



ISSN 2687-1149 (Print)  
ISSN 2687-1130 (Online)

# АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 26. № 1 / 2024

Учредитель и издатель:  
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева

Адрес учредителя и издателя:  
127434, Российская Федерация,  
г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

Свидетельство о регистрации  
средства массовой информации  
ПИ № ФС77-78053  
от 06 марта 2020 г.

Основан в 2003 году

Периодичность: 6 номеров в год

Журнал «Вестник  
федерального государственного  
образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Московский государственный  
агроинженерный университет  
имени В.П. Горячкина» переименован  
и зарегистрирован с новым названием  
«Агроинженерия» 6 марта 2020 г.

Полнотекстовые версии доступны на сайте  
[https://www.elibrary.ru/title\\_profile.asp?id=8505](https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=8505)

Редактор – И.В. Мельникова  
Литературная обработка текста –  
В.И. Марковская  
Компьютерный набор и верстка –  
А.С. Лаврова  
Перевод на английский язык –  
А.Ю. Алипичев

Адрес редакции: 127434, Москва,  
Тимирязевская ул., 58, к. 336  
Тел.: +7 (499) 976-07-27  
E-mail: [agroeng@rgau-msha.ru](mailto:agroeng@rgau-msha.ru)  
<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

Отпечатано в типографии  
ООО «ЭйПиСиПублишинг»  
127550, г. Москва,  
Дмитровское ш., д. 45, корп. 1, оф. 8  
Тел.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Подписано в печать 07.02.2024 г.  
Формат 60 84/8  
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева, 2024

## Главный научный редактор

**Ерохин М.Н.**, академик РАН, д-р техн. наук, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

## Заместители главного научного редактора:

**Дорохов А.С.**, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научно-организационной работе, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

**Водяников В.Т.**, д-р экон. наук, профессор кафедры организации производства, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>

**Кубрушко П.Ф.**, чл.-корр. РАО, д-р пед. наук, профессор, заведующий кафедрой педагогики и психологии профессионального образования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>

## Члены редакционного совета:

**Алдошин Н.В.**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>

**Балабанов В.И.**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>

**Бердышев В.Е.**, д-р техн. наук, профессор, руководитель Центра учебно-методического обеспечения подготовки кадров для АПК, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

**Гайдар С.М.**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

**Девянин С.Н.**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры тракторов и автомобилей, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>

**Загинайлов В.И.**, д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будзко, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

**Казанцев С.П.**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)

**Кобозева Т.П.**, д-р с.-х. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва, Российская Федерация)

**Кравченко И.Н.**, д-р техн. наук, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

**Левшин А.Г.**, д-р техн. наук, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

**Леонов О.А.**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и управления качеством, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

**Назарова Л.И.**, канд. пед. наук, доцент кафедры педагогики и психологии профессионального образования РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

**Роберт И.В.**, академик РАО, д-р пед. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Институт стратегии развития образования РАО» (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-9303-6560>

**Сторчевой В.Ф.**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

**Худякова Е.В.**, д-р экон. наук, профессор кафедры прикладной информатики, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0001-7875-074X>

**Чумаков В.Л.**, канд. техн. наук, профессор кафедры тракторов и автомобилей, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

**Чутчева Ю.В.**, д-р экон. наук, заведующая кафедрой экономики, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-7450-5664>

**Шогенов Ю.Х.**, академик РАН, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий сектором механизации, электрификации и автоматизации ОСХН РАН, ФГБУ «Российская академия наук» (г. Москва, Российская Федерация), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

## Иностранные члены редакционного совета:

**Абдыров А.М.**, д-р пед. наук, профессор Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина (г. Нур-Султан, Казахстан), <https://orcid.org/0000-0002-6852-0235>

**Божков Снежана Ивановна**, канд. техн. наук, проф., Институт почвоведения, агротехнологий и защиты растений им. Н. Пушкарлова, Сельскохозяйственная академия (г. София, Болгария), <https://orcid.org/0000-0002-5702-4893>

**Куанто Фредерик**, профессор, Высший национальный институт аграрных наук, продовольствия и окружающей среды (АгроСюп, Дижон, Франция), <https://orcid.org/0000-0001-8541-8382>

**Маматов Ф.М.**, д-р техн. наук, профессор кафедры механизации сельского хозяйства и сервиса, Каршинский инженерно-экономический институт (г. Карши, Республика Узбекистан), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>

**Франтишек Кумхала**, профессор, председатель отделения сельскохозяйственного машиностроения и строительства Чешской академии сельскохозяйственных наук, член бюро Чешской академии сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин Университета естественных наук (Прага, Чешская Республика), <https://orcid.org/0000-0002-7782-6033>

**Хоанг Дык Куанг**, канд. хим. наук, Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр (г. Хошимин, Вьетнам), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>



**Founder and Publisher:**

**Russian State Agrarian University –  
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**

**Address of Founder and Publisher:**

49, Timiryazevskaya str., Moscow,  
127434, Russian Federation

The mass media registration certificate  
ПИ No. ФС 77-78053 of March 6, 2020

**Founded in 2003**

**Publication Frequency:**

Bimonthly

Scientific Journal "Vestnik of Federal State  
Educational Institution of Higher Professional  
Education "Moscow State Agroengineering  
University named after V.P. Goryachkin"  
[Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy  
gosudarstvenniy agroinzhenerniy universitet  
imeni V.P. Goryachkina"] was renamed  
and registered under a new title  
on March 6, 2020.

Full versions are posted on the site  
[https://www.elibrary.ru/title\\_profile.asp?id=8505](https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=8505)

**EXECUTIVE EDITORS:**

I.V. Melnikova  
V.I. Markovskaya  
A.S. Lavrova  
A. Yu. Alipichev

**Editors' office address:**

58, Timiryazevskaya str., Moscow,  
127434, Russian Federation  
Tel.: +7 (499) 976-07-27;  
E-mail: [agroeng@rgau-msha.ru](mailto:agroeng@rgau-msha.ru)  
<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

Printed by APC Publishing LLC  
office 8, 1, 45, Dmitrovskoe Ave.,  
Moscow, 127550, Russia  
Tel.: +7 (499) 976-51-84, (985) 109-44-19

Passed for printing 07.02.2024  
Format – 60 84/8  
Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment  
of Higher Education – Russian State  
Agrarian University – Moscow Timiryazev  
Agricultural Academy, 2024

*Science Editor-in-Chief*

**Mikhail N. Erokhin**, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor of the Department of Resistance of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation) <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

*Deputy Science Editor-In-Chief:*

**Aleksei S. Dorokhov**, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Director Deputy for Science and Organizational Work, Federal Agroengineering Center VIM (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

**Vladimir T. Vodyannikov**, DSc (Econ), Professor, Professor of the Department of Organization of Production, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-7111-9437>

**Petr. F. Kubrushko**, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Deputy Scientific Editor-in-Chief, Head of the Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-2142-1037>

*Members of the Editorial Board:*

**Nikolay V. Aldoshin**, DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer, Federal Agroengineering Center VIM (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>

**Viktor I. Balabanov**, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Organisation and Technologies of Irrigation and Construction Works, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>

**Viktor Ye. Berdyshev**, DSc (Eng), Professor, Head of the Centre for Education-and-Methodological Support of Human Resource Training for Agriculture, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russian Federation)

**Sergei M. Gaidar**, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Materials Science and Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

**Sergey N. Devyanin**, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>

**Vladimir I. Zaginailov**, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering named after Academician I.A. Budzko, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

**Sergey P. Kazantsev**, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

**Tamara P. Kobozeva**, DSc (Ag), Professor, Chief Research Engineer, Federal Agroengineering Center VIM (Moscow, the Russian Federation)

**Igor N. Kravchenko**, DSc (Eng), Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

**Aleksandr G. Levshin**, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Machine and Tractor Fleet Operation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

**Oleg. A. Leonov**, DSc (Eng), Professor, Head of the Metrology, Standardization and Quality Management Department, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

**Lyudmila I. Nazarova**, CSc (Ed), Associate Professor, Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-5698-6284>

**Irena V. Robert**, Full Member of the Russian Academy of Education, DSc (Ed), Professor, Chief Research Associate, the Institute for Educational Development Strategy of the Russian Academy of Education (Moscow, Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0001-9303-6560>

**Vladimir F. Storchevoy**, DSc (Eng), Professor, Head of the Process Automation and Robotisation Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

**Yelena V. Khudyakova**, DSc (Econ), Professor, Department of Applied Informatics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation)

**Valeriy L. Chumakov**, CSc (Eng), Professor, the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

**Yulia V. Chutcheva**, DSc (Econ), Head of the Department of Economics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-7450-5664>

**Yuriy Kh. Shogenov**, Full Member of the Russian Academy of Sciences DSc (Eng), Senior Research Associate, Head of the "Mechanization, Electrification and Automation" Section, Department of Agricultural Sciences, the Russian Academy of Sciences (Moscow, the Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

*International members of the Editorial Board:*

**Aytzhan M. Abdyrov**, DSc (Ed), Professor, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University (Nur-Sultan, Kazakhstan), <https://orcid.org/0000-0002-6852-0235>

**Snezhan I. Bozhkov**, PhD (Eng), Professor, Institute of Soil Science, Agrotechnology and Plant Protection named after N. Pushkarov, Agricultural Academy (Sofia, Bulgaria), <https://orcid.org/0000-0002-5702-4893>

**Frederick Cointault**, Professor, Higher National Institute of Agricultural Sciences, Food and Environment (Agrosup, Dijon, France), <https://orcid.org/0000-0001-8541-8382>

**Farmon M. Mamatov**, DSc (Eng), Professor, Professor of the Agricultural Mechanization and Service Department, Karshi Institute of Engineering and Economics (Karshi, Republic of Uzbekistan), <https://orcid.org/0000-0002-8916-4225>

**Frantisek Kumhala**, Professor, Chairman of the Agricultural Machinery and Construction Division of the Czech Academy of Agricultural Sciences, the Bureau Member of the Czech Academy of Agricultural Sciences, Head of the Department of Agricultural Machines of Czech University of Life Sciences (Prague, Czech Republic), <https://orcid.org/0000-0002-7782-6033>

**Duc Quang Hoang**, PhD (Chem), Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Centre (Ho Chi Minh, Vietnam), <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Измайлов А.Ю., Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В.</b><br>Декарбонизация мобильных энергетических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве.....              | 4  |
| <b>Федоренко В.Ф., Харитонов М.П., Смирнов И.Г., Аристов Э.Г.</b><br>Перспективы роботизации процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений .....                            | 11 |
| <b>Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Кирсанов С.В.</b><br>Разработка алгоритма адаптивного регулирования скорости вращения платформы конвейерной доильной установки типа «Карусель» .....  | 18 |
| <b>Филонов Р.Ф., Кожеевникова Н.Г., Кравченко В.Н.</b><br>Эффективная мойка доильных аппаратов .....                                                                                 | 25 |
| <b>Никитин Е.А.</b><br>Автоматическая система позиционирования колёсных роботизированных технических средств, обслуживающих кормовой стол.....                                       | 31 |
| <b>Константинов Ю.В.</b><br>Полуаналитическая модель взаимодействия дисковой секции лушпильника с неоднородной по глубине почвой .....                                               | 37 |
| <b>Фаринюк Ю.Т., Алдошин Н.В., Ганичева А.В., Ганичев А.В., Васильев А.С.</b><br>Разработка интеллектуальной информационно-консультационной службы агропромышленного комплекса ..... | 47 |
| <b>Бижаев А.В., С.Н Девяннин, Чумаков В.Л.</b><br>Энергетические и экономические параметры работы трактора с электроприводом колёс.....                                              | 53 |
| <b>Андреев С.А., Белов Д.В.</b><br>Распределенный нагрев гелия в беспилотном дирижабле сельскохозяйственного назначения .....                                                        | 59 |

### ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Мартеха А.Н., Торопцев В.В.</b><br>Влияние различных способов сушки на физико-механические свойства и всхожесть семян гороха .....                                                 | 65 |
| <b>Васильев А.А., Тихомиров Д.А., Васильев А.Н.</b><br>Исследование на компьютерной модели влияния элементов конструкции и влажности зерна на добротность СВЧ-конвективной зоны ..... | 73 |
| <b>Загинайлов В.И., Мамедов Т.А., Лештаев О.В., Манько В.Э.</b><br>Определение качества и энергоэффективности передачи электрической энергии низкого напряжения .....                 | 80 |

## CONTENTS

### FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Izmaylov A.Y., Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V.</b><br>Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production .....                                    | 4  |
| <b>Fedorenko V.F., Kharitonov M.P., Smirnov I.G., Aristov E.G.</b><br>Robotization prospects for subsurface irrigation and fertilization of plants.....                                 | 11 |
| <b>Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Kirsanov S.V.</b><br>Developing the algorithm of adaptive regulation of the platform rotation speed of the carousel conveyor milking parlour .....      | 18 |
| <b>Filonov R.F., Kozhevnikova N.G., Kravchenko V.N.</b><br>Efficient washing of milking units.....                                                                                      | 25 |
| <b>Nikitin E.A.</b><br>Automatic positioning system of wheeled robotic technical means servicing the feed table.....                                                                    | 31 |
| <b>Konstantinov Yu.V.</b><br>Semi-analytical model of the interaction of a harrow disc gang with variable-depth soil.....                                                               | 37 |
| <b>Farinyuk Yu.T., Aldoshin N.V., Ganicheva A.V., Ganichev A.V., Vasiliev A.S.</b><br>Developing an intelligent information and consulting service for the agro-industrial sector ..... | 47 |
| <b>Bizhaev A.V., Devyanin S.N., Chumakov V.L.</b><br>Energy and economic operating parameters of tractor equipped with electrically driven wheels .....                                 | 53 |
| <b>Andreev S.A., Belov D.V.</b><br>Distributed helium heating in the working space of an agricultural unmanned airship .....                                                            | 59 |

### POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Martekha A.N., Toroptsev V.V.</b><br>Influence of various types of drying on the germination and physico-mechanical properties of pea seeds .....                                                | 65 |
| <b>Vasiliev A.A., Tikhomirov D.A., Vasiliev A.N.</b><br>Study of a computer model of the influence of structural elements and grain moisture on the Q-factor of the microwave-convective zone ..... | 73 |
| <b>Zaginaylov V.I., Mamedov T.A., Leshtayev O.V., Manko V.E.</b><br>Identification of quality and energy efficiency of low-voltage power transmission .....                                         | 80 |

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372:620.92

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-4-10>**Декарбонизация мобильных энергетических средств,  
используемых в сельскохозяйственном производстве****А.Ю. Измайлов<sup>1</sup>, А.С. Дорохов<sup>2</sup>, И.А. Старостин<sup>3</sup>, А.В. Ещин<sup>4</sup>**<sup>1, 2, 3, 4</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286><sup>2</sup> [dorokhov.vim@yandex.ru](mailto:dorokhov.vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843><sup>3</sup> [starwan@yandex.ru](mailto:starwan@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107><sup>4</sup> [eschin-vim@yandex.ru](mailto:eschin-vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

**Аннотация.** С изменением климата политика лидирующих стран мира направлена на декарбонизацию – сокращение выбросов парниковых газов. Основным источником выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве являются двигатели внутреннего сгорания мобильных энергетических средств. Снизить выход токсичных выхлопных газов позволит переход на «зеленые» технологии. В связи с этим для мобильных энергетических средств актуальной является разработка новых экологических источников энергии (гибридный электропривод, водородные топливные элементы и аккумуляторные батареи). Анализ перспектив декарбонизации мобильных энергетических средств, приведённых в научных статьях и аналитических обзорах, показал, что применение гибридной схемы с дизель-генераторной установкой, накопителями энергии и электроприводом позволяет лишь частично снизить объёмы выбросов выхлопных газов. Современные водородные топливные элементы позволяют получать электрическую энергию без выделения вредных выбросов, но отличаются сложностью изготовления и дороговизной. Для мобильных энергосредств наиболее перспективными источниками энергии являются аккумуляторные батареи. В процессе своей работы они не выделяют токсичные вещества, имеют высокую энергоёмкость и ресурс. Однако при массовом применении требуется проработка вопроса их вторичного использования и утилизации. Результаты проводимых исследований позволили выявить основные тенденции развития мобильных энергетических средств. В долгосрочной перспективе декарбонизация мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения должна осуществляться за счёт создания энергетических средств малой мощности (до 50 кВт) на аккумуляторных батареях с электрической трансмиссией или средней и высокой мощности (более 50 кВт) на водородных топливных элементах с электрической трансмиссией.

**Ключевые слова:** декарбонизация мобильных энергетических средств, гибридный электропривод, водородные топливные элементы, аккумуляторные батареи

**Для цитирования:** Измайлов А.Ю., Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Декарбонизация мобильных энергетических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-4-10>

ORIGINAL PAPER

**Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production****A.Y. Izmaylov<sup>1</sup>, A.S. Dorokhov<sup>2</sup>, I.A. Starostin<sup>3</sup>, A.V. Eshchin<sup>4</sup>**<sup>1, 2, 3, 4</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia<sup>1</sup> [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286><sup>2</sup> [dorokhov.vim@yandex.ru](mailto:dorokhov.vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843><sup>3</sup> [starwan@yandex.ru](mailto:starwan@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107><sup>4</sup> [eschin-vim@yandex.ru](mailto:eschin-vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

**Abstract.** With the climate change, of the world's leading countries have been carrying out the policy of decarbonization, i.e. reducing greenhouse gas emissions. The main sources of greenhouse gas emissions in agriculture

are internal combustion engines of mobile power vehicles. The transition to “green” technologies is expected to reduce the amount of toxic exhaust gases the transition to “green” technologies. In this regard, the development of new environmentally friendly energy sources (hybrid electric drive, hydrogen fuel cells and batteries) is relevant for mobile power vehicles. An analysis of the prospects for the decarbonization of mobile energy vehicles, given in scientific articles and analytical reviews, showed that the use of a hybrid scheme with a diesel generator set, energy storage devices and an electric drive can only partially reduce exhaust emissions. Modern hydrogen fuel cells make it possible to obtain electrical energy without emitting harmful emissions, but they are difficult to manufacture and expensive. Batteries are the most promising energy sources for mobile power vehicles. They do not emit toxic substances during their operation, but have high energy intensity and resource. However, with mass use, it is necessary to study the issue of their reuse and disposal. The results of the conducted research have identified the main trends in the development of mobile power means. In the long term, the decarbonization of agricultural mobile energy vehicles should be carried out through the designing of energy vehicles of low power (up to 50 kW) on batteries with electric transmission or medium and high power (more than 50 kW) on hydrogen fuel cells with electric transmission.

**Keywords:** decarbonization of mobile energy vehicles, hybrid electric drive, hydrogen fuel cells, storage batteries

**For citation:** Izmailov A.Y., Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-4-10>

## Введение

Одними из приоритетных задач развития сельскохозяйственного производства являются создание высокопродуктивного экспортно-ориентированного сектора и достижение к 2024 г. экспорта сельскохозяйственной продукции в 45 млрд долл.<sup>1</sup> Для решения поставленных задач необходимо обеспечить стабильный рост производства конкурентоспособной высококачественной экологически чистой отечественной сельскохозяйственной продукции. Одними из основных ресурсов развития сельского хозяйства являются технологии и техника, которые позволяют повысить производительность и раскрыть весь потенциал земельных ресурсов и отечественных семян.

