,% Seed damage, %	
		зерновые / cereals	бобовые / legumes
(1-3) – загрузка компонентов в смеситель (1-3) – loading components into the mixer	загрузка вручную / manual loading	0,5-0,8	0,5-0,8
	шнековый транспортер / screw conveyor	2,3-17,3	15,0-25,0
	скребковый транспортер / scraper conveyor	0,1-0,6	1,6-2,0
	ковшовая нория / bucket elevator	0,7-1,5	1,0-3,0
(3-4) – смешивание компонентов (3-4) – mixing components	барабан / drum	1,3-2,5	1,3-2,5
	лопастная мешалка / paddle mixer	3,0-5,0	5,0-8,0
	шнек / screw auger	0,7-2,5	2,0-3,5
	центробежный диск / centrifugal disk	1,0-2,6	2,3-4,5
	воздушный поток / air flow	3,0-5,0	7,0-10,0
(4-5) – выгрузка обработанных семян (4-5) – unloading of treated seeds	эластичная тара (мешки) / elastic containers (bags)	0,2-0,5	0,2-0,5
	бурт / pile	0,2-0,5	0,2-0,5
	транспортные средства / vehicles	0,1-0,6	1,6-2,0



и протравителя [10-12]. Чтобы исключить распыливание протравителя, барабан должен быть герметизирован. Из-за многочисленных ударов семян о его стенки вероятность повреждения возрастает: для зерновых культур до 3-5%, для бобовых – до 7-10% [13].

Рассмотрим выгрузку обработанных семян (*процесс 4–5*) из протравливателя. Если для этого используют эластичные контейнеры (*процесс 4–15–5*), то причиной травмирования станет действие гравитационных сил и сил трения. Повреждение семян зерновых и бобовых культур составит 0,2-0,5% [2].

Выгрузка в бурты (*процесс 4–16–5*) применяется в тех случаях, когда обработанное зерно предназначено для хранения или при недостатке тары. Повреждение семян зависит от высоты разгрузки, поверхности на которую семена падают, и ряда других факторов. Значение показателя равно 0,2-0,5% [2].

При погрузке обработанных семян в транспортное средство (*процесс 4–17–5*) существенную роль играют тип транспортера, длина транспортирования, кинематические параметры транспортера. При применении скребковых транспортеров повреждение семян зерновых культур составляет для зерновых культур 0,1-0,6%, для бобовых – 1,6-2,0% [5, 6].

Учитывая, что данные в *таблице* получены различными авторами [13-16], принимающими разные показатели повреждения (разрушение, повреждение оболочек, микроповреждения и другие), эти показате-

тели можно использовать только при оценке рассматриваемых технологий.

Кроме того, приведенные данные получены для выпускаемых промышленностью машин, рабочие органы которых имеют стальные поверхности. Современные материалы обладают высокой эластичностью, способны испытывать значительные растяжения в пределах упругих деформаций [17, 18].

Выводы. В ходе исследований выявили наиболее щадящий технологический процесс, включающий загрузку барабана ковшовой норией и выгрузку материала в бурты или эластичную тару. При этом повреждение семян зерновых культур составит 2,2-4,5%, а бобовых – не более 6%.

При конструировании машин циклического действия следует избегать использования шнековых погрузчиков и лопастных мешалок, так как они сильно травмируют семена, особенно бобовых культур – до 20-32%.

С целью снижения степени повреждения семян в конструкциях протравливателей следует использовать современные материалы, обладающие высокой эластичностью, способные испытывать значительные растяжения в пределах упругих деформаций. Это позволит значительно снизить ударные воздействия на семена, суммарные потери посевного материала и интенсифицировать процесс предпосевной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.
2. Чазов С.А. Факторы, способствующие травмированию семян зерновых культур // *Труды Свердловского СХИ*. 1972. Т. 26. С. 106-114.
3. Новиков П.А. Повреждение семян транспортирующими рабочими органами // *Труды научно-исследовательского института зернового хозяйства*. 1971. С. 102-115.
4. Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами. М.: Колос. 1976. 319 с.
5. Москаленко В.И., Виндижев Н.Л. Травмирование семян масличных культур винтовыми и скребковыми транспортерами // *Селекция и семеноводство*. 1972. N3. С. 66-67.
6. Виндижев Н.Л. Травмирование семян масличных культур в транспортирующих органах уборочных машин и его устранение // *Вестник сельскохозяйственной науки*. 1975. N8. С. 97-99.
7. Лебедев В.Б. Влияние различных видов механических микроповреждений зерна пшеницы на его посевные качества // *Хранение и переработка зерна*. 1969. Вып. 6. С. 22-25.
8. Чазов С.А., Плаксин В.Ф. Пути снижения травмирования семян // *Селекция и семеноводство*. 1969. N4. С. 48-51.
9. Преображенский П.А. Спирально-винтовые транспортеры (гибкие шнеки) и смесители. КХТИ им. С.М. Кирова. 1970. 138 с.
10. Sommerfeld M., Huber N. Experimental analysis and modeling of particle-wall collisions. *International journal of multiphase flow*. 1999. Vol. 25. 1457-1489.
11. Kantak A.A., Davis R.H. Collisions of spheres with wet and dry porous layers on a solid wall. *Chemical engineering science*. 2006. 61. 417-427.
12. Ciampini D., Spelt T.K., Papini M. Simulation of interference effects in particle streams following impact with a flat surface. Part II. Parametric study and implications for erosion testing and blast cleaning. *Wear* 254 (2003). 250-264.
13. Нуруллин Э.Г., Салахов И.М. Травмирование семян в протравливателях пневмомеханического типа // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2010. N12. С. 21-22.
14. Бутенко А.Ф., Максименко В.А. Анализ травмирования семян зерновых культур. Исследование и разработка эффективности технологий и технических средств для животноводства. *Зерноград*, 2004. С. 75-83.
15. Шабанов Н.И., Бутенко А.Ф. Теоретические исследования процесса взаимодействия зерновки с лопаткой ротора // *Известия вузов. Сев.-Кав. Регион. Технические науки*. 2004. N3. С. 108-111.
16. Сысолин П.В., Ликкей А.В., Иваница К.Г. О причинах дробления зерна в катушечных высевальных аппаратах сеялок // *Тракторы и сельхозмашины*. 1971. N4. С. 24-25.
17. Забродин В.П., Бутенко А.Ф., Суханова М.В., Чепцов С.М. Исследование ударного воздействия механическо-