Мобильные энергетические средства являются основой комплекса машин для производства сельскохозяйственной продукции. Мобильные энергетические средства различных классов тяги позволяют эффективно выполнять сельскохозяйственные работы во всех отраслях – начиная с селекции и семеноводства, заканчивая животноводством.

В растениеводстве современные мобильные энергетические средства выполняют весь комплекс технологических операций: от обработки почвы и посева до уборки урожая и выполнения транспортно-технологических работ. В этой связи мобильные энергетические средства должны отвечать требованиям передовых инновационных технологий производства сельскохозяйственной продукции. На основании

перспективных технологий производства сельскохозяйственной продукции и последних прорывных научных достижений ведущими производителями и научными центрами прорабатываются различные направления их развития. Решаемые при этом задачи направлены на разработку требований к инновационным мобильным энергетическим средствам, отвечающих современным агротехнологиям и экологичности, эффективно выполняющих технологические операции. Результаты проводимых исследований позволят обосновать современные требования к массогабаритным показателям, грузоподъёмности навесных систем, мощности, производительности гидравлических систем, использованию систем автоматизированного управления и, конечно, экологичности.

**Цель исследований:** выявить основные тенденции развития мобильных энергетических средств в направлении повышения экологической безопасности сельскохозяйственного производства.

## Материалы и методы

Проведён анализ информации о прогнозах развития мировой энергетики и перспективах декарбонизации мобильных энергетических средств в научных статьях, аналитических обзорах, стратегических и прогнозных документах и электронных ресурсах. Исходная информация при проведении исследований обработана экспертно-аналитическим методом.

## Результаты и их обсуждение

В последние десятилетия экологические вопросы все больше преобладают в мировом научном сообществе. С изменением климата политика лидирующих стран мира направлена на декарбонизацию – сокращение выбросов парниковых газов, источниками

<sup>1</sup> Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации: утв. Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/564161398> (дата обращения: 13.11.2022).

которых в первую очередь выступают тепловые станции, промышленные предприятия, транспорт и сельскохозяйственное производство. Объёмы мировых выбросов парниковых газов составляют почти 34 млн т. Прогноз показывает, что в ближайшие 10 лет выбросы парниковых газов в России будут только увеличиваться, и в этой связи одной из важнейших задач является поиск новых экологических источников энергии<sup>2</sup>.

С целью снижения выбросов большинство развитых стран совместно с мировыми автопроизводителями планируют к 2030-2035 гг. полностью отказаться от использования в производимых автомобилях двигателей внутреннего сгорания<sup>3</sup> (рис. 1).

Ведущие мировые производители тракторов прорабатывают вопрос использования как гибридных схем, так и различных альтернативных источников энергии – в частности, аккумуляторных батарей и водородных топливных элементов. Основным эффектом такого перехода является повышение экологичности, энергоэффективности, производительности, надёжности, а также упрощение перехода к интеллектуальным системам управления.

Прогноз развития мировой энергетики показывает, что в ближайшие десятилетия производство энергии из ископаемых углеводородов будет сокращаться, а атомная энергетика и возобновляемые источники энергии – такие, как гидроэнергетика, ветроэнергетика, солнечная и геотермальная, будут получать более

широкое распространение и занимать большую часть энергетического рынка<sup>4</sup>. При этом данные источники энергии направлены в первую очередь на получение электрической энергии, и всё большую актуальность приобретает вопрос повышения эффективности её передачи, сохранения и использования – в частности, в мобильных средствах.

Опыт мировых лидеров в электромобилестроении показывает, что одним из путей эффективного хранения электрической энергии в транспорте является применение аккумуляторов. Так, последние разработки компании Tesla позволяют создавать компактные аккумуляторы для легкового автомобильного транспорта с запасённой энергией до 100 кВт·ч, обеспечивающие пробег более 500 км на одном заряде, при этом время зарядки на специализированной станции занимает не более 40 мин. Необходимо также отметить, что ресурс таких батарей составляет 6000 циклов зарядки-разрядки, что соответствует примерно 1,6 млн км пробега<sup>5</sup>. Рост серийного производства и постоянное совершенствование аккумуляторов позволили за последние несколько лет снизить их стоимость более чем в 1,5 раза [1].

Тенденции перехода на электропривод намечаются и в грузовом транспорте. Компания Tesla разработала электрический грузовой автомобиль, имеющий аккумуляторы с запасённой энергией 1000 кВт·ч, что позволяет ему при грузоподъёмности 36 т преодолевать на одном заряде более 800 км. Компания



Рис. 1. Декарбонизация мобильных энергосредств: мировые тенденции

Fig. 1. Decarbonisation of mobile energy vehicles: global trends

<sup>2</sup> Проект Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt\\_strategii.pdf](https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf) (дата обращения: 23.01.2023).

<sup>3</sup> Максим Авербух. Зеленая угроза // Новая газета. [Электронный ресурс]. URL: <https://novayagazeta.ru/articles/2020/07/29/86447-zelenaya-ugroza> (дата обращения: 15.12.2022).

<sup>4</sup> Quantifying the Narrowing Net-energy Pathways to a Global Energy Transition. [Электронный ресурс]. URL: <http://cms.energypolicy.co.uk/309> (дата обращения: 18.01.2023).

<sup>5</sup> Tesla official website. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tesla.com/> (дата обращения: 05.12.2022).

Hyundai разработала и организовала серийное производство грузового автомобиля на водородных топливных элементах суммарной мощностью 190 кВт. Запас в 32 кг водорода позволяет преодолевать расстояние в 400 км.<sup>6</sup>

Прогноз развития мобильных энергосредств сельскохозяйственного назначения [2-4], показывает, что в ближайшие десятилетия ДВС будет постепенно терять свои позиции, а аккумуляторные батареи и топливные элементы будут получать всё более широкое распространение (рис. 2).

Традиционные сельскохозяйственные мобильные энергетические средства имеют в своем составе ДВС и механическую трансмиссию. Такая конструкция имеет низкие показатели экологичности, энергоэффективности, надежности. Она достаточно сложна в исполнении и не позволяет эффективно реализовать системы интеллектуального управления движением, а также является источником вибрации и шума.

Одним из следующих этапов развития является переход к гибриднему приводу – использованию дизель-генераторной установки, электромеханической трансмиссии, силовой электроники и накопителей энергии – аккумуляторных батарей (рис. 3).

Вырабатываемая генератором электрическая энергия посредством блока силовой электроники распределяется между электрическими двигателями мостов и аккумуляторной батареей. Трансмиссия энергосредства с гибридным приводом может при передвижении использовать только энергию, накопленную в аккумуляторах, а при выполнении энергоёмких технологических операций – энергию, вырабатываемую генератором. Это позволяет улучшить ряд характеристик энергосредства – в частности, повысить экологичность за счёт снижения мощности ДВС, его периодического использования по мере нагрузки, а использование электромеханической трансмиссии позволяет частично реализовать интеллектуальное

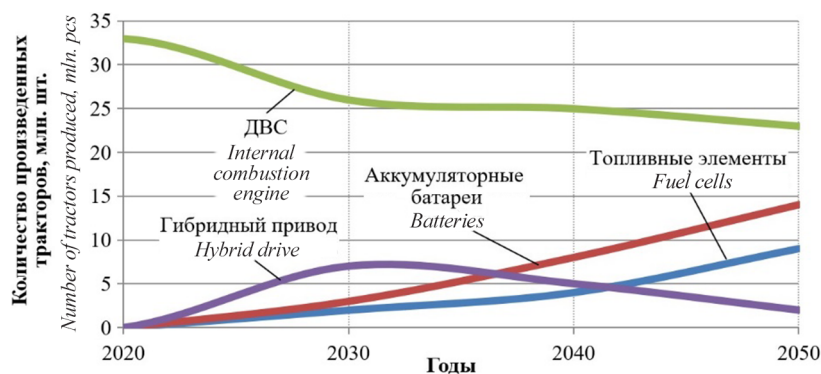


Рис. 2. Прогноз развития мобильной энергетики

Fig. 2. Forecast of mobile energy development

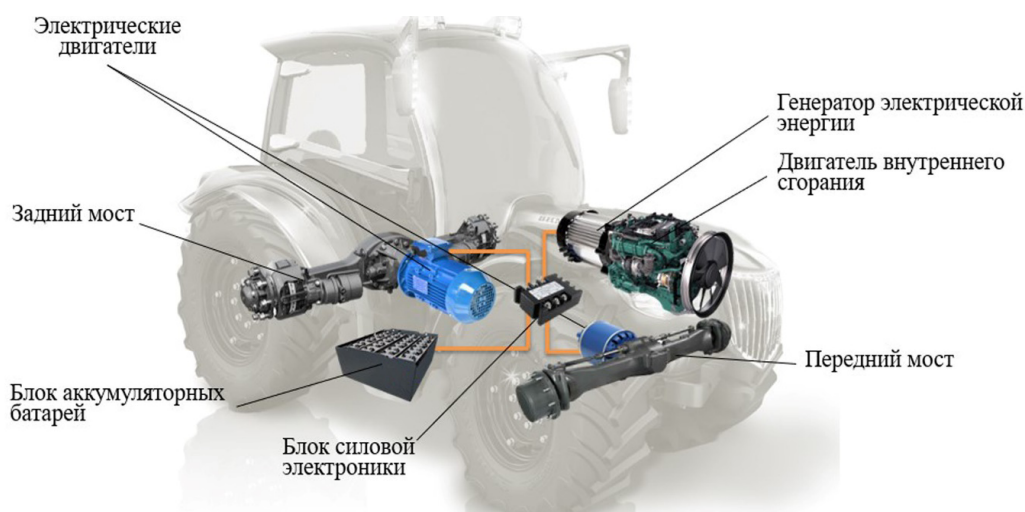


Рис. 3. Схема гибридного энергосредства с электромеханической трансмиссией

Fig. 3. Schematic diagram of a hybrid power vehicle with electromechanical power transmission

<sup>6</sup> Официальный веб сайт ООО «Хендэ Мотор СНГ». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hyundai.ru/news/per-vyj-v-mire-tyazhelyj-gruzovik-na-toplivnyh-ehlementah-hyundai-xcient-fuel-cell-napravlyatsya-v-evropu-dlya-kommercheskogo-ispolzovaniya> (дата обращения: 22.12.2022).

управление движением. Однако такая система гибридного привода остается по-прежнему достаточно сложной, не позволяет избавиться от вибраций, шумов ДВС и осложняет применение интеллектуальных систем управления.

При использовании гибридного привода с электрической трансмиссией энергия направляется от генератора или аккумуляторов непосредственно на электродвигатели, встроенные в колеса. Это позволяет более эффективно реализовать электронное управление движением энергосредства, однако сохраняются те же недостатки, связанные с использованием ДВС (рис. 4).

Ещё одним направлением является использование в качестве энергетической установки водородных топливных элементов, представляющих собой устройство для получения электрической энергии при протекании химической реакции взаимодействия водорода с кислородом, в результате чего выделяются

тепло и вода. Получаемая электрическая энергия в зависимости от нагрузки с помощью блока силовой электроники может перераспределяться между мотор-колёсами и аккумуляторной батареей. Использование водородных топливных элементов позволяет решить ряд проблем, имеющих у ДВС: это, в частности, вопрос экологичности. Однако топливные элементы являются достаточно сложными и имеют ограниченный ресурс, что снижает надёжность всего энергосредства.

Для обеспечения работы в течение полной смены необходимо иметь большой запас водорода, для чего требуется разместить на энергосредстве большое количество емкостей для хранения (рис. 5).

Использование электрических мобильных энергетических средств на аккумуляторных батареях позволяет решить все вышеобозначенные проблемы. Такая схема содержит только аккумуляторные батареи, блок силовой электроники и мотор-колёса (рис. 6).

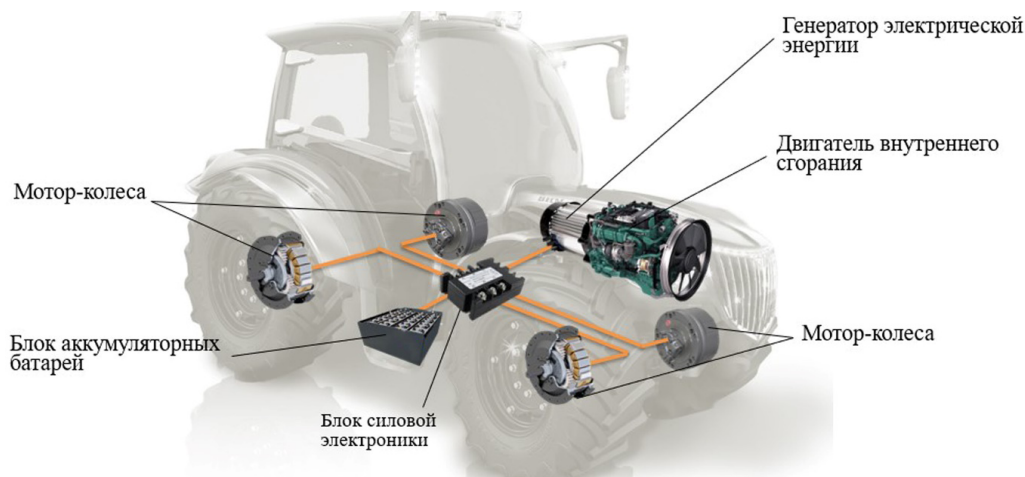


Рис. 4. Схема гибридного энергосредства с электрической трансмиссией

Fig. 4. Schematic diagram of a hydrogen fuel cell power vehicle with electric transmission

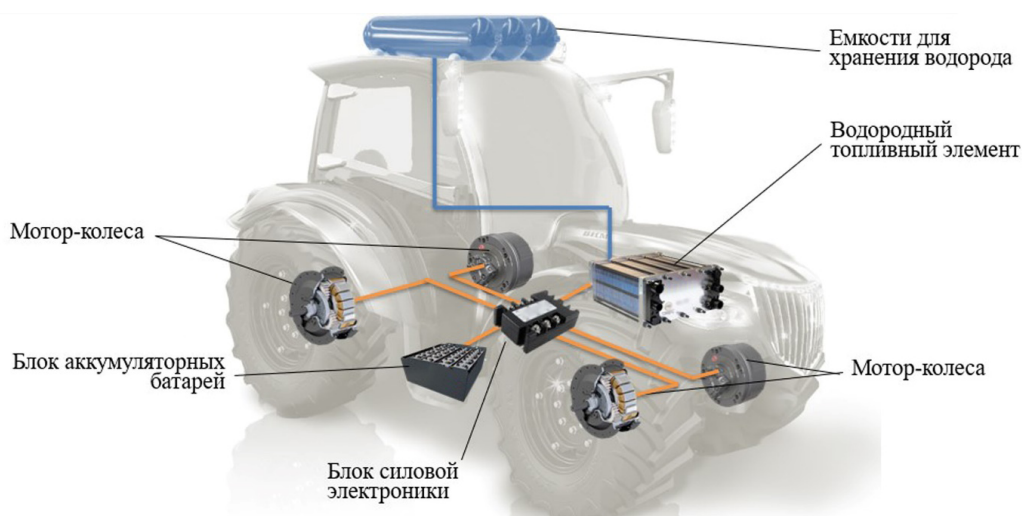


Рис. 5. Схема энергосредства на водородных топливных элементах с электрической трансмиссией

Fig. 5. Schematic diagram of a hydrogen fuel cell power vehicle with electric transmission



**Рис. 6. Схема энергосредства на аккумуляторных батареях с электрической трансмиссией**

**Fig. 6. Schematic diagram of a battery-powered vehicle with electric transmission**

В этом случае аккумуляторные батареи заряжаются от внешних источников. При выполнении технологических операций аккумуляторные батареи выдают регулируемый блоком силовой электроники уровень мощности, необходимый для питания мотор-колёс [5]. В перспективе это является одним из наиболее оптимальных решений [6].

В настоящее время реализация электрического привода мобильных энергетических средств с источниками энергии в виде водородных топливных элементов или аккумуляторных батарей существенно ограничивается отсутствием инфраструктуры, позволяющей своевременно восполнять запас энергии, и высокой стоимостью самих источников энергии.

ФНАЦ ВИМ совместно с ведущими российскими НИИ и высшими учебными заведениями проводит исследования по созданию и использованию альтернативных экологических источников энергии в мобильных энергетических средствах. В настоящее время разработаны беспилотный опрыскиватель с электрической трансмиссией, питающийся от аккумуляторных батарей, и инновационное роботизированное транспортно-технологическое средство, предназначенное для автономного выполнения различных

транспортно-технологических операций в сельскохозяйственном производстве в соответствии с заданной программой [7, 8]. Применение роботизированных мобильных энергетических средств с электрическим приводом в сельскохозяйственном производстве позволит существенно уменьшить загрязнение окружающей среды, значительно повысить производительность труда и качество выполнения технологических операций [9, 10].

### Выводы

1. Декарбонизация мобильных энергетических средств и сопутствующее снижение экологической нагрузки сельскохозяйственного производства на окружающую среду возможны только при соответствующем технико-технологическом развитии сельскохозяйственной мобильной энергетики.

2. В долгосрочной перспективе декарбонизация мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения должна осуществляться за счёт создания энергетических средств малой мощности (до 50 кВт) на аккумуляторных батареях с электрической трансмиссией или средней и высокой мощности (более 50 кВт) на водородных топливных элементах с электрической трансмиссией.

### Список литературы

1. Jae-Woong Byun. The Internal and External Analysis of Tesla Motors' Competitiveness. *Journal of Distribution and Management Research*. 2016;19(4):63-73. <https://dx.doi.org/10.17961/jdmr.19.4.201608.63>
2. Ghobadpour A., Boulonb L., Mousazadeha H., Malva-jerdic A.S., Rafieea S. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems. *Energy Procedia*. 2019;162:4-13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.002>
3. Huisong Gao, Jinlin Xue. Modeling and economic assessment of electric transformation of agricultural tractors fueled with diesel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;39:100697. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100697>

### References

1. Jae-Woong Byun. The Internal and External Analysis of Tesla Motors' Competitiveness. *Journal of Distribution and Management Research*. 2016;19(4):63-73. <https://dx.doi.org/10.17961/jdmr.19.4.201608.63>
2. Ghobadpour A., Boulonb L., Mousazadeha H., Malva-jerdic A.S., Rafieea S. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems. *Energy Procedia*. 2019;162:4-13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.002>
3. Huisong Gao, Jinlin Xue. Modeling and economic assessment of electric transformation of agricultural tractors fueled with diesel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;39:100697. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100697>

4. Jacek Caban, Jan Vrabel, Branislav Šarkan, Janusz Zarajczyk and Andrzej Marczuk. Analysis of the market of electric tractors in agricultural production. *MATEC Web Conf.* 2018;244:03005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403005>

5. Magalhaes R.O., Assunção M.V., Mendes Santos J.P., Silva E.V., Ferreira Junior L.G., Magalhaes R.R., Ferreira D.D. Review on applications of electric ehicles in the countryside. *Ciencia Rural.* 2017;47(7):e20161076 <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161076>

6. Юфереv Л.Ю., Споров А.П., Гусаров В.А., Писарев Д.Ю. Тенденции развития сельскохозяйственной электрифицированной мобильной техники // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 1(46). С. 3-8. EDN: SGJMPH

7. Мирзаев М.А. Проектирование автономного полевого робота для дифференцированного внесения агрохимических средств // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, № 4(45). С. 131-136. EDN: NBJZNR

8. Споров А.П., Писарев Д.Ю., Парахнич А.С. Электропривод транспортного средства сельскохозяйственного назначения // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 3. С. 48-54. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54>

9. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 6-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

10. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С., Самсонов В.А. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // Техника и оборудование для села. 2021. № 2 (284). С. 2-7. EDN: WGULNO

#### Информация об авторах

**Андрей Юрьевич Измайлов<sup>1</sup>**, академик РАН, д-р техн. наук, директор; [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>

**Алексей Семенович Дорохов<sup>2</sup>**, академик РАН, д-р техн. наук, заместитель директора; [dorokhov.vim@yandex.ru](mailto:dorokhov.vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

**Иван Александрович Старостин<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; [starwan@yandex.ru](mailto:starwan@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

**Александр Вадимович Ещин<sup>4</sup>**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник; [eschin-vim@yandex.ru](mailto:eschin-vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

<sup>1,2,3,4</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский пр-д, 5

#### Вклад авторов

А.Ю. Измайлов – руководство исследованием, концептуализация;

А.С. Дорохов – концептуализация, методология, администрирование проекта;

И.А. Старостин – формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.В. Ещин – проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 29.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 26.05.2023; принята к публикации 23.08.2023

4. Jacek Caban, Jan Vrabel, Branislav Šarkan, Janusz Zarajczyk and Andrzej Marczuk. Analysis of the market of electric tractors in agricultural production. *MATEC Web Conf.* 2018;244:03005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403005>

5. Magalhaes R.O., Assunção M.V., Mendes Santos J.P., Silva E.V., Ferreira Junior L.G., Magalhaes R.R., Ferreira D.D. Review on applications of electric ehicles in the countryside. *Ciencia Rural.* 2017;47(7):e20161076 <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161076>

6. Yuferev L.Yu., Sporov A.P., Gusarov V.A., Pisarev D.Yu. Trends in the Development of Agricultural Electrified Mobile Equipment. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture.* 2022;69(1):3-8.

7. Mirzaev M.A. Design of an Autonomous Field Robot for Differentiated Application of Agrochemical Agents. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture.* 2021;68(4):131-136.

8. Sporov A.P., Pisarev D.Yu., Parakhnich A.S. Electric Drive for an Agricultural Vehicle. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2021;15(3):48-54. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54>

9. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2021;15(4):6-10. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

10. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S., Samsonov V.A. Priority areas of scientific and technical development of the domestic tractor industry. *Machinery and Equipment for Rural Area.* 2021;2(284):2-7. (In Rus.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-2-7>

#### Author Information

**Andrey Y. Izmaylov<sup>1</sup>**, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Director; [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>

**Aleksey S. Dorokhov<sup>2</sup>**, RAS Corresponding Member, DSc (Eng); [dorokhov.vim@yandex.ru](mailto:dorokhov.vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

**Ivan A. Starostin<sup>3</sup>**, CSc (Eng), Senior Research Engineer; [starwan@yandex.ru](mailto:starwan@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

**Aleksandr V. Eshchin<sup>4</sup>**, CSc (Eng), Senior Research Engineer; [eschin-vim@yandex.ru](mailto:eschin-vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

<sup>1,2,3,4</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

#### Author Contribution

A.Y. Izmaylov – research supervision, conceptualization,

A.S. Dorokhov – conceptualization, methodology, project administration,

I.A. Starostin – formal analysis, research, original draft preparation, finalizing (reviewing) and editing the draft

A.V. Eshchin – investigation, original draft preparation, finalizing (reviewing) and editing the draft.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 29.03.2023; revised 26.05.2023; accepted 23.08.2023

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.816.34:626.844:004.896

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-11-17>

## Перспективы роботизации процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений

*В.Ф. Федоренко<sup>1</sup>, М.П. Харитонов<sup>2✉</sup>, И.Г. Смирнов<sup>3</sup>, Э.Г. Аристов<sup>4</sup>*<sup>1, 2, 3, 4</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463><sup>2</sup> [kharitonov.maksim@bk.ru](mailto:kharitonov.maksim@bk.ru); <https://orcid.org/0009-0008-6286-2374><sup>3</sup> [rashn-smirnov@yandex.ru](mailto:rashn-smirnov@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9992-1261><sup>4</sup> [mgp1947@mail.ru](mailto:mgp1947@mail.ru)

**Аннотация.** При внутрипочвенном поливе и внесении удобрений ручные и механизированные гидробуры характеризуются большими трудозатратами и невысоким качеством выполнения технологических операций. Оптимизация и совершенствование процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений с использованием роботизированных технологий позволят обеспечить более эффективное и точное воздействие на корневую систему растений. С целью поиска перспектив и возможностей роботизации процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений авторами проведён анализ текущих тенденций и предпосылок роботизации процесса внутрипочвенного полива. На основании научных статей, патентов и технических отчётов исследованы технические аспекты и предложена принципиальная схема автоматизированного модуля роботизированной платформы для внутрипочвенного полива и подкормки растений. Установленный на роботизированной платформе гидробур оборудован средствами технического зрения для картографирования и автономного ориентирования в саду, а также пневмоцилиндром, что позволяет использовать его на тяжёлых почвах, осуществлять заглубление с помощью воздуха. Роботизированное устройство может в течение продолжительного времени по заданному алгоритму точно и аккуратно вносить воду и удобрения. Его применение позволяет снизить трудозатраты и повысить качество внутрипочвенного полива и подкормки. Применение роботизированных гидробуров расширяет возможности подпочвенного очагового воздействия на корневую систему растений, способствует улучшению климата почвы, формированию архитектуры корневой системы.

**Ключевые слова:** внутрипочвенный полив и подкормка растений, гидробур, роботизация внутрипочвенного полива и подкормки растений, роботизированный гидробур, автоматизированный модуль, качество внутрипочвенного полива и подкормки

**Для цитирования:** Федоренко В.Ф., Харитонов М.П., Смирнов И.Г., Аристов Э.Г. Перспективы роботизации процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 11-17. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-11-17>

## ORIGINAL PAPER

## Robotization prospects for subsurface irrigation and fertilization of plants

*V.F. Fedorenko<sup>1</sup>, M.P. Kharitonov<sup>2</sup>, I.G. Smirnov<sup>3</sup>, E.G. Aristov<sup>3</sup>*<sup>1, 2, 3, 4</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia<sup>1</sup> [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463><sup>2</sup> [kharitonov.maksim@bk.ru](mailto:kharitonov.maksim@bk.ru); <https://orcid.org/0009-0008-6286-2374><sup>3</sup> [rashn-smirnov@yandex.ru](mailto:rashn-smirnov@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9992-1261><sup>4</sup> [mgp1947@mail.ru](mailto:mgp1947@mail.ru)

**Abstract.** In subsurface irrigation and fertilization, manual and mechanized hydraulic drills have the disadvantages of high labor costs and low quality of technological operations. The optimization and improvement of subsurface irrigation and fertilization using robotic technologies will provide more effective and precise impact on the root system of plants. To search for prospects and possibilities for robotizing the processes of subsurface irrigation and fertilization, the authors analyzed current trends and prerequisites for robotizing the process of subsurface irrigation. Based on scientific articles, patents, and technical reports, the authors investigated technical aspects and proposed a schematic

diagram of an automated module of a robotic platform for subsurface irrigation and fertilization. Mounted on a robotic platform, the hydraulic drill is equipped with technical vision equipment for mapping and autonomous navigation in the garden, as well as a pneumatic cylinder to use the drill on heavy soils and deepen it with the use of air when necessary. The robotic device can strictly perform the given algorithm for a long time, applying water and fertilizers in a precise and accurate way. Its use can reduce labor costs and improve the quality of subsurface irrigation and fertilization. The use of robotic hydraulic drills expands the possibilities of subsurface local influence on the root system of plants, improves the soil climate, forms the architecture of the root system.

**Key words:** subsurface irrigation and fertilization of plants, hydraulic drill, robotization of subsurface irrigation and fertilization of plants, robotic hydraulic drill, automated module, quality of subsurface irrigation and fertilization

**For citation:** Fedorenko V.F., Kharitonov M.P., Smirnov I.G., Aristov E.G. Robotization prospects for subsurface irrigation and fertilization of plants. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):11-17. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-11-17>

## Введение

Внутрипочвенный полив и подкормка растений обеспечивают оптимальные условия для роста и развития культурных растений. Однако существующие методы внутрипочвенного воздействия, основанные на ручных и механизированных гидробурах, характеризуются высокими физическими нагрузками на операторов, ограниченной точностью позиционирования рабочих органов и трудностями в формировании подходов индивидуального ухода за растениями.

Поиск путей оптимизации и совершенствования процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений с использованием роботизированных технологий позволит обеспечить более эффективное и точное воздействие на корневую систему растений.

**Цель исследований:** анализ перспектив и возможностей роботизации процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений.

## Материалы и методы

Материалами исследования послужили данные научных статей, патентов и технических отчетов, касающихся устройств для внутрипочвенного полива и внесения удобрений. Выявлялись текущие тенденции и предпосылки для роботизации внутрипочвенных процессов в сельском хозяйстве.

## Результаты и их обсуждение

Анализ существующих технологий внутрипочвенного полива и подкормки растений является комплексной задачей, обширность типов устройств обусловлена многообразием задач для разных отраслей. В данных исследованиях авторы сосредоточились на технологиях, использующих устройства с механическим заглублением типа гидробур, расширяющих спектр технологических операций воздействия на корневую систему растений.

Известна технология внутрипочвенного внесения сжатого воздуха в почву одновременно с водой [1],

которая активизирует процесс аэрации, улучшает структуру почвы, способствует открытию имеющихся и созданию в почве новых каналов поступления влаги и кислорода [2].

Для малых фермерских хозяйств или дачных участков, не требующих большого объема удобрений и полива, эффективным является ручной гидробур [3], выполненный в виде сварной трубчатой конструкции [4], подсоединенный через шланги к насосной станции [5], работающей от вала отбора мощности трактора [6]. Он отличается низкой стоимостью, простотой исполнения, гибкостью и меньшим риском повреждения корней растений [7].

Ещё одним представителем данной технологии является автономное переносное устройство, предназначенное для внутрипочвенного внесения удобрений, воды и пестицидов, имеющее характерную конструктивную особенность – бак с рабочей жидкостью ранцевого типа. Подача рабочей жидкости может выполняться ручным поршневым насосом [8] или с помощью погружного насоса, работающего от аккумуляторной батареи<sup>1</sup>. Процесс заглубления осуществляется путём применения мускульной силы – надавливания на рукоятки или на ножные упоры. Данное устройство представляет собой ресурсосберегающую и компактную систему, позволяющую операторам вносить удобрение, воду и пестициды в корнеобитаемый слой почвы на глубину 250...400 мм и расходовать до 300 мл на один прокол. Главным недостатком такого устройства является необходимость ношения бака массой более 20 кг, что значительно ухудшает условия труда, а также сокращает подвижность оператора и ограничивает глубину прокола.

<sup>1</sup> ARBORJET | ECOLOGEL ACCUFLO SOIL INJECTOR ISD. [Электронный ресурс]. URL: <https://sportsfieldmanagementonline.com/2021/04/20/arborjet-ecologel-accuflo-soil-injector-isd/12602/> (дата обращения: 02.09.2023).

Общими недостатками ручных гидробуров и аналогичных устройств являются большие трудозатраты, утомляемость, которую испытывает при этом работник, а следовательно, некачественное выполнение операций: непогружение гидробура на требуемую глубину, недостаточное внесение жидкости или удобрений, повреждение корней растений и т.д.

Наиболее компактным решением проблемы утомляемости, которую приходится испытывать человеку, являются самоходные [9] и ручные тележки [10] с механизированным заглублением рабочих органов в почву. Данный класс устройств конструктивно отличается наличием, как правило, трехколёсного шасси с задним управляемым колесом, в центральной части располагаются основные силовые агрегаты и баки с рабочей жидкостью, фронтальная часть состоит из линейно расположенных буров, которые одновременно или поочередно заглубляются в почву, в задней части располагается оператор.

Недостатками таких устройств являются низкая проходимость ввиду малого агропросвета, ограниченный объём баков с рабочей жидкостью, а для ручных тележек – необходимость перемещения устройства по обрабатываемому участку, что может являться физически трудоёмким процессом. Данные недостатки являются серьёзным ограничением для применения таких устройств в крупных хозяйствах.

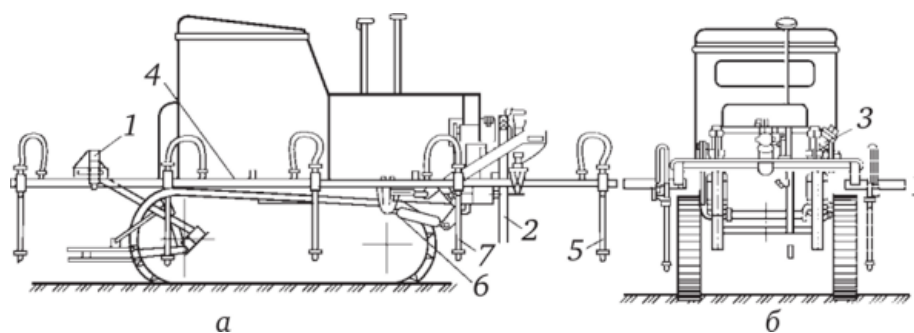
Для крупных ферм полностью механизированные или автоматизированные системы внутрипочвенного внесения удобрений и полива более эффективны и экономически выгодны. С целью механизации процессов очагового внутрипочвенного внесения удобрений разрабатывались устройства, устанавливаемые

на тракторы [11] и на грузовые автомобили [12], представляющие собой рамочную конструкцию [13], на продольных штангах которой располагались гидробуры [14]. Принцип их работы рассмотрим на примере механизированного агрегата АПВ-10-2 (рис. 1), предназначенного для образования лунок при посадке виноградных саженцев или черенков на участках с подготовленным плантажом<sup>2</sup>. Агрегат монтируют на тракторах ДТ-5Ц, ДТ-75 и Т-38.

Технологическая операция включает в себя последовательность таких этапов:

1. Установка машины вдоль первого междурядья на размеченном участке.
2. Совмещение буров с отметками мест посадки (колышками).
3. Включение гидрораспределителя трактора, опускание переднего и заднего поперечных брусьев, открытие трехходового крана и подача воды к гидробурам в момент касания наконечников почвы.
4. Опускание гидробуров в почву и бурение лунок на определённую глубину с помощью размыва – гидробурения.
5. Подъём переднего и заднего брусьев с помощью гидроцилиндров, автоматическое перекрытие подачи воды трехходовым краном и переезд агрегата по междурядью на следующую позицию.

Преимуществом использования агрегата АПВ-10-2 является исключение тяжёлого труда бурильщика, повышение производительности и точности при посадке саженцев винограда. Однако использование агрегата АПВ-10-2 требует определённых навыков и квалификации тракториста, а также тщательной подготовки почвы для посадки саженцев.



**Рис. 1. Схема гидробурового агрегата АПВ-10-2:**

а – вид сбоку; б – вид с торца

- (1 – передние и задние брусья; 2 – направляющие; 3 – насос; 4 – водораспределительные трубы; 5 – гидробур; 6 – механизм подъёма и погружения гидробура; 7 – выносной гидроцилиндр)

**Fig. 1. Diagram of the APV-10-2 hydraulic drilling unit:**

a – side view; b – end view

- (1 – front and rear bars; 2 – guides; 3 – pump; 4 – water distribution pipes; 5 – hydraulic drill; 6 – mechanism for lifting and immersing the hydraulic drill; 7 – remote hydraulic cylinder)

<sup>2</sup> Зармаев А.А. Виноградарство с основами технологии первичной переработки винограда: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2020. 683 с. URL: <https://urait.ru/bcode/446685> (дата обращения: 02.09.2023).

Главный его недостаток – позиционность работы. На площади каждого гектара приходится делать 250...300 остановок, что утомляет тракториста и ускоряет износ механизмов управления трактором. Кроме того, по причине неровностей рельефа заглубление буров в почву является неравномерным, что отрицательно сказывается на приживаемости саженцев.

Проблему позиционной работы можно решить с помощью устройства с ротационным типом рабочего органа [15]. При движении трактора колесо, присоединённое к напорной системе подачи воды, вращаясь, последовательно погружает в почву удерживаемые в вертикальном положении гидробуры (рис. 2). При этом их клапаны открываются, и жидкость поступает в почву [16]. Но такое устройство является неспособным быстро и без трудозатрат обеспечить универсальность машины к различным типам посадок, так как шаг между лунками зависит от диаметра колеса, на котором установлены гидробуры. Широкого применения такие машины не нашли, поэтому предлагается исключить человека из данной технологической операции, применив роботизированные технологии.

Роботизированный гидробур можно настроить на внутрипочвенный полив и подкормку определённых культурных растений на больших площадях и в любое время суток. Без применения трудовых ресурсов он может точно и аккуратно внести воду и удобрения, снизить воздействие на почву и корни растений, при этом сократив время выполнения операции и увеличив производительность.

Применение в сельском хозяйстве роботизированных гидробуров и методов внутрипочвенного полива и подкормки может привести к снижению трудозатрат, повышению качества урожая и экологической устойчивости.

Общая технология гидробурения скважин для посадки или подкормки и полива остается такой же: размыв поверхности почвы и заглубление остроконечной трубки. Однако процесс заглубления может выполняться с помощью пневмоцилиндра с автоматизированным управлением.

Роботизированный гидробур, оснащённый пневмоцилиндром, способен развивать большее усилие, чем человек, что открывает возможность использования гидробура не только на тяжёлых почвах, но и при осуществлении заглубления без использования жидкости с экономией при этом важного ресурса, повышая тем самым экономическую эффективность технологии. Роботизированное устройство строго выполняет заданный алгоритм и обеспечивает качественное выполнение технологической операции в течение всего рабочего времени.

Для перемещения между поливаемыми растениями гидробур предлагается устанавливать на роботизированной платформе, оборудованной средствами технического зрения для картографирования и автономного ориентирования в саду (рис. 3).