го устройства на семена озимой пшеницы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №2. С. 14-19.

18. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соу-

дарениями. М.: Международная программа образования. 2017. 336 с.

REFERENCES

1. Makarov Yu.I. Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov [Devices for mixing bulk materials]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1973. 216 (In Russian).
2. Chazov S.A. Faktory, sposobstvuyushchie travmirovaniyu semyan zernovykh kul'tur [Factors contributing to the damage of grain seeds]. *Trudy Sverdlovskogo SKHI*. 1972. Vol. 26. 106-114 (In Russian).
3. Novikov P.A. Povrezhdeniye semyan transportiruyushchimi rabochimi organami [Seed damage caused by transporting working parts]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta zernovogo khozyaystva*. 1971. 102-115 (In Russian).
4. Pugachev A.N. Povrezhdeniye zerna mashinami [Grain damage caused by machines]. Moscow: Kolos. 1976. 319 (In Russian).
5. Moskalenko V.I., Vindizhev N.L. Travmirovanie semyan maslichnykh kul'tur vintovymi i skrebkovymi transporterami [Oilseed damage caused by screw- and scraper-type conveyors]. *Selektsiya i semenovodstvo*. 1972. N3. 66-67 (In Russian).
6. Vindizhev N.L. Travmirovanie semyan maslichnykh kul'tur v transportiruyushchikh organakh uborochnykh mashin i ego ustraneniye [Oilseed damage caused by the transporting parts of harvesting machines and its avoidance]. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 1975. N8. 97-99 (In Russian).
7. Lebedev V.B. Vliyaniye razlichnykh vidov mekhanicheskikh mikropovrezhdeniy zerna pshenitsy na yego posevnyye kachestva [Influence of various types of mechanical microdamage caused to wheat grain on its sowing qualities]. *Khraneniye i pererabotka zerna*. 1969. Issue 6. 22-25 (In Russian).
8. Chazov S.A., Plaksin V.F. Puti snizheniya travmirovaniya semyan [Ways of decreasing grain damage]. *Selektsiya i semenovodstvo*. 1969. N4. 48-51 (In Russian).
9. Preobrazhenskiy P.A. Spiral'no-vintovye transportery (gibkie shneki) i smesiteli [Spiral-screw conveyors (flexible screws) and mixers]. *KKHTI im. S.M. Kirova*. 1970. 138 (In Russian).
10. Sommerfeld M., Huber N. Experimental analysis and modeling of particle-wall collisions. *International journal of multiphase flow*. 1999. Vol. 25. 1457-1489 (In English).
11. Kantak A.A., Davis R.H. Collisions of spheres with wet and dry porous layers on a solid wall. *Chemical engineering science*. 2006. 61. 417-427 (In English).
12. Ciampini D., Spelt T.K., Papini M. Simulation of interference effects in particle streams following impact with a flat surface. Part II. Parametric study and implications for erosion testing and blast cleaning. *Wear* 254 (2003). 250-264 (In English).
13. Nurullin E.G., Salakhov I.M. Travmirovaniye semyan v protravlivatelyakh pnevmomekhanicheskogo tipa [Seed damage in a pneumo-mechanical type treatment machine]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2010. N12. 21-22 (In Russian).
14. Butenko A.F., Maksimenko V.A. Analiz travmirovaniya semyan zernovykh kul'tur [Analyzing damage caused to grain seeds]. *Issledovanie i razrabotka effektivnosti tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv dlya zhivotnovodstva*. Zernograd, 2004. 75-83 (In Russian).
15. Shabanov N.I., Butenko A.F. Teoreticheskie issledovaniya protsessov vzaimodeystviya zernovki s lopatkoy rotora [Theoretical studies of grain interaction with a rotor blade]. *Izvestiya vuzov. Sev.-Kav. Region. Tekhnicheskie nauki*. 2004. N3. 108-111 (In Russian).
16. Sysolin P.V., Likkey A.V., Ivanitsa K.G. O prichinakh drobleniya zerna v katushechnykh vysevalyushchikh apparatakh seyalok [On the causes of grain crushing in reel-type seeders]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1971. N4. 24-25 (In Russian).
17. Zabrodin V.P., Butenko A.F., Sukhanova M.V., Cheptsov S.M. Issledovanie udarnogo vozdeystviya mekhanicheskogo ustroystva na semena ozimoy pshenitsy [Study of the impact of a mechanical device on winter wheat seeds]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N2. 14-19 (In Russian).
18. Ivanov A.P. Dinamika sistem s mekhanicheskimi soudareniami [Dynamics of systems with mechanical collisions]. Moscow: Mezhdunarodnaya programma obrazovaniya. 2017. 336 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 19.06.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 19.06.2019

Статья принята к публикации 18.10.2019
The paper was accepted
for publication on 18.10.2019