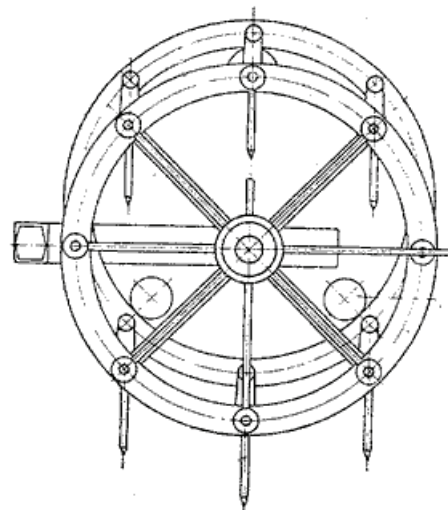


Рис. 2. Рабочий орган машины для инъекционного подпочвенного орошения

Fig. 2. Working tool of the machine for injection-type subsurface irrigation

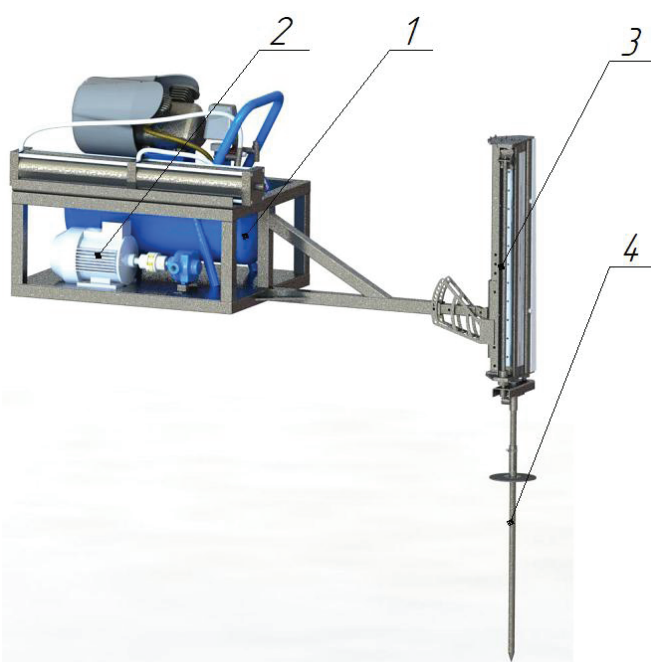


Рис. 3. Общий вид роботизированного модуля – пневмогидробур:

1 – компрессор; 2 – электродвигатель и насос;  
3 – стрела с пневмоцилиндром и линейными направляющими;  
4 – остроконечная трубка

Fig. 3. General view of the robotic module – pneumatic hydraulic drill:

1 – compressor; 2 – electric motor and pump;  
3 – boom with pneumatic cylinder and linear guides;  
4 – pointed tube

**Принцип действия устройства.** При включении компрессора 1 воздух под давлением из ресивера, посредством пневматических рукавов поступает в одну из рабочих полостей пневмоцилиндра 3, что приводит к заглублению остроконечной трубы гидробура. После заглубления включается гидравлический насос 2 пневмогидробура, посредством рукавов высокого давления рабочая жидкость поступает в остроконечную трубу 4, и далее – в почву. Происходит процесс прикорневого полива или подкормки. После окончания полива (подкормки) электродвигатель 2 прекращает работу, включается компрессор 1, воздух под давлением поступает

в другую область пневмоцилиндра 3, при этом происходит извлечение остроконечной трубы 4 из почвы. Управление включения и отключения компрессора, а также включения и отключения электродвигателя насоса осуществляется электронным блоком управления посредством датчиков, установленных в разрыве гидравлических и пневматических рукавов.

Для оценки эффективности роботизации процесса внутрипочвенного полива и подкормки сравним технические характеристики ручных гидробуров, механизированных агрегатов и автоматизированного модуля (табл.).

Таблица

## Сравнение гидробуров

Table

## Comparison of hydraulic drills

| Техническая характеристика<br><i>Technical characteristics</i>                                        | Гидробур / Hydraulic drill                                                                             |                                                                                                        |                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                       | Ручной ГБ-35-28<br><i>Manual GB-35-28</i>                                                              | Механический АПВ-10-2<br><i>Mechanical APB-10-2</i>                                                    | Роботизированный<br><i>Robotic</i>                                                                                                        |
| Производительность за 1 ч чистой работы, га<br><i>Productivity for 1 hour of net operation, ha</i>    | 0,40                                                                                                   | 0,46                                                                                                   | 0,25                                                                                                                                      |
| Радиус поворота агрегата, м<br><i>Turning radius of the unit, m</i>                                   | 3,5...4,5                                                                                              | 5,5                                                                                                    | 5,0                                                                                                                                       |
| Количество рядков при посадке<br><i>Number of rows in planting</i>                                    | 2...6                                                                                                  | 2                                                                                                      | 1                                                                                                                                         |
| Ширина междурядий, м<br><i>Row spacing width, m</i>                                                   | 1,75...2,50                                                                                            | 1,80...2,50                                                                                            | 2,25...3,00                                                                                                                               |
| Гидробуров в агрегате<br><i>Number of hydraulic drills in the unit</i>                                | 2...6                                                                                                  | 6...10                                                                                                 | 1                                                                                                                                         |
| Тип / Type                                                                                            | С запорным клапаном<br><i>With a shut-off valve</i>                                                    | С упорной шайбой<br><i>With a stop washer</i>                                                          | Электромагнитный клапан с автоматизированным управлением<br><i>Solenoid valve with automated control</i>                                  |
| Глубина лунки, см / Depth of the hole, cm                                                             | 40...60                                                                                                | 40...60                                                                                                | 30...60                                                                                                                                   |
| Диаметр лунки, см / Well diameter, cm                                                                 | 3,7...4,0                                                                                              | 3,7...4,0                                                                                              | 3,7...4,0                                                                                                                                 |
| Давление воды в системе, кГ/см <sup>2</sup><br><i>Water pressure in the system, kG/cm<sup>2</sup></i> | 3,5                                                                                                    | 3,0...4,0                                                                                              | 4,1                                                                                                                                       |
| Расход воды в одну лунку, л<br><i>Water flow rate per hole, litre</i>                                 | 2,5...3,0                                                                                              | 2,5...4,0                                                                                              | 2...3                                                                                                                                     |
| Способ заглубления<br><i>Method of digging</i>                                                        | Мускульная сила<br><i>Muscular force</i>                                                               | Гидроцилиндром<br><i>Hydraulic cylinder</i>                                                            | Пневмоцилиндром<br><i>Pneumatic cylinder</i>                                                                                              |
| Количество операторов<br><i>Number of operators</i>                                                   | 3...7                                                                                                  | 1                                                                                                      | 0...1                                                                                                                                     |
| Выполняемые операции<br><i>Operations performed</i>                                                   | Полив, подкормка, бурение посадочных лунок<br><i>Irrigation, fertilization, planting hole drilling</i> | Полив, подкормка, бурение посадочных лунок<br><i>Irrigation, fertilization, planting hole drilling</i> | Полив, подкормка, бурение посадочных лунок, внесение воздуха<br><i>Irrigation, fertilization, planting hole drilling, air application</i> |

Поскольку разрабатываемый модуль способен выполнять различные операции, в том числе создание посадочных лунок, то сравним значения производительности модуля с ручным гидробуром ГБ 35-28 и агрегатом АПВ-10-2 по операции бурения посадочных лунок.

Сравнение технических характеристик роботизированного гидробура с ручным и агрегатом АПВ-10-2 позволило выявить меньшую производительность роботизированного гидробура (0,25 га/ч) в сравнении с механизированным (0,46 га/ч) и ручным устройствами (0,4 га/ч). Но следует учитывать, что модуль представляет собой опытный образец с одним рабочим органом. В рамках производственного решения возможно увеличение числа буров до двух или четырёх, что увеличит производительность и сделает этот модуль конкурентоспособным по данному показателю.

В отличие от ручных и механических гидробуров роботизированный гидробур оснащён компрессором для управления пневмоцилиндром. Сжатый воздух можно также использовать для впрыскивания в почву и создания системы каналов, способствующих более эффективному распространению рабочей жидкости. Пневмоцилиндр обеспечивает высокую скорость выдвижения штока и необходимое для заглубления усилие. Это позволяет быстрее заглубляться

при небольшом объёме рабочей жидкости, требуемой на размыв. Для роботизированного гидробура достаточно одного оператора для наблюдения и дистанционного управления, однако он может управляться и автономно. Это существенно снижает трудозатраты по сравнению с ручным и механическим гидробурами и улучшает условия труда.

## Выводы

1. Гидробуры расширяют возможность подпочвенного очагового воздействия на корневую систему растений, улучшения климата почвы, формирования архитектуры корневой системы и т.д.

2. Ручной гидробур требует значительных физических усилий, что негативно сказывается на условиях труда, качестве выполнения операций и производительности. Механизированные устройства внутрипочвенного инъектирования менее универсальны ввиду сложности конструкции и неблагоприятных условий труда.

3. Разработанный роботизированный гидробур, оснащённый компрессором для впрыскивания сжатого воздуха в почву, способен качественно выполнять полив и подкормку растений. Дооборудование автоматизированного модуля рабочими органами повысит общую производительность.

## Список литературы

1. Селиванов В.Г., Аристов Э.Г., Краховецкий Н.Н. Технология и технические средства для реализации инновационного метода посадки и полива виноградников и плодово-ягодных культур // Материалы XI Международной научно-практической интернет-конференции «Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК» (п. Правдинский, 5-7 июня 2019 г.). Правдинский: Росинформагротех, 2019. С. 199-206. EDN: WMCKGT
2. Федоренко В.Ф., Селиванов В.Г., Аристов Э.Г., Краховецкий Н.Н. Исследование инновационной технологии подпочвенного орошения при возделывании плодово-ягодных культур и виноградников // Техника и оборудование для села. 2019. № 12 (270). С. 17-22. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-12-17-22>
3. Пневмогидробур: Патент RU2740805 C2, МПК A01C23/02, A01C23/00, A01G 29/00 / В.Ф. Федоренко, Э.Г. Аристов, Н.Н. Краховецкий, В.Г. Селиванов; заявл. 04.04.2019; опубл. 21.01.2021. EDN: NJRREB
4. Пневмогидробур с защитным устройством: Патент RU2802309 C1, МПК A01C23/02, A01C5/04, A01G 29/00 / Э.Г. Аристов, Р.А. Филиппов, В.Ф. Федоренко, И.Г. Смирнов, Д.О. Хорт, М.П. Харитонов; заявл. 15.02.2023; опубл. 24.08.2023. EDN: SKUCLL
5. Ручное орудие для посадки черенков винограда: а.с. SU357903 A1, МПК A01C5/02, A01C11/04 / Б.И. Корсунский; заявл. 22.04.1971; опубл. 03.11.1972. EDN: KDALXV
6. Гидробур: а.с. SU1540696 A1, МПК A01C23/02 / В.А. Гужун; заявл. 23.11.1987; опубл. 07.02.1990. EDN: OVEIPS
7. Гидробур: а.с. SU1407430 A1, МПК A01C23/02 / В.Ф. Косенко, С.К. Чобану; заявл. 14.07.1986; опубл. 23.05.1988. EDN: NHVZBE

## References

1. Selivanov V.G., Aristov E.G., Krakhovetsy N.N. Technology and technical means for implementing an innovative method of planting and irrigating vineyards and fruit-berry crops. Scientific and Information Support for Innovative Development of the Agricultural Complex: *Proceedings of the XI International Scientific and Practical Internet Conference, Pravdinsky, June 05-07, 2019*. Pravdinsky: Russian Scientific Research Institute for Information and Techno-Economic Research in Engineering and Technical Support for the Agro-Industrial Sector, 2019:199-206. (In Rus.)
2. Fedorenko V.F., Selivanov V.G., Aristov E.G., Krakhovetsy N.N. Research of innovative technology of subsoil irrigation in the cultivation of fruit crops and vineyards. *Equipment and Machinery for Rural Area*. 2019;12:17-22. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-12-17-22> (In Rus.)
3. Fedorenko V.F., Aristov E.G., Krakhovetsy N.N., Selivanov V.G. Pneumatic Hydrodrill: Patent No. 2740805 C2 Russian Federation, IPC A01C23/02(2006.01), A01C23/00(2006.01), A01G 29/00(2006.01). 2021. (In Rus.)
4. Aristov E.G., Filippov R.A., Fedorenko V.F., Smirnov I.G., Khort D.O., Kharitonov M.P. Pneumatic Hydrodrill with Protective Device: Patent No. 2802309 C1 Russian Federation, IPC A01C23/02(2006.01), A01C5/04 (2006.01), A01G 29/00(2006.01). 2023. (In Rus.)
5. Korsunskiy B.I. Hand Tool for Planting Grape Cuttings: Patent № 357903 A1 Soviet Union, IPC A01C5/02(1995.01), A01C11/04(1995.01). 1972. (In Rus.)
6. Guzun V.A. Hydrodrill: Patent No 1540696 A1 Soviet Union, IPC A01C23/02 (2006.01). 1990. (In Rus.)
7. Kosenko V.F., Chobanu S.K. Hydrodrill: Patent No.1407430 A1 Soviet Union, IPC A01C23/02 (1985.01). 1988. (In Rus.)
8. Mussett H.L., Hanggi G.J. Soil injection apparatus: Patent № US3148643A United States of America,

8. Mussett H.L., Hanggi G.J. Soil injection apparatus: Patent № US3148643A United States of America, IPC A01C23/026 (1961.11). 1964. URL: <https://patents.google.com/patent/US3148643A/en?q=US3148643A+>
9. De Lany T., Andros M.J., Stapp G.J., Klippenstein T. Soil injection system and method: Patent № US10098276B2 United States of America, US15/425 (2017.02). 2018. <https://patents.google.com/patent/US10098276B2/en?q=US10098276B2+>
10. Collins W.C. Injector for soil treating liquids: Patent № US4034686A United States of America, US05/634 (1975.11). 1977. URL: <https://patents.google.com/patent/US4034686A/en?q=US4034686A+>
11. Устройство для внесения жидких веществ в почву: а.с. SU360021 A1, МПК A01C23/02 / С.А. Доброхотов, А.Я. Каинсон, В.Н. Пигур, Н.Е. Сорокин, А.А. Сосинов; заявл. 29.12.1969; опубл. 28.11.1972. EDN: MYQGT0
12. Barton J.R. Apparatus for injecting materials into the earth: Patent № US2789522A United States of America, AO1C23/02 (1952.11). 1957. URL: <https://patents.google.com/patent/US2789522A/en?q=US2789522A+>
13. Агрегат для внесения жидкостей в почву: а.с. SU927164 A1, МПК A01C23/02 / А.Я. Каинсон, Н.Е. Сорокин, В.П. Кустарев, Ю.С. Разыграев; заявл. 21.10.1977; опубл. 15.05.1982. EDN: JCJNUX
14. Устройство для внесения жидких удобрений в почву: а.с. SU982569 A1, МПК A01C23/02 / В.А. Бондарев, М.П. Ефименко; заявл. 21.08.1981; опубл. 23.12.1982. EDN: ЕКСРКІ
15. Peterson M.L. Chemical applicator: Patent № US3602166A United States of America, AO1C23/02 (1969.06). 1971. URL: <https://patents.google.com/patent/US3602166A/en?q=US10098276B2+>
16. Рабочий орган машины для инъекционного подпочвенного орошения: а.с. SU198819 A1, A01G 29/00 / Т.Я. Гуделас; заявл. 17.01.1966; опубл. 28.06.1967. EDN: RPEFIE
- IPC A01C23/026 (1961.11). 1964. <https://patents.google.com/patent/US3148643A/en?q=US3148643A+>
9. De Lany T., Andros M.J., Stapp G.J., Klippenstein T. Soil injection system and method: Patent № US10098276B2 United States of America, US15/425 (2017.02). 2018. <https://patents.google.com/patent/US10098276B2/en?q=US10098276B2+>
10. Collins W.C. Injector for soil treating liquids: Patent № US4034686A United States of America, US05/634 (1975.11). 1977. <https://patents.google.com/patent/US4034686A/en?q=US4034686A+>
11. Dobrokhotoy S.A., Kainson A.Ya., Pigur V.N., Sorokin N.E., Sosinov A.A. Device for Introducing Liquids into the Soil: Patent No.360021 A1 Soviet Union, IPC A01C23/02 (1985.01). 1972. (In Rus.)
12. Barton J.R. Apparatus for injecting materials into the earth: Patent № US2789522A United States of America, AO1C23/02 (1952.11). 1957. <https://patents.google.com/patent/US2789522A/en?q=US2789522A+>
13. Kainson A.Ya. Implement for introducing liquids into the soil: Patent No. 927164 A1 Soviet Union, IPC A01C23/02 (2006.01). 1982. (In Rus.)
14. Bondarev V.A. Device for introducing liquid fertilizers into the soil: Patent No.982569 A1 Soviet Union, IPC A01C23/02 (2006.01). 1982. (In Rus.)
15. Peterson M.L. Chemical applicator: Patent № US3602166A United States of America, AO1C23/02 (1969.06). 1971. <https://patents.google.com/patent/US3602166A/en?q=US10098276B2+>
16. Gudelas T.Ya. Working tool of a subsurface irrigation machine: Patent No.198819 A1 Soviet Union, A01G 29/00(1995.01). 1967. (In Rus.)

### Информация об авторах

**Вячеслав Филиппович Федоренко**<sup>1</sup>, академик РАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), [f@maro.pro](mailto:f@maro.pro); <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

**Максим Петрович Харитонов**<sup>2</sup>, аспирант, специалист; [kharitonov.maksim@bk.ru](mailto:kharitonov.maksim@bk.ru); <https://orcid.org/0009-0008-6286-2374>

**Игорь Геннадьевич Смирнов**<sup>3</sup>, д-р техн. наук, заведующий отдела; [rashn-smirnov@yandex.ru](mailto:rashn-smirnov@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9992-1261>

**Эдуард Георгиевич Аристов**<sup>4</sup>, канд. физ. – мат. наук, научный сотрудник; [mgp1947@mail.ru](mailto:mgp1947@mail.ru)

<sup>1,2,3,4</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

### Вклад авторов

В.Ф. Федоренко – концептуализация, методология  
 М.П. Харитонов – информационные ресурсы и аналитика, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование  
 И.Г. Смирнов – информационные ресурсы и аналитика, визуализация  
 Э.Г. Аристов – актуальность проблемы, визуализация, создание черновика рукописи

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 09.10.2023, после рецензирования и доработки 11.01.2024; принята к публикации 11.01.2024

### Author Information

**Vyacheslav F. Fedorenko**<sup>1</sup>, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Chief Researcher; [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), [f@maro.pro](mailto:f@maro.pro); <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>

**Maksim P. Kharitonov**<sup>2</sup>, postgraduate student, specialist; [kharitonov.maksim@bk.ru](mailto:kharitonov.maksim@bk.ru); <https://orcid.org/0009-0008-6286-2374>

**Igor G. Smirnov**<sup>3</sup>, DSc (Eng), Head of Department; [rashn-smirnov@yandex.ru](mailto:rashn-smirnov@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9992-1261>

**Eduard G. Aristov**<sup>4</sup>, PhD (Phys-Math), Research Engineer; [mgp1947@mail.ru](mailto:mgp1947@mail.ru)

<sup>1,2,3,4</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5<sup>1</sup>st Institutsky Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

### Author Contribution

V.F. Fedorenko – conceptualization, methodology  
 M.P. Kharitonov – information resources and analytics, creation of the final version of the manuscript and its editing;  
 I.G. Smirnov – information resources and analytics, visualization;  
 E.G. Aristov – relevance of the problem, visualization, original draft preparation

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 09.10.2023; revised 11.01.2024; accepted 11.01.2024

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 637.115:637.11

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-18-24>

## Разработка алгоритма адаптивного регулирования скорости вращения платформы конвейерной доильной установки типа «Карусель»

*В.В. Кирсанов<sup>1✉</sup>, Д.Ю. Павкин<sup>2</sup>, С.В. Кирсанов<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [kirvv2014@mail.ru](mailto:kirvv2014@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070><sup>2</sup> [dimqaqa@mail.ru](mailto:dimqaqa@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365><sup>3</sup> [sergejkirsanovv@gmail.com](mailto:sergejkirsanovv@gmail.com)

**Аннотация.** Производительность доильной установки типа «Карусель» зависит от количества мест доения и продолжительности одного оборота платформы, которой можно управлять. Непрерывное регулирование скорости вращения платформы в зависимости от продолжительности доения каждого выпускаемого на платформу животного может привести к усложнению алгоритма и системы управления и повышенным нагрузкам на электропривод – с учётом значительной массы и инерционности вращающейся платформы с находящимися на ней животными. С целью разработки алгоритма адаптивного регулирования скорости вращения платформы конвейерной доильной установки исследована циклограмма доильной установки типа «Карусель» на 36 мест доения при продолжительности оборота платформы 8, 10, 12, 15 мин. Установлено, что увеличение продолжительности оборота платформы с 8 до 15 мин приводит к снижению рециклинга доения с 8,75 до 0 и увеличению среднего значения цикловой производительности установки с 17,5 до 26,75 кор/об. С увеличением продолжительности оборота платформы с 8 до 10 мин средняя часовая производительность установки возрастает с 131,25 до максимального значения 153 кор/ч. При замедлении платформы до 12 и 15 мин/об средняя часовая производительность доильной установки снижается, соответственно, до 133,5 и 107 кор/ч. Наличие максимума в изменении часовой производительности обусловлено, с одной стороны, растущей цикловой производительностью от продолжительности оборота платформы, а с другой – ускоренным её снижением, вызванным соответствующим уменьшением числа оборотов платформы за 1 ч работы установки. На основе проведённых исследований разработан алгоритм адаптивного регулирования скорости вращения платформы конвейерной доильной установки типа «Карусель» с учётом вероятно-статистической оценки продолжительности выдаивания животных. Алгоритм позволяет выбрать оптимальную продолжительность оборота платформы и обеспечить повышение производительности установки с 14,65 до 42,3% (в среднем на 28%).

**Ключевые слова:** доильная установка типа «Карусель», циклограмма доильной установки, продолжительность оборота платформы, количество мест доения, цикловая производительность установки, средняя часовая производительность доильной установки, рециклинг доения

**Для цитирования:** Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Кирсанов С.В. Разработка алгоритма адаптивного регулирования скорости вращения платформы конвейерной доильной установки типа «Карусель» // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 18-24. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-18-24>

## ORIGINAL PAPER

## Developing the algorithm of adaptive regulation of the platform rotation speed of the carousel conveyor milking parlour

*V.V. Kirsanov<sup>1✉</sup>, D.Yu. Pavkin<sup>2</sup>, S.V. Kirsanov<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; Moscow, Russia<sup>1</sup> [kirvv2014@mail.ru](mailto:kirvv2014@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070><sup>2</sup> [dimqaqa@mail.ru](mailto:dimqaqa@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365><sup>3</sup> [sergejkirsanovv@gmail.com](mailto:sergejkirsanovv@gmail.com)

**Abstract.** The productivity of the carousel (rotary) milking parlour depends on the number of milking units and the controllable rotation cycle of the platform. Continuous regulation of the platform rotation speed depending on the milking cycle of each animal standing on the platform can lead to complication of the algorithm and the control system and increased loads on the electric drive, taking into account the significant mass and inertia of the rotating platform with animals standing on it. In order to develop an algorithm for the adaptive regulation of the platform

rotation speed of the conveyer milking parlour, the authors studied the cyclogram of the 36-unit carousel milking parlour with platform rotation cycles of 8, 10, 12 and 15 minutes. It was found that increasing the platform rotation cycle from 8 to 15 minutes resulted in a decrease in milk recycling from 8.75 to 0 and an increase in the average cycle productivity of the parlour from 17.5 to 26.75 cows/cycle. As the platform rotation cycle increases from 8 to 10 minutes, the average hourly productivity of the milking parlour increases from 131.25 to a maximum of 153 cows/hour. As the platform slows down to 12 and 15 min/cycle, the average hourly productivity of the milking parlour decreases to 133.5 and 107 cows/hour, respectively. The maximum value in the change of the hourly productivity is caused, on the one hand, by the increasing cyclic productivity depending on the platform rotation cycle, and, on the other hand, by its accelerated decrease caused by the corresponding decrease in the number of platform cycles for 1 h of the parlour operation. Based on the conducted research, the authors have developed an algorithm of adaptive regulation of the platform rotation speed of the carousel milking parlour, taking into account the probabilistic-statistical estimation of the complete milking time of an animal. The algorithm can be used to select the optimum platform rotation cycle and increase the milking parlour productivity from 14.65 to 42.3% (28% on average).

**Key words:** carousel (rotary) milking parlour, milking parlour cyclogram, platform rotation cycle, number of milking units, cyclic productivity of the parlour, average hourly productivity of the milking parlour, milking recycling

**For citation:** Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Kirsanov S.V. Developing the algorithm of adaptive regulation of the platform rotation speed of the carousel conveyor milking parlour. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):18-24. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-18-24>

## Введение

На производительность доильной установки «Карусель» влияют количество мест доения и продолжительность одного оборота платформы (цикла вращения). Если первый фактор задаётся при проектировании и выборе установки и не подлежит изменению в процессе эксплуатации, то второй – регулируемый фактор, влияющий на производительность установки.

Существует 3 способа управления данным параметром: 1) назначение продолжительности оборота платформы по среднему значению времени доения с замедлением скорости вращения в последней 1/3 оборота (вплоть до останова) для выдаивания тугодойных животных; 2) назначение продолжительности оборота платформы без регулирования по максимальному значению времени доения с гарантированным выдаиванием всех животных за один оборот; 3) назначение продолжительности оборота платформы без регулирования с отправлением невыдоенных животных на второй круг.

Реализация первых двух способов может привести к существенному снижению пропускной способности установки (до 50%) [1, 2]. Чтобы избежать этого, разработчики и проектировщики предлагают оборудование с увеличенным количеством станко-мест для доения, что в свою очередь ведет к росту капиталоемкости оборудования. Третий способ заслуживает внимания, однако при этом также возникает неопределённость относительно назначения продолжительности оборота платформы, которая будет зависеть от статистических характеристик и вариабельности параметра продолжительности доения коров в стаде. Разработан алгоритм с непрерывным регулированием скорости вращения платформы в зависимости от продолжительности

доения каждого выпускаемого на платформу животного [3, 4]. Однако такое непрерывное регулирование может привести к усложнению алгоритма и системы управления и повышенным нагрузкам на электропривод – с учётом значительной массы и инерционности вращающейся платформы с находящимися на ней животными. Поскольку практически после каждого захода животного на платформу придётся изменять скорость вращения, подстраиваясь под индивидуальную продолжительность доения конкретной коровы, то целесообразно рассмотреть и проанализировать возможные варианты управления и регулирования скорости вращения доильной платформы и соответствующей продолжительности одного ее оборота  $\tau_{об}$ .

**Цель исследований:** анализ циклограммы и разработка алгоритма адаптивного регулирования скорости вращения платформы конвейерной доильной установки типа «Карусель».

## Материалы и методы

Диапазон регулирования скорости вращения выбираем в соответствии с вариабельностью продолжительности доения животных и рекомендациями [5, 6]. При этом диапазон изменения продолжительности доения животных в группе от среднего значения  $t_{дcp}$  до максимального  $t_{дmax}$  и соответствующий ему диапазон изменения продолжительности оборота платформы от  $\tau_{обmin}$  до  $\tau_{обmax}$  являются основными регулирующими факторами, которые можно записать как

$$\begin{cases} t_d \in (t_{дcp} \dots t_{дmax}); \\ \tau_{об} \in (\tau_{обcp} \dots \tau_{обmax}) \\ \tau_{об} \neq \tau_{обcp}. \end{cases} \quad (1)$$

Из регулирующего диапазона продолжительности оборота платформы следует исключить значение  $\tau_{об\,ср}$ , соответствующее средней продолжительности доения  $t_{дср}$ , поскольку в этом случае пришлось бы перенаправить на второй круг практически половину животных из обслуживаемой группы, что неприемлемо с точки зрения наличия свободных мест на платформе [7]. Очевидно, что из исследуемой возможной продолжительности оборотов платформы должно быть некое новое значение, являющееся медианой исследуемого диапазона, принадлежащего множеству  $(\tau_{об\,ср} \dots \tau_{об\,max})$ . Введём новый параметр – максимальное среднее значение, являющееся опорной средней точкой в рассматриваемом цифровом ряду:

$$\begin{cases} \tau_{об\,ср}^{max} = \frac{\sum \tau_{об\,i}}{N}; \\ N \in (\tau_{об\,ср} \dots \tau_{об\,max}), \end{cases} \quad (2)$$

где  $N$  – число точек в исследуемом цифровом диапазоне множества значений оборотов платформы  $\tau_{об\,ср} \dots \tau_{об\,max}$ .

Данное значение приближает нас к оптимальному числовому параметру. При этом критерием оптимальности может служить максимум производительности доильной установки при минимальном количестве животных, отправляемых на рециклинг (второй круг доения).

Как следует из формулы производительности роторно-конвейерной доильной установки, её производительность тем выше, чем больше мест доения на платформе и меньше продолжительность одного оборота платформы [8]. Однако эти два параметра являются взаимозависимыми для конкретной установки. Так, если снизить продолжительность оборота платформы до среднего значения, соответствующего средней продолжительности доения коров в группе, то можно получить неприемлемо большое количество животных, которые не будут выдоены за один оборот и соответствующим образом, и их следует направить на второй круг [8]. Из рассматриваемого ряда целых чисел продолжительности оборота платформы (6, 8, 10, 12 и 15 мин), принадлежащих диапазону  $\tau_{об\,ср} \dots \tau_{об\,max}$  в соответствии с выражением (2), максимальное среднее значение составит  $10,2 \approx 10$  мин. Это составляет 6 оборотов платформы за 1 ч.

### Результаты и их обсуждение

На основании обработки выборки утреннего доения группы животных (123 гол.) на доильной установке типа «Карусель» на 36 мест в Кстовском районе Нижегородской области (рис. 1) [9] определены значения цикловых показателей и часовой производительности доильной установки при различной продолжительности оборота платформы (8, 10, 12 и 15 мин). Результаты представлены в таблицах 1, 2.

Алгоритм адаптивного регулирования скорости вращения платформы конвейерной доильной

установки «Карусель» реализуется в такой последовательности:

1. При вводе установки в эксплуатацию определяются тестовые статистические характеристики параметров доения каждой обслуживаемой технологической группы животных: минимальная, средняя, максимальная продолжительность доения животных, среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации и др.). Создается база данных о животных на основе программы управления стадом.

2. Вводятся постоянные параметры конвейерной доильной установки: общее количество мест доения на платформе  $n_{общ}$ , количество отводимых мест на платформе под зоны впуска-выпуска животных,  $n_{вл.вып}$  и др.

3. Предварительно рассчитывается и выбирается максимальная средняя продолжительность цикла оборота платформы в соответствующем диапазоне числовых значений  $(\tau_{об\,ср} \dots \tau_{об\,max})$  в соответствии с выражением (2).

4. Определяется количество пропущенных мест доения не вошедшими на платформу животными при впуске в каждом цикле оборота платформы,  $n_{пр}$ .

5. Определяется количество животных, направляемых на второй круг (рециклинг) в каждом цикле,  $n_{pi}$  по условию:

$$t_{di} \in (t_{дср} \dots t_{dmax}) > \tau_{об\,ср}^{max}. \quad (3)$$

6. Определяется количество зашедших (впущенных) на платформу животных в  $i$ -м цикле (оборота)  $n_{впi}$ :

$$n_{впi} = n_{общ} - n_{вл.вып} - n_{пр} - n_{pi-1}, \quad (4)$$

где  $n_{pi-1}$  – количество животных, оставшихся на платформе и направленных на рециклинг в  $i-1$  цикле оборота платформы.

7. Определяется цикловая производительность установки (количество животных, выдоенных за  $i$ -й цикл оборота платформы и выпущенных с установки,  $q_{чи}$ ):

$$q_{чи} = n_{pi-1} + n_{впi} - n_{pi}. \quad (5)$$

8. Определяется часовая производительность установки,  $q_{чи}$ , кор/ч:

$$q_{чи} = \frac{q_{чи} \cdot 60}{\tau_{об\,i}}. \quad (6)$$

9. Определяется средняя часовая производительность установки за разовое время обслуживания  $T_{pi}$  всего поголовья в  $i$ -ю дойку:  $Q_{чсрi}^y$  (утром);  $Q_{чсрi}^{об}$  (в обед);  $Q_{чсрi}^в$  (вечером):

$$\begin{cases} Q_{чсрi}^y = \frac{\sum q_{чи}}{T_{pi}}; \\ Q_{чсрi}^{об} = \frac{\sum q_{чи}}{T_{pi}}; \\ Q_{чсрi}^в = \frac{\sum q_{чи}}{T_{pi}}. \end{cases} \quad (7)$$

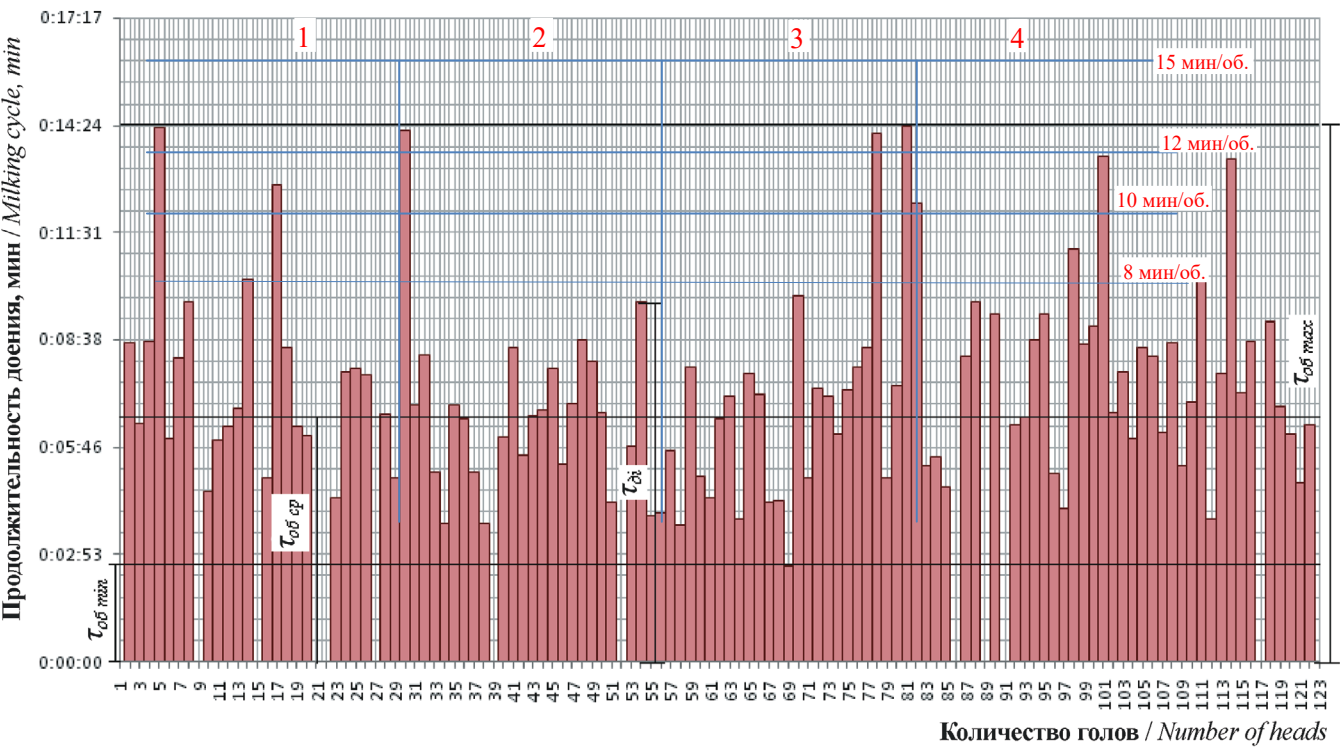


Рис. 1. Пример реализации вариабельности параметра продолжительности доения коровы в группе на доильной карусели на 36 мест:

$\tau_{об\,min}$ ,  $\tau_{об\,cp}$ ,  $\tau_{об\,max}$  – минимальная, средняя и максимальная продолжительность оборота платформы;  
 $\tau_{di}$  – фактическая продолжительность доения  $i$ -й коровы

Fig. 1. Example of using the parametric variability of the milking cycle of a cow in a group on a 36-unit carousel milking parlour:

$\tau_{об\,min}$ ,  $\tau_{об\,cp}$ ,  $\tau_{об\,max}$  – minimum, average and maximum duration of the platform rotation cycle;  
 $\tau_{di}$  – actual milking cycle of the  $i^{th}$  cow

Таблица 1

Изменение цикловых параметров работы доильной установки «Карусель» на 36 мест\* в зависимости от продолжительности оборота платформы  $\tau_{об}$

Table 1

Variation of cycle operating parameters of the carousel 36-unit milking parlour\* depending on the platform rotation cycle  $\tau_{об}$

| Параметр<br>Parameter                                                                                                                                                                                                          | Номер цикла (оборота) вращения платформы<br>Number of the cycle of platform rotation |        |        |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-------|
|                                                                                                                                                                                                                                | 1                                                                                    | 2      | 3      | 4     |
| $\tau_{об} = 8$ мин                                                                                                                                                                                                            |                                                                                      |        |        |       |
| Количество пропущенных мест доения не вошедшими на платформу животными при впуске, $n_{np}$<br>Number of milking units missed by animals not entering the platform, $n_{np}$                                                   | 7                                                                                    | 2      | 3      | 2     |
| Цикловая производительность установки (количество выдоенных коров за один оборот платформы), $q_{ц}$ , кор/об.<br>Cycle productivity of the parlour (number of milked cows for one turn of the platform), $q_{ц}$ , cows/cycle | 15                                                                                   | (9+15) | (5+10) | (8+8) |
| Количество животных, направляемых на второй круг (рециклинг), $n_p$<br>Number of animals entering to the second round (recycling), $n_p$                                                                                       | 9                                                                                    | 5      | 8      | 13    |
| Часовая (мгновенная) производительность установки, $q_{ч}$ , кор/ч<br>Hourly (instantaneous) productivity of the parlour, $q_{ч}$ , cows/hour                                                                                  | 112,5                                                                                | 180    | 112,5  | 120   |
| Часовая средняя производительность установки, $q_{ч}$ , кор/ч<br>Hourly average productivity of the parlour, $q_{ч}$ , cows/hour                                                                                               | 131,25                                                                               |        |        |       |

Окончание табл. 1

| Параметр<br>Parameter                                                                                                                                                                                                                        | Номер цикла (оборота)<br>вращения платформы<br>Number of the cycle<br>of platform rotation |        |        |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                                                                                                                                                                                                                                              | 1                                                                                          | 2      | 3      | 4      |
| τ <sub>об</sub> = 10 мин                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                            |        |        |        |
| Количество пропущенных мест доения не вошедшими на платформу животными при впуске, n <sub>пр</sub><br>Number of milking units missed by animals not entering the platform, n <sub>пр</sub>                                                   | 7                                                                                          | 2      | 3      | 2      |
| Цикловая производительность установки (количество выдоенных коров за один оборот платформы), q <sub>ц</sub> , кор/об.<br>Cycle productivity of the parlour (number of milked cows for one turn of the platform), q <sub>ц</sub> , cows/cycle | 20                                                                                         | (4+25) | (0+28) | (3+22) |
| Количество животных, направляемых на второй круг (рециклинг), n <sub>p</sub><br>Number of animals entering to the second round (recycling), n <sub>p</sub>                                                                                   | 4                                                                                          | 0      | 3      | 4      |
| Часовая (мгновенная) производительность установки, q <sub>ч</sub> , кор/ч<br>Hourly (instantaneous) productivity of the parlour, q <sub>ч</sub> , cows/hour                                                                                  | 120                                                                                        | 174    | 168    | 150    |
| Часовая средняя производительность установки, q <sub>ср</sub> , кор/ч<br>Hourly average productivity of the parlour, q <sub>ср</sub> , cows/hour                                                                                             | 153,0                                                                                      |        |        |        |
| τ <sub>об</sub> = 12 мин                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                            |        |        |        |
| Количество пропущенных мест доения не вошедшими на платформу животными при впуске, n <sub>пр</sub><br>Number of milking units missed by animals not entering the platform, n <sub>пр</sub>                                                   | 7                                                                                          | 2      | 3      | 2      |
| Цикловая производительность установки (количество выдоенных коров за один оборот платформы), q <sub>ц</sub> , кор/об.<br>Cycle productivity of the parlour (number of milked cows for one turn of the platform), q <sub>ц</sub> , cows/cycle | 21                                                                                         | (3+26) | (0+28) | (3+26) |
| Количество животных, направляемых на второй круг (рециклинг), n <sub>p</sub><br>Number of animals entering to the second round (recycling), n <sub>p</sub>                                                                                   | 3                                                                                          | 0      | 3      | 2      |
| Часовая (мгновенная) производительность установки, q <sub>ч</sub> , кор/ч<br>Hourly (instantaneous) productivity of the parlour, q <sub>ч</sub> , cows/hour                                                                                  | 105                                                                                        | 145    | 140    | 145    |
| Часовая средняя производительность установки, q <sub>ср</sub> , кор/ч<br>Hourly average productivity of the parlour, q <sub>ср</sub> , cows/hour                                                                                             | 133,5                                                                                      |        |        |        |
| τ <sub>об</sub> = 15 мин                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                            |        |        |        |
| Количество пропущенных мест доения не вошедшими на платформу животными при впуске, n <sub>пр</sub><br>Number of milking units missed by animals not entering the platform, n <sub>пр</sub>                                                   | 7                                                                                          | 2      | 6      | 2      |
| Цикловая производительность установки (количество выдоенных коров за один оборот платформы), q <sub>ц</sub> , кор/об.<br>Cycle productivity of the parlour (number of milked cows for one turn of the platform), q <sub>ц</sub> , cows/cycle | 24                                                                                         | 29     | 25     | 29     |
| Количество животных, направляемых на второй круг (рециклинг), n <sub>p</sub><br>Number of animals entering to the second round (recycling), n <sub>p</sub>                                                                                   | 0                                                                                          | 0      | 0      | 0      |
| Часовая (мгновенная) производительность установки, q <sub>ч</sub> , кор/ч<br>Hourly (instantaneous) productivity of the parlour, q <sub>ч</sub> , cows/hour                                                                                  | 96                                                                                         | 116    | 100    | 116    |
| Часовая средняя производительность установки, q <sub>ср</sub> , кор/ч<br>Hourly average productivity of the parlour, q <sub>ср</sub> , cows/hour                                                                                             | 107                                                                                        |        |        |        |

\*Количество отводимых мест на платформе под зоны впуска-выпуска животных,  $n_{вп.вып} = 5$ .

\*Number of allotted units on the platform for animal intake-outlet zones,  $n_{вп.вып} = 5$ .

Таблица 2

Средние показатели цикловой и часовой производительности доильной установки «Карусель» в зависимости от продолжительности одного оборота платформы

Table 2

Average indicators of cycle and hourly productivity of the carousel milking parlour depending on the platform rotation cycle

| Показатель<br>Parameter                                                                                                                                                                                                  | Продолжительность оборота платформы $\tau_{об, мин}$<br>Duration of platform rotation cycle $\tau_{об, min}$ |        |        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                                                                                                                                                                                                                          | 8                                                                                                            | 10     | 12     | 15     |
| Количество пропущенных мест доения не вошедшими на платформу животными при впуске, $n_{пр}$<br>Number of milking units missed by animals not entering the platform, $n_{пр}$                                             | 4,25                                                                                                         | 4,25   | 4,25   | 4,25   |
| Количество животных, направляемых на второй круг (рециклинг), $n_p$<br>Number of animals entering to the second round (recycling), $n_p$                                                                                 | 8,75                                                                                                         | 2,75   | 2,00   | 0      |
| Цикловая производительность установки (количество выдоенных коров за один оборот платформы), $q_c$ , кор/об<br>Cycle productivity of the parlour (number of milked cows for one turn of the platform), $q_c$ , cows/rev. | 17,50                                                                                                        | 25,50  | 26,75  | 26,75  |
| Часовая производительность установки, $q_c$ , кор/ч<br>Hourly productivity of the parlour, $q_c$ , cows/hour                                                                                                             | 131,25                                                                                                       | 153,00 | 133,50 | 107,00 |

10. Последовательно просчитываются все варианты для других итераций – ряда числовых значений продолжительностей цикла оборота платформы (8, 10, 12, 15 мин) по циклу (п. 3-п. 9):

$$\tau_{об} \in N = (8, 10, 12, 15 \text{ мин}). \quad (8)$$

11. Выбираются максимальные значения производительности установки за каждую дойку (утро, обед, вечер) по выражениям (6), (7).

Продолжительность оборота платформы существенно влияет на её цикловые характеристики. При увеличении продолжительности оборота платформы с 8 до 15 мин среднее количество животных, направляемых на второй круг (рециклинг доения), прогнозируемо снижается с 8,75 до 0, а среднее значение цикловой производительности установки (количество выдоенных коров за один оборот платформы) возрастает с 17,5 до 26,75 кор/об.

Средняя часовая производительность установки возрастает с 131,25 до 153 кор/ч при увеличении продолжительности оборота платформы от 8 до 10 мин, постепенно снижается до 133,5 кор/ч

при продолжительности оборота 12 мин и достигает своего минимума 107 кор/ч при максимальной продолжительности оборота платформы 15 мин.

Наличие максимума (точки перегиба) в изменении часовой производительности обусловлено противофазным развитием двух факторов: с одной стороны, растущей цикловой производительностью от продолжительности оборота платформы, а с другой – ускоренным снижением часовой производительности, вызванным соответствующим уменьшением числа оборотов платформы за 1 ч работы установки.

### Выводы

Разработанный алгоритм адаптивного регулирования скорости вращения платформы конвейерной доильной установки типа «Карусель» с учётом вероятностно-статистической оценки продолжительности выдаивания животных позволяет выбрать оптимальную продолжительность оборота платформы и обеспечить повышение производительности установки от 14,65 до 42,3% (в среднем на 28%).

### Список литературы

1. Измайлов А.Ю., Цой Ю.А., Кирсанов В.В. Технологические основы алгоритмизации и цифрового управления процессами молочных ферм: монография. М.: Научно-издательский центр Инфра-М, 2019. 208 с. EDN: UWAZMI
2. Морозов Н.М., Кирсанов В.В. Эффективность применения различных способов механизации и автоматизации доения коров // Экономика сельского хозяйства России. 2023. № 2. С. 11-18. <https://doi.org/10.32651/232-11>
3. Кирсанов В.В., Филонов Р.Ф., Тареева О.А. Алгоритм управления доильными установками типа «Карусель» // Техника и оборудование для села. 2012. № 10. С. 20-22. EDN: PFKMDT

### References

1. Izmaylov A.Yu., Tsoy Yu.A., Kirsanov V.V. Technological grounds for algorithmization and digital control of dairy farms processes: monograph. Moscow: Infra-M Research and Publishing Centre, 2019. 208 p. (In Rus.)
2. Morozov N.M., Kirsanov V.V. Efficiency of application of various mechanization methods and automation of cow milking. *Economics of Agriculture of Russia*. 2023;2:11-18. (In Rus.) <https://doi.org/10.32651/232-11>
3. Kirsanov V.V., Filonov R.F., Tareeva O.A. The control algorithm of the “carousel” type milking machines. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2012;10:20-22. (In Rus.)

4. Тареева О.А., Кирсанов В.В., Стребуляев С.Н. Результаты теоретических и экспериментальных исследований адаптивного алгоритма управления доильными установками «Карусель» // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016. № 2 (22). С. 153-158. EDN: WAGKRT

5. Бородин Т.С., Зорин В.А., Стребуляев С.Н., Тареева О.А., Шамин А.Е. Применение модели Гумбеля для распределения времени и скорости процесса роторно-конвейерного доения // Вестник НГИЭИ. 2021. № 3 (118). С. 24-39. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-3-24-39>

6. Kirsanov V.V., Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tareeva O.A., Strebulayev S.N., Filonov R.F. Models And Algorithms Of Adaptive Animal Flow Control In Rotary Milking Parlors. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2019;67(6):1465-1484. <https://doi.org/10.11118/actaun201967061465>

7. Цой Ю.А., Кирсанов В.В., Мамедова Р.А. Оценка эргономичности труда операторов машинного доения, работающих на установках «Карусель» // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. Т. 23, № 4. С. 555-561. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.4.555-561>

8. Ерохин М.Н., Кирсанов В.В., Цой Ю.А., Казанцев С.П. Структурно-технологическое моделирование процессов и функциональных систем в молочном скотоводстве // Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии. 2007. Т. 17, № 1. С. 19-31. EDN: NPTRYB

9. Тареева О.А., Данилов Д.Ю., Борисова Е.Е. Основные технологические расчёты при выборе роторно-конвейерных доильных установок // Экономика и предпринимательство. 2019. № 4 (105). С. 1153-1157. EDN: ENDADX

#### Сведения об авторах

**Владимир Вячеславович Кирсанов<sup>1</sup>**, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом механизации и автоматизации процессов в животноводстве; [kirvv2014@mail.ru](mailto:kirvv2014@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>

**Дмитрий Юрьевич Павкин<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией цифровых систем и роботизированных технических средств в животноводстве; [dimqqa@mail.ru](mailto:dimqqa@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>

**Сергей Владимирович Кирсанов<sup>3</sup>**, аспирант лаборатории цифровых систем и роботизированных технических средств в животноводстве; [sergejkirsanovv@gmail.com](mailto:sergejkirsanovv@gmail.com)

<sup>1,2,3</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

#### Вклад авторов

В.В. Кирсанов – концептуализация и методология.  
Д.Ю. Павкин – проведение исследований, ресурсы  
С.В. Кирсанов – формальный анализ.

#### Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 26.09.2023; поступила после рецензирования и доработки 20.12.2023; принята к публикации 20.12.2023

4. Tareeva O.A., Kirsanov V.V., Strebulayev S.N. Results of theoretical and experimental studies of the adaptive control algorithm of “Carousel”-type milking units. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Mechanisation of Animal Husbandry*. 2016;2(22):153-158. (In Rus.)

5. Borodina T.S., Zorin V.A., Strebulayev S.N., Tareeva O.A., Shamin A.E. Application of the Gumbel model for time and speed distribution rotary conveyor milking process. *Bulletin NGIEI*. 2021;3:24-39. (In Rus.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-3-24-39>

6. Kirsanov V.V., Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tareeva O.A., Strebulayev S.N., Filonov R.F. Models And Algorithms Of Adaptive Animal Flow Control In Rotary Milking Parlors. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2019;67(6):1465-1484. <https://doi.org/10.11118/actaun201967061465>

7. Tsoy Yu.A., Kirsanov V.V., Mamedova R.A. Evaluation of labor ergonomics of machine milking operators working at “Carousel”-type milking units. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022;23(4):555-561. (In Rus.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.4.555-561>

8. Erokhin M.N., Kirsanov V.V., Tsoy Yu.A., Kazantsev S.P. Structural and technological modelling of processes and functional systems in dairy cattle breeding. *Scientific Proceedings of GNU VNIIMZh Rosselkhozakademy*. 2007;17(1):19-31. (In Rus.)

9. Tareeva O.A., Danilov D.Zh., Borisova E.E. Basic technological calculations when choosing a rotary conveyor milking units. *Ekonomika i Predprinimatelstvo*. 2019;4:1153-1157. (In Rus.)

#### Author Information

**Vladimir V. Kirsanov<sup>1</sup>**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Mechanisation and Automation of Animal Husbandry Processes; [kirvv2014@mail.ru](mailto:kirvv2014@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>

**Dmitry Yu. Pavkin<sup>2</sup>**, CSc (Eng), Head of the Laboratory of Digital Systems and Robotized Technical Means Used in Animal Husbandry; [dimqqa@mail.ru](mailto:dimqqa@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>

**Sergey V. Kirsanov<sup>3</sup>**, postgraduate student, the Laboratory of Digital Systems and Robotized Technical Means Used in Animal Husbandry; [sergejkirsanovv@gmail.com](mailto:sergejkirsanovv@gmail.com).

<sup>1,2,3</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

#### Author Contribution

V.V. Kirsanov – conceptualization and methodology.  
D.Y. Pavkin – research implementation, resources  
S.V. Kirsanov – formal analysis.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 26.09.2023; revised 20.12.2023; accepted 20.12.2023

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 637.11:637.115.6

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-25-30>

## Эффективная мойка доильных аппаратов

*Р.Ф. Филонов<sup>1✉</sup>, Н.Г. Кожевникова<sup>2</sup>, В.Н. Кравченко<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [filofr@yandex.ru](mailto:filofr@yandex.ru)<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0003-3872-4605>; AuthorID: 767650<sup>2</sup> [energo-ngk@rgau-msha.ru](mailto:energo-ngk@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>; AuthorID: 346095<sup>3</sup> [k.v.n.72@mail.ru](mailto:k.v.n.72@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9799-2792>; AuthorID: 767650

**Аннотация.** Промывка и дезинфекция доильного оборудования необходимы для получения качественного молока. При промывке системы доения наиболее проблематичной, затратной и продолжительной является промывка доильных стаканов. С целью оптимизации системы промывки проведены аналитические исследования скорости движения воздушно-гидравлической смеси в доильном стакане. Авторами разработано промывочное устройство доильных аппаратов, включающее в себя подающую систему коллекторного типа для распределения моющего раствора в четыре конусообразные вращающиеся насадки с механически активной поверхностью произвольного вращения. Равномерная и объемная подача моющей жидкости на загрязненную поверхность сосковой резины осуществляется через конусные насадки, на поверхности которых расположены струйные распылители и щетинки, обеспечивающие фрикционную мойку. Коллекторная платформа с насадками позволяет подключать доильные стаканы без разборки доильного аппарата. С помощью электронного пульсатора и клапанным механизмом одностороннего действия можно неразборным методом одновременно промывать молочные шланги и коллектор доильного аппарата. Повышение интенсивности воздействия на внутренние стенки сосковой резины, наполнение подсосковой камеры доильных стаканов промывочной жидкостью и сокращение времени процесса мойки с локализацией циркуляции промывки доильных аппаратов значительно ускоряют дезинфекцию доильных аппаратов, сокращают время промывки как минимум в два раза и снижают расход концентрата пропорционально уменьшению времени промывки для мойки доильной установки.

**Ключевые слова:** доение, доильный аппарат, доильный стакан, дезинфекция, коллекторные насадки, распылители, пульсатор

**Для цитирования:** Филонов Р.Ф., Кожевникова Н.Г., Кравченко В.Н. Эффективная мойка доильных аппаратов // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 1. С. 25-30. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-25-30>

## ORIGINAL ARTICLE

## Efficient washing of milking units

*R.F. Filonov<sup>1✉</sup>, N.G. Kozhevnikova<sup>2</sup>, V.N. Kravchenko<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia<sup>1</sup> [filofr@yandex.ru](mailto:filofr@yandex.ru)<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0003-3872-4605>; AuthorID: 767650<sup>2</sup> [energo-ngk@rgau-msha.ru](mailto:energo-ngk@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>; AuthorID: 346095<sup>3</sup> [k.v.n.72@mail.ru](mailto:k.v.n.72@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9799-2792>; AuthorID: 767650

**Abstract.** The cleaning and disinfection of milking equipment are extremely important for obtaining high-quality milk. When washing the milking system, the most problematic, costly, and time-consuming operation is to flush teat cups. To optimize the process, the authors carried out analytical studies of air-hydraulic mixture velocity in the teat cup. They have developed a washing device for milking unit, including a feeding system of collector type for distribution of a washing solution into four cone-shaped rotating nozzles with mechanically active surface of arbitrary rotation. The uniform and volumetric supply of the washing liquid to the contaminated surface of the teat cup rubber is carried out through the cone-shaped nozzles. On their surface, there are jet atomizers and bristles providing friction washing. The collector platform with nozzles allows teat cups to be connected without disassembling the milking unit. With the help of an electronic pulsator and a one-way valve mechanism it is possible to simultaneously wash milk hoses and the collector of the milking unit in a non-disassembling way.

Increasing the intensity of impact on the inner walls of the teat cup rubber, filling the suckling chamber of the teat cups with washing liquid and reducing the washing time with localizing the milking unit washing circulation. In addition, it significantly accelerates the disinfection of milking machines, reduces the washing time at least twice and reduces the consumption of detergents, proportional to the reduction of washing time, while washing the milking unit.

**Keywords:** milking, milking unit, teat cup, disinfection, collector nozzles, atomizers, pulsator

**For citation:** Filonov R.F., Kozhevnikova N.G., Kravchenko V.N. Efficient washing of milking units. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):25-30. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-25-30>

## Введение

Процесс дезинфекции доильного оборудования чрезвычайно важен для получения качественного молока. Одним из факторов, ухудшающих качество молока, является ненадлежащая промывка доильной установки [1]. Качество товарного молока и молочной продукции определяется исходным качеством сырого молока, которое зависит от зоотехнических параметров, системы содержания животных и санитарно-гигиенического состояния оборудования доения [2].

Промывка доильного оборудования после доения и предварительная промывка до доения с учётом совокупности циклов определяют качество всех этапов проведения доения и первичной обработки. Основные принципы получения качественного продукта основываются на своевременном проведении дезинфекции оборудования доения в кратчайшие сроки и с наибольшей эффективностью<sup>1</sup>.

Доильный аппарат – наиболее проблемный элемент в доильной установке. Множественные варианты систем очистки доильного оборудования различных типов, в том числе при использовании роботизированных систем, и их анализ по степени частоты после промывки определяют мойку доильных аппаратов как наиболее сложный и затратный процесс<sup>2</sup>.

Для получения более качественной продукции при мойке доильного оборудования можно применить активные химические вещества, а можно активизировать процесс мойки посредством эффективного воздействия. Недостаточная дезинфекция участка от доильного аппарата до молокоприёмника-релизера в системе молокопроводящих путей влияет на качественные показатели промывки всей

системы. Возможность эффективного использования промывки для доильных аппаратов определяется установленным расходом моющих средств и режимом работы, минимизирующим затраты на выполнение технологического процесса. Недостатками существующих типов и систем промывки являются значительные затраты моющих средств, длительность технологического процесса циркуляционной мойки и высокие энергетические затраты. При этом значительная концентрация щелочных или кислотных моющих средств дезинфекции доильного оборудования создаёт экологическую нагрузку, особенно при использовании мобильных агрегатов доения без канализационного смыва и утилизации отработанного моющего раствора [3].

Повышение интенсивности воздействия на внутренние стенки сосковой резины, наполнение подсосковой камеры доильных стаканов промывочной жидкостью и сокращение времени проведения процесса мойки с локализацией циркуляции позволяют ускорить дезинфекцию доильных аппаратов, сократить время промывки и снизить расход концентрата, необходимого для мойки доильной установки<sup>2</sup>.

**Цель исследований:** оптимизация систем промывки на основе аналитических исследований скорости движения воздушно-гидравлической смеси в доильном стакане.

## Материалы и методы

Процесс промывки доильных стаканов рассмотрен на основе законов гидравлики. Утечка воздуха между соском и сосковой резиной влияет на изменение давления вакуума в доильном стакане. Утечки отрицательно влияют на процесс промывки при нахождении стаканов на моющих головках промывочного стенда. Баланс утечки воздуха в доильном стакане будет зависеть от геометрических параметров моющей головки и режима работы [4, 5]. Традиционные системы циркуляционной промывки используют стандартный вариант установления доильных стаканов на моющих коллекторах (рис. 1).

<sup>1</sup> Трухачев В.И., Капустин И.В., Будков В.И., Грицай Д.И. Технологическое и техническое обеспечение процессов машинного доения коров, обработки и переработки молока: учебное пособие. Санкт-Петербург, 2022. 304 с.

<sup>2</sup> Молокоприёмные и молокоперерабатывающие предприятия. Монография. / В.И. Трухачев, И.Н. Краснов, И.В. Капустин [и др.]. Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2013. 312 с.

Наличие движущей силы для вращения промывочных головок обусловлено соответствием сочетания разнонаправленных струй с различной скоростью движения потоков. При этом направленность и сила поточного перемещения оцениваются коэффициентом сжатия ( $\varepsilon$ ):

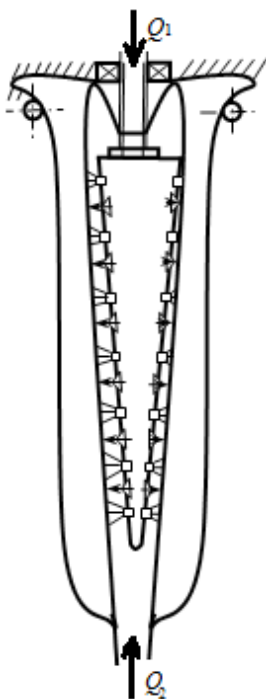
$$\varepsilon = \frac{F_1}{F_2} = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2,$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – площади сечений отверстий,  $m^2$ ;  $d_1$  и  $d_2$  – диаметры соответствующих отверстий,  $m$ .

Для вращения головок под действием разнонаправленных струй необходимо возникновение реактивной силы, определить которую можно при использовании уравнения гидравлики на основе уравнения Бернулли:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + P = \text{const},$$

где  $\frac{\rho v^2}{2}$  – динамическое давление,  $Pa$ ;  $\rho gh$  – гидростатическое давление,  $Pa$ ;  $P$  – статическое давление,  $Pa$ ;  $\rho$  – плотность жидкости,  $kg/m^3$ ;  $v$  – скорость движения жидкости,  $m/s$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/s^2$ .



**Рис. 1. Схема доильного стакана при промывке и самопроизвольном вращательном движении:**

$Q_1$  – поток, входящий в моющую головку,  $m^3/s$ ;  
 $Q_2$  – поток, подводящийся в коллекторный стакан моющей головки,  $m^3/s$

**Fig. 1. Diagram of the teat cup during washing and spontaneous rotational movement:**

$Q_1$  – flow entering the spraying device,  $m^3/s$ ;  
 $Q_2$  – flow entering the collector cup of the spraying device,  $m^3/s$

С учётом постоянства скорости моющей жидкости за счёт параметров работы центробежного насоса устойчивость потока не определяется расположением подающих отверстий.

Определить обоснование режимов при определении скорости потока можно посредством прерывистости поточных струй, используя пульсирующий режим подачи жидкости по одному из каналов. Сжатие сосковой резины в результате смены тактов также способствует эффективности промывки и вращательному движению моющей головки.

Расчёт потерь напора ( $\Delta h_m$ ,  $m$ ) в местных сопротивлениях по длине шлангов круглого сечения определяется по формуле Дарси-Вейбаха:

$$\Delta h_m = \xi \frac{v^2}{2g},$$

где  $v$  – средняя скорость движения потока,  $m/s$ ;  $\xi$  – безразмерный коэффициент местного сопротивления.

Обоснование движущей силы определяет диаметр сечений шлангов верхнего и нижнего распределения, подающих моющий раствор.

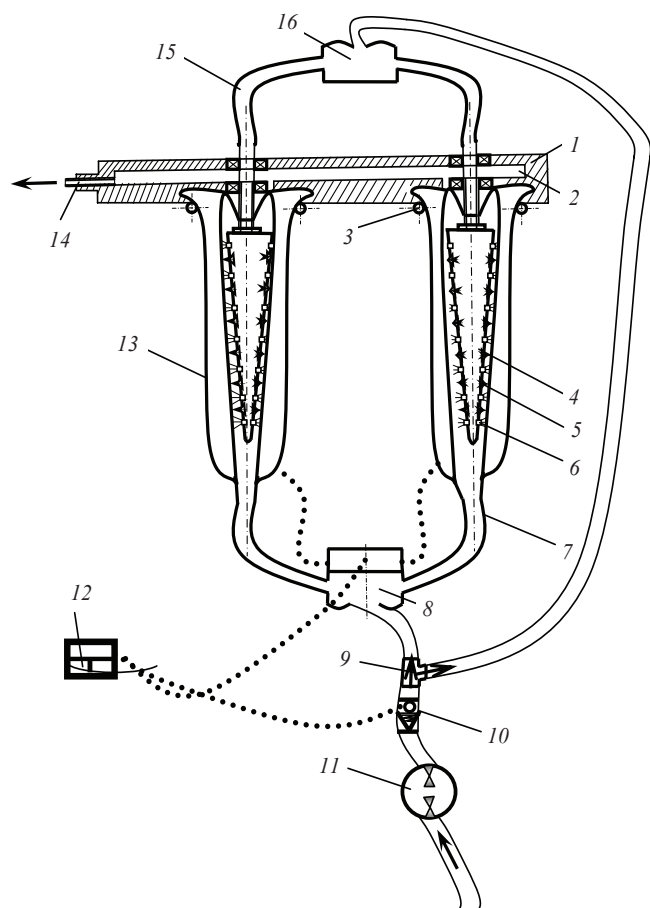
Повышение качества промывки в результате повышения интенсивности воздействия на внутренние стенки сосковой резины, наполнения подсосковой камеры доильных стаканов промывочной жидкостью и сокращения времени процесса мойки с локализацией циркуляции (на основании теоретических предположений) определило схему устройства для промывки доильных аппаратов [4].

Использовалась классическая схема циркуляционной промывки доильной установки, при которой моеющее воздействие происходит равномерно в течение всего периода мойки. Пульсирующие режимы за счёт воздушных пробок создают дополнительный эффект мойки, но при этом ухудшается вакуумный режим, дополнительно расходуется энергия для обеспечения вакуума<sup>1,2</sup>. Незначительная протяженность молокопроводов классической схемы промывки снижает время воздействия моющих растворов. Современные технологии уже сейчас идентифицируют молоко от различных производителей, а это порождает необходимость обеспечения индивидуальной характеристики продукта. В этой связи после каждой дойки целесообразна мойка с наименьшими затратами [5, 6].

Гидромеханическое воздействие на наиболее проблемные участки доильного оборудования (доильные стаканы) не увеличивает энергоёмкость процесса и при этом позволяет уменьшить как время процесса, так и расходы моющего раствора [7, 8].

### Результаты и их обсуждение

Разработанное промывочное устройство доильных аппаратов включает в себя подающую систему коллекторного типа для распределения моющего раствора в 4 конусообразные вращающиеся насадки с механически активной поверхностью произвольного вращения (рис. 2). Подача и отвод



**Рис. 2. Устройство для промывки доильных аппаратов с использованием самопроизвольного вращательного движения:**

- 1 – коллекторная платформа; 2 – отводящая полость;
- 3 – зажимы; 4 – конусные насадки;
- 5 – струйные распылители; 6 – щётки;
- 7, 15 – молочные шланги;
- 8 – коллектор доильного аппарата;
- 9 – распределитель;
- 10 – клапан одностороннего действия;
- 11 – центробежный насос;
- 12 – электронный пульсатор; 13 – доильный стакан;
- 14 – подающий шланг; 16 – коллектор-распределитель

**Fig. 2. Device for washing milking units using spontaneous rotational motion:**

- 1 – collector platform; 2 – discharge cavity; 3 – clamps;
- 4 – cone nozzles; 5 – jet sprayers; 6 – brushes;
- 7, 15 – washing hoses; 8 – milking unit collector;
- 9 – distributor; 10 – one-way valve;
- 11 – centrifugal pump; 12 – electronic pulsator;
- 13 – teat cup; 14 – feeding hose; 16 – collector distributor

моющей жидкости в режиме циркуляционной работы с активными рабочими коллекторными насадками регулируются клапанным механизмом, размещенным на подводящем патрубке коллектора доильного аппарата. При подаче обеспечивается полнообъемное наполнение подсосковых камер доильных стаканов и молочной камеры коллектора моющим раствором. Регулировка осуществляется электронным пульсатором, определяющим пульсирующую подачу моющей жидкости в доильные стаканы [7, 8].

К внутренним стенкам сосковой резины моющая жидкость подается сквозь рабочую поверхность насадок через струйные распылители. Дополнительное воздействие моющей жидкости на загрязненные участки сосковой резины обуславливается работой пульсирующего устройства 12 и насоса 11 с распределением потоков и вращающего воздействия на моющие головки вследствие неравномерной подачи воды в распределители, размещенные по конусной поверхности. Коллекторные насадки расположены асинхронно относительно основания помещенных для промывки доильных стаканов доильного аппарата.

Устройство для дезинфекции доильных аппаратов включает в себя коллекторную платформу 1 с внутренней полостью 2 для отвода моющей жидкости, соединенной посредством патрубка с системой циркуляции моющего раствора. На поверхности платформы имеются четыре конусные насадки 4 для подключения доильных стаканов и фиксирующие устройства 3 (зажимы) для герметичного крепления доильных стаканов. Равномерная и объемная подача моющей жидкости на загрязненную поверхность сосковой резины осуществляется через полые оси приводных валов конусных насадок. На конусной поверхности насадок рассредоточены струйные распылители 5 и имеются щетинки для фрикционной мойки. Коллекторная платформа с насадками расположена аналогично соскам вымени животного, что позволяет подключать доильные стаканы без разборки доильного аппарата. С помощью воздействия, управляемого частотой пульсации электронного пульсатора 12 и клапанным механизмом одностороннего действия, можно одновременно промывать неразборным методом молочные шланги и коллектор доильного аппарата. Подачу моющего раствора обеспечивает гидравлический насос центробежного типа 11. Предложенная конструкция позволяет установить ритмичность моющего и дезинфицирующего воздействия по всей внутренней поверхности сосковой резины с учетом надежности и отказов при промывке [8-10].

Доильные стаканы 13, находясь на вращающихся конусных насадках, приводимых во вращательное движение посредством полых приводных валов с размещенными внутри каналами, промываются с внутренней стороны сосковой резины и с внешней стороны потоками моющей жидкости разнонаправленного действия, создаваемыми насосом и распределяемыми по доильным стаканам с использованием молочных шлангов 7 и 15. Распределение потока моющей жидкости в конусные насадки обеспечивает коллектор-распределитель 16.

### Выводы

1. Промывка доильного оборудования представляет собой сложный процесс, минимизация

затрат на который возможна или за счёт гидромеханического процесса воздействия, или с учётом улучшения химических составляющих моющих средств.

2. Увеличение разности давления в доильном стакане вызывает увеличение скорости движения потока между соском и сосковой резиной, и этот эффект определяет качество промывки сосковой резины.

3. Предложенный вариант (схема) станда для промывки и дезинфекции доильных аппаратов позволяет эффективно применять моющие средства и значительно сокращать процесс общей промывки доильного оборудования [7].

### Список литературы

1. Кравченко В.Н., Мазаев Ю.В., Рябов А.С., Кирсанов В.В. Новые технологии дезинфекции молочного оборудования в животноводческих помещениях // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 2 (46). С. 81-85. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-81>
2. Kirsanov V.V., Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tareva O.A., Strebulayev S.N., Filonov R.F. Models and algorithms of adaptive animal flow control in rotary milking parlors. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2019;67(6):1465-1484. <https://doi.org/10.11118/actaun201967061465>
3. Стенд для промывки доильных стаканов: Патент RU2636332 C1, МПК A01J 7/02 / В.В. Кирсанов, Р.Ф. Филонов, Н.Г. Кожевникова, С.С. Рузин; опубл. 22.11.2017 г. EDN: JRSDAP
4. Кирсанов В.В., Дорохов А.С., Иванов Ю.А. Графоаналитическая оценка функционирования локальных биотехнических систем в животноводстве // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 2 С. 4-9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-4-9>
5. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Цимбал А.А. Результаты обработки экспериментальных данных с роботов доения по четвертям вымени // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 4 (14). С. 122-128. EDN: VJKDKL
6. Устройство для промывки доильных аппаратов: Патент на полезную модель RU180325 U1, МПК A01J 7/02 / Р.Ф. Филонов, Н.Г. Кожевникова, В.Н. Кравченко; опубл. 15.02.2018. EDN: FQSIAO
7. Устройство для дезинфекции доильных аппаратов: Патент RU2786161 C1, МПК A01J 7/02 / Р.Ф. Филонов; опубл. 19.12.2022. EDN: UVRXJA
8. Филонов Р.Ф., Кравченко В.Н. Интенсификация промывки доильных аппаратов с использованием гидромеханических устройств // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 1(81). С. 113-117. EDN: TLMQZI
9. Филонов Р.Ф., Кожевникова Н.Г. Гидродинамическое обоснование процесса доения и промывки доильных аппаратов // Доклады ТСХА. 2019. Вып 291. Ч. 5. С. 335-339. URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/doklady-tsha-291-5-2019.pdf/view>
10. Маслов М.М., Крупин А.Е., Матвеев В.Ю., Миرون Е.Б. Оценка надёжности доильных установок на основании анализа их отказов // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 23-27. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-23-27>

### References

1. Kravchenko V.N., Mazaev Yu.V., Ryabov A.S., Kirsanov V.V. New technologies of disinfection of dairy equipment in livestock premises. *Equipment and Technologies in Livestock*. 2022;2:81-85. (In Rus.) <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-81>
2. Kirsanov V.V., Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tareva O.A., Strebulayev S.N., Filonov R.F. Models and algorithms of adaptive animal flow control in rotary milking parlors. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2019;67(6):1465-1484. <https://doi.org/10.11118/actaun201967061465>
3. Kirsanov V.V., Filonov R.F., Kozhevnikova N.G., Ruzin S.S. Bench for washing teat cups: Patent No. 2636332 Russian Federation IPC A01J 7/02, 2017. (In Rus.)
4. Kirsanov V.V., Dorokhov A.S., Ivanov Yu.A. Graph analytics of the performance of local biotechnical systems in animal husbandry. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(2):4-9. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-4-9>
5. Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Tsimbal A.A. Results of processing experimental data from milking robots by udder quarters. *Innovatsii v Selskom Khozyaystve*. 2015;4:122-128. (In Rus.)
6. Filonov R.F., Kozhevnikova N.G., Kravchenko V.N. Device for washing milking machines: utility model patent No. 180325 Russian Federation, IPC A01J 7/02, 2018. (In Rus.)
7. Filonov R.F. Device for the disinfection of milking units: patent No. 2636332 Russian Federation IPC A01J 7/02. 2786161, 2012. (In Rus.)
8. Filonov R.F., Kravchenko V.N. Intensification of milking unit washing using hydraulic and mechanical devices. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;1(81):113-117. (In Rus.)
9. Filonov R.F., Kozhevnikova N.G. Hydrodynamic justification of the parameters of milking and milk unit washing. *Doklady TSKhA*. 2019;291(5):335-339. URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/doklady-tsha-291-5-2019.pdf/view>
10. Maslov M.M., Krupin A.E., Matveev V.Yu., Mironov E.B. Evaluation of the reliability of milking machines based on the analysis of their failures. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(1):23-27. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-23-27>

**Информация об авторах**

**Филонов Роман Федорович**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент;  
filofr@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3872-4605>;  
AuthorID: 767650

**Кожевникова Наталья Георгиевна**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент;  
energo-ngk@rgau-msha.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>; AuthorID: 346095

**Кравченко Владимир Николаевич**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент;  
k.v.n.72@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9799-2792>;  
AuthorID: 767650

<sup>1,2,3</sup> Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская  
Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

**Вклад авторов**

Р.Ф. Филонов – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, формулирование общих выводов

Н.Г. Кожевникова – формулирование общих выводов, анализ литературы, обработка результатов исследования

В.Н. Кравченко – обработка результатов исследования, подготовка рукописи

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 17.11.2023; после рецензирования и доработки 19.01.2024; принята к публикации 19.01.2024

**Author Information**

**Roman F. Filonov**<sup>1</sup>, CSc (Eng), Associate Professor;  
filofr@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3872-4605>;  
AuthorID: 767650

**Natalya G. Kozhevnikova**<sup>2</sup>, CSc (Eng), Associate Professor;  
energo-ngk@rgau-msha.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>; AuthorID: 346095

**Vladimir N. Kravchenko**<sup>3</sup>, CSc (Eng), Associate Professor;  
k.v.n.72@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9799-2792>;  
AuthorID: 767650

<sup>1,2,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev  
Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow,  
127434, Russian Federation

**Author Contribution**

R.F. Filonov – research supervision, research administration, general conclusions

N.G. Kozhevnikova – general conclusions, literature review, data curation and formal analysis

V.N. Kravchenko – data curation and formal analysis, draft preparation

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 17.11.2023; revised 19.01.2024; accepted 19.01.2024

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 636.084.743

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-31-36>

## Автоматическая система позиционирования колёсных роботизированных технических средств, обслуживающих кормовой стол

**Е.А. Никитин**

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия  
evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

**Аннотация.** Качество и доступность корма на кормовом столе повышают продуктивность коров. Обеспечить доступность корма можно за счёт увеличения длины кормового стола и применения средств роботизации. Колёсное роботизированное техническое средство, применяемое при раздаче кормов, повышает производительность труда и снижает влияние человеческого фактора на процесс кормления. С целью повышения эффективности процесса раздачи кормов разработаны и испытаны автоматическая система позиционирования и роботизированное устройство для обслуживания кормового стола. Представлено математическое описание кинематических зависимостей движения колёсных роботизированных технических средств. Разработан алгоритм работы автоматической системы позиционирования, учитывающий обеспечение алгоритмической связи исполнительных механизмов электропривода ведущих колёс и системы технического зрения, где обработка изображений осуществляется по интеллектуальному алгоритму распознавания фронта кормления. Разработан принцип построения маршрута движения роботизированного устройства по кормовому столу. Испытания подтвердили соответствие выходных реакций исполнительных устройств роботизированного устройства входным командам автоматической системы позиционирования.

**Ключевые слова:** животноводческий комплекс, раздача корма, автоматическая система позиционирования, роботизированное техническое средство, кормовой стол, фронт кормления, система технического зрения

**Для цитирования:** Никитин Е.А. Автоматическая система позиционирования колёсных роботизированных технических средств, обслуживающих кормовой стол // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 31-36. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-31-36>

## ORIGINAL PAPER

## Automatic positioning system of wheeled robotic technical means servicing the feed table

**E.A. Nikitin**

Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; Moscow, Russia  
evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

**Abstract.** The quality and availability of forage on the feed table increase cow productivity. Feed availability can be ensured by increasing the length of the feed table and using robotic tools. The use of a wheeled robotized device in feed distribution increases labour productivity and reduces the influence of the human factor on the feeding process. To improve the efficiency of the feed distribution process, the author has developed and tested an automatic positioning system and a robotic device for servicing the feed table. The article presents a mathematical description of the kinematic relationships of movement of wheeled robotic devices. The author has developed an algorithm of the automatic positioning system operation, which takes into account the algorithmic connection between the electric drive actuators of the driving wheels and the vision system, where the image is processed according to the intellectual algorithm of the feeding area recognition. The author has developed the principle of constructing the route travelled by the robotic device along the feed table. Tests have confirmed the conformity of output reactions of the robotic device actuators to the input commands of the automatic positioning system.

**Keywords:** livestock breeding unit, feed distribution, automatic positioning system, robotic device, feed table, feeding alley, vision system

**For citation:** Nikitin E.A. Automatic positioning system of wheeled robotic technical means servicing the feed table. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):31-36. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-31-36>

## Введение

Цифровизация технологических процессов в животноводстве позволяет вести учёт надоев на ферме, осуществлять автоматизированную сортировку животных, использовать станции докорма концентратами, роботизированные доильные установки, системы автоматического выявления половой охоты и др. [1, 2].

Продуктивность коров и их продуктивное долголетие [3, 4] зависят от состояния кормового стола животноводческого комплекса [5, 6]. Качество полнорационных кормовых смесей, приготовленных в миксере-кормораздатчике, зависит от очередности загрузки компонентов [7].

Круглогодичный монорацион позволяет избегать расстройств ЖКТ и перепадов показателей продуктивности при смене стойлового и пастбищного рациона, а также поддерживать постоянный видовой состав симбиотической микрофлоры рубца у животных [8]. Кроме качественных показателей кормовой смеси, важно обеспечивать её вкусовую привлекательность [9].

При раздаче кормовой смеси необходимо учитывать особенности животных. Коровы, имеющие более высокий ранг в стаде, едят первыми и часто разбрасывают приготовленный рацион. Животные с низким рангом едят последними, поскольку более сильные животные отодвигают их от фронта кормления [10, 11].

Анализ исследований зарубежных учёных выявил, что животные, имеющие более низкий ранг в стаде, физиологически предрасположены к большей молочной продуктивности, поэтому важно обеспечить доступность корма подобным животным [12, 13]. Эту

проблему можно решить за счёт увеличения длины кормового стола и применения средств роботизации.

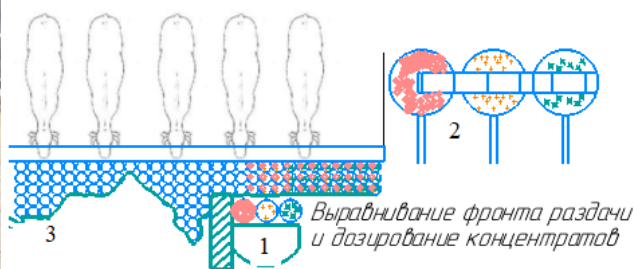
**Цель исследований:** разработка и испытание роботизированного устройства и его автоматической системы позиционирования для обслуживания кормового стола.

## Материалы и методы

Роботизированное устройство предполагает автономное обслуживание кормового стола на животноводческом комплексе. Роботизированное устройство 1 подталкивает расположенную на кормовом столе массу к ограждению, обеспечивая доступность корма животным. В специальной зоне 2 осуществляются зарядка аккумуляторной батареи и пополнение накопительного бункера концентрированными кормами, которые дозируются роботом по ходу движения. Построение маршрута вдоль ограждения кормового стола осуществляется автономно системой технического зрения, автоматически определяющей границу разброса корма 3 (рис. 1).

В алгоритм автоматического позиционирования заложена технология машинного зрения, основанная на интеллектуальном выделении областей интереса в зоне сканирования маршрута с использованием RGB-камеры и программных светофильтров.

Площадь сканирования кормового стола имеет постоянное значение, при этом полученные снимки разбиваются на бинаризованное изображение (двухцветное). Чтобы описать бинаризованное изображение размером  $[X, Y]$ , мы используем матрицу  $p(i, j)$  для представления каждого пикселя с его координатами  $(i, j)$  на изображении, заданными  $0 \leq i < N$  и  $0 \leq j < M$ . Пиксель  $p(i, j)$  имеет четыре



**Рис. 1. Принцип обслуживания кормового стола на животноводческом комплексе:**

- 1 – роботизированное устройство для обслуживания кормового стола;  
2 – зарядная станция с накопительными бункерами кормовых добавок; 3 – фронт кормления

**Fig. 1. Principle of feed table servicing at the livestock breeding unit:**

- 1 – robotic device for servicing the feed table; 2 – charging station with storage bunkers of feed additives; 3 – feeding alley

смежных пикселя, а именно  $p(i-1, j)$ ,  $p(i, j-1)$ ,  $p(i+1, j)$  и  $p(i, j+1)$ , и вместе с  $p(i-1, j-1)$ ,  $p(i+1, j-1)$ ,  $p(i-1, j+1)$  и  $p(i+1, j+1)$  они образуют восемь соседних пикселей  $p(i, j)$ . Две точки объекта, обозначаемые как «s» и «t», считаются четырехсвязными (восьмисвязными), если существует траектория, состоящая из точек объекта  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , – такая, что  $a_1 = s$  и  $a_n = t$  и для всех  $1 \leq k \leq n-1$  и  $a_k$  и  $a_{k+1}$  являются четырьмя соседними (восьмью смежными) друг с другом. Четырехсвязный (восьмисвязный) компонент в двоичном изображении определяется как облако точек объекта таким образом, что любые два пикселя в наборе являются четырехсвязными (восьмисвязными), а связанный компонент является желаемым объектом (составной канал). Площадь объекта  $O$ , обозначаемая как  $S_O$ , определяется как количество пикселей в объекте  $O$  и может быть вычислена по формуле:

$$S_O = |\{p(x, y) | p(x, y) \in O\}|. \quad (1)$$

Зона с восемью соединениями имеет более плотную концентрацию кормовой смеси на полу загрузочной дорожки, в то время как зона с четырьмя соединениями имеет меньшее количество смеси, что позволяет распознать крайнюю кромку, которую можно использовать для последующей ориентации робота во время движения. Чтобы определить границу разброса ленты, изображение делится на несколько частей, и площадь интересующих областей (серая) суммируется для определения общей площади пятна:

$$K = \begin{cases} 1, S_i - \sum S_O \leq L \\ 0, S_i - \sum S_O > L, \end{cases} \quad (2)$$

где  $S_i$  – средняя площадь для  $i$ -го бинаризованного изображения;  $K$  – индикатор интересующей области (1 – для кормовой смеси, 0 – для неинтересной области фермы);  $L$  – центр масс робота (расстояние от ограждения кормовой аллеи).

Алгоритм автоматической системы позиционирования обрабатывает изображения одинакового размера, поэтому его сложность является постоянной. Таким образом, для нашего алгоритма потребность в вычислительной мощности центральной платы управления  $g(n) = \text{const}$ .

Для обработки изображений используется инструмент обработки изображений Color Threshold и Image Region Analyzer от Matlab.

Схематично принцип построения маршрута движения по кормовому столу представлен на рисунке 2.

Разработка алгоритма автоматической системы позиционирования была направлена на обеспечение алгоритмической связи исполнительных механизмов электропривода ведущих колёс и системы технического зрения.



Рис. 2. Принцип построения маршрута с использованием системы технического зрения  
Fig. 2. Principle of designing route using the vision system

### Результаты и их обсуждение

Согласно разработанному алгоритму точность перемещения робота определяется его кинематическими параметрами, зависящими от размера робота, скорости и координат каждого его элемента.

При расчётах кинематики использовались следующие уравнения:

$$\Delta x_i = \vartheta_{oi} \cdot t_i \cdot \cos(\varphi_i); \quad (3)$$

$$\Delta y_i = \vartheta_{oi} \cdot t_i \cdot \sin(\varphi_i); \quad (4)$$

$$\vartheta_o = r \cdot \omega; \quad (5)$$

$$\vartheta_o = R \cdot \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}, \quad (6)$$

где  $\Delta x_i, \Delta y_i$  – приращения координаты по осям  $x, y$  на  $i$ -ом участке пути;  $\vartheta_{oi}$  – линейная скорость центра масс робота на  $i$ -ом участке пути;  $t_i$  – время движения на  $i$ -ом участке пути;  $r$  – радиус приводных колес робота;  $R$  – радиус траектории движения центра масс робота по окружности.

Динамическое управление разработанным роботизированным устройством устанавливается через взаимосвязь габаритных размеров робота, скоростью движения, действующими силами, приложенными к его элементам, и значением вращающего момента ведущих колёс.

При рассмотрении динамических характеристик роботизированного устройства решалась задача управления вращающим моментом каждого электропривода ведущего колеса при нормальном и смещённом центре масс.

Итоговые уравнения, полученные в ходе решения:

$$M_1 = \frac{\lambda m_1 g}{R} \cdot c; \quad (7)$$

$$M_2 = \lambda g \cdot \left( \frac{m_2}{R} + \frac{m_3}{r} \right) \cdot b \quad (8)$$

$$m_1(m_2, m_3) = a + b \cdot m_2 + c \cdot m_2^2 + d \cdot m_2^3 + e \cdot m_2^4 + f \cdot m_3 + g \cdot m_3^2 + h \cdot m_3^3 + i \cdot m_3^4 + j \cdot m_3^5, \quad (9)$$

где  $M_1, M_2$  – моменты двигателей, управляющих соответственно вращением правого и левого приводного колёс;  $\lambda$  – коэффициент трения (шина – асфальт);  $R$  – радиус приводных колес;  $r$  – радиус переднего вспомогательного колеса;  $m_1, m_2, m_3$  – массы,

соответственно приходящиеся на правое приводное, левое приводное и переднее вспомогательное колёса;  $b, c$  – расстояния от края робота до центра масс (рис. 3).

Эмпирически получена матрица значений  $m_1, m_2, m_3$  при изменении положения центра масс робота (табл.). Каждая ячейка содержит данные в долях от всей массы робота  $m$  (рис. 3). При оцифровке матрицы выведены уравнения:

$$m = m_1 + m_2 + m_3; \quad (10)$$

$$m_1' = \frac{m_1}{m}; m_2' = \frac{m_2}{m}; m_3' = \frac{m_3}{m}; \quad (11)$$

$$m' = m_1' + m_2' + m_3' = 1. \quad (12)$$

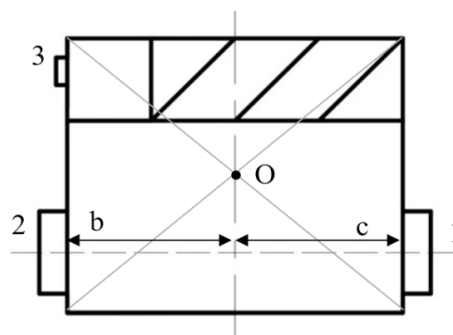


Рис. 3. Условная схема подравнителя кормосмеси на кормовом столе:

1 – правое приводное колесо; 2 – левое приводное колесо;  
3 – переднее вспомогательное колесо;  
O – условный центр масс робота

Fig. 3. Conditional operation scheme of the feed mixture leveler on the feed table:

1 – right drive wheel; 2 – left drive wheel;  
3 – front auxiliary wheel;  
O – conditional center of mass of the robot

Матрица распределения масс на точки опоры робота при отработке поворота

Таблица

Matrix of mass distribution on the robot support points when working out a turn

Table

| № сценария<br>Scenario number | Структура ячеек таблицы / Table cell structure    |        |        |        |        |                                                   |        |        |        |        |
|-------------------------------|---------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                               | Точка опоры 3 (рис. 3) / Support point 3 (Fig. 3) |        |        |        |        |                                                   |        |        |        |        |
|                               | Точка опоры 3 (рис. 2) / Support point 3 (Fig. 2) |        |        |        |        | Точка опоры 3 (рис. 1) / Support point 3 (Fig. 1) |        |        |        |        |
| 1                             | 0,6993                                            |        | 0      |        | 0      |                                                   | 0      |        | 0      |        |
|                               | 0                                                 | 0,3024 | 0      | 0      | 0      | 0                                                 | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 2                             | 0,6033                                            |        | 0,5747 |        | 0      |                                                   | 0      |        | 0      |        |
|                               | 0,0975                                            | 0,3007 | 0      | 0,4268 | 0      | 0                                                 | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 3                             | 0,5103                                            |        | 0,5096 |        | 0,5053 |                                                   | 0      |        | 0      |        |
|                               | 0,1850                                            | 0,3042 | 0,0709 | 0,4211 | 0      | 0,4967                                            | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 4                             | 0,4165                                            |        | 0,4065 |        | 0,4243 |                                                   | 0,4196 |        | 0      |        |
|                               | 0,2871                                            | 0,2969 | 0,1714 | 0,4228 | 0,0719 | 0,5055                                            | 0      | 0,5812 | 0      | 0      |
| 5                             | 0,3052                                            |        | 0,3074 |        | 0,3067 |                                                   | 0,2994 |        | 0,2961 |        |
|                               | 0,4015                                            | 0,2929 | 0,2813 | 0,4118 | 0,1956 | 0,4987                                            | 0,1262 | 0,5749 | 0      | 0,7046 |

Анализ таблицы показал, что при попадании центра масс на главную диагональ представленной матрицы (выделено зелёным цветом в таблице 1 и на рисунке 4) робот находится в состоянии равновесия, опираясь лишь на правое приводное и переднее вспомогательное колёса. На левое приводное колесо нагрузка не оказывается.

У реального робота нормальное расположение центра масс смещено в область под главной диагональю, поэтому необходимо приложить большое усилие на свободный угол, чтобы робот завалился.

По матрице данных построена плоскость (рис. 5). В программе TableCurve 3D v4.0 найдены коэффициенты выведенной зависимости (9):

$a = -0.105492992154444937$ ;  $b = -0.968638565161313026$ ;

$c = -0.493010767949052054$ ;  $d = 2.00651268530310107$ ;

$e = -2.50891795828501917$ ;  $f = 10.8902880333221492$ ;

$g = -49.8677123663848979$ ;  $h = 102.298062603272588$ ;

$i = -102.835458681764415$ ;  $j = 40.589025566643145$ .

Уравнения (1)–(3) описывают вращающие моменты шаговых двигателей. Рассчитав эти значения для конкретных параметров, можно обеспечить алгоритмическую связь между системой позиционирования и платой управления электродвигателем.

Разработанный робот и система автоматического позиционирования были испытаны на базе ЗАО «Совхоз имени Ленина» в 4 квартале 2022 г. В ходе испытаний установлено соответствие выходных реакций исполнительных устройств роботизированного устройства входным командам автоматической системы позиционирования.

### Выводы

Разработанная автоматическая система позиционирования позволяет построить маршрут роботизированного технического средства с учётом границы разброса кормовой смеси на кормовом столе. При этом распределение мощности на электропривод ведущих колёс происходит с учётом распределения масс робота в момент поворота.

### Список литературы

1. Tian F., Wang X., Yu S., Wang R., Song Zh., Yan Y., Li F., Wang Zh., Yu Zh. Research on navigation path extraction and obstacle avoidance strategy for pusher robot in dairy farm. *Agriculture*. 2022;12(7):1008. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071008>
2. Tian F., Hu G., Yu S., Wang R., Song Zh., Yan Y., Li F., Wang Zh., Yu Zh. Navigation path extraction and experimental research of pusher robot based on binocular vision. *Applied Sciences*. 2022;12(13):6641. <https://doi.org/10.3390/app12136641>
3. Hou P., Pan H., Guo Ch. Simulation research for mobile robot path planning based on improved artificial potential field method

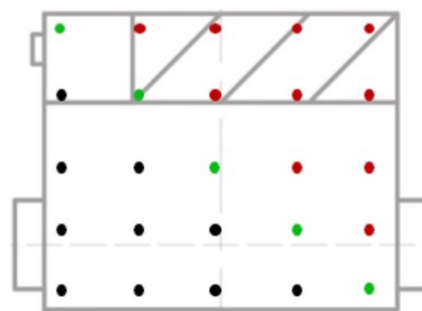


Рис. 4. Схематическое распределение масс на точки опоры робота

Fig. 4. Schematic distribution of masses on the robot's support points

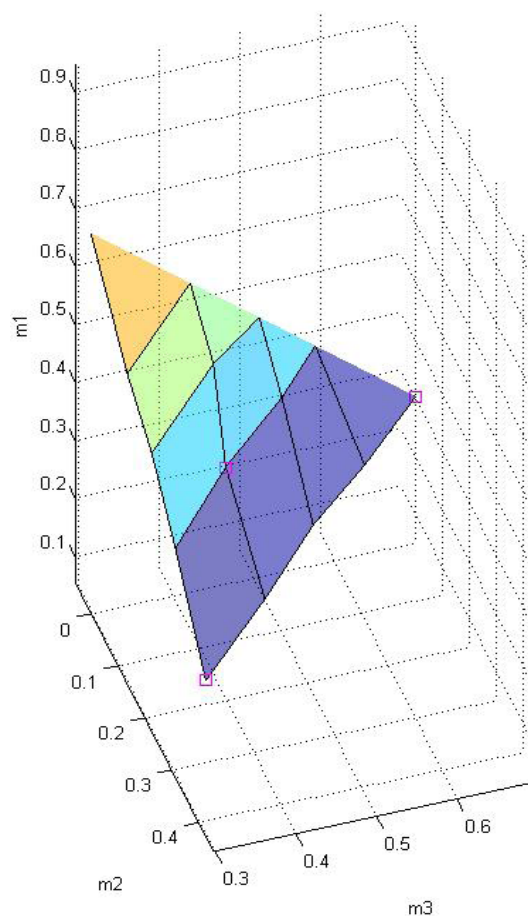


Рис. 5. Плоскость, характеризующая зависимость масс

Fig. 5. Plane characterizing the relationship of masses

### References

1. Tian F., Wang X., Yu S., Wang R., Song Zh., Yan Y., Li F., Wang Zh., Yu Zh. Research on navigation path extraction and obstacle avoidance strategy for pusher robot in dairy farm. *Agriculture*. 2022;12(7):1008. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071008>
2. Tian F., Hu G., Yu S., Wang R., Song Zh., Yan Y., Li F., Wang Zh., Yu Zh. Navigation path extraction and experimental research of pusher robot based on binocular vision. *Applied Sciences*. 2022;12(13):6641. <https://doi.org/10.3390/app12136641>
3. Hou P., Pan H., Guo Ch. Simulation research for mobile robot path planning based on improved artificial potential field method

recommended by the AsiaSim. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. 2017;8(2):1750046. <https://doi.org/10.1142/S1793962317500465>

4. Zhang C., Yong L., Chen Y., Zhang S., Ge L., Wang S., Li W. A Rubber-tapping robot forest navigation and information collection system based on 2D LiDAR and a gyroscope. *Sensors*. 2019;19(9):2136. <https://doi.org/10.3390/s19092136>

5. Yang Sh., Liang Sh., Zheng Y., Tan Y., Xiao Zh., Li B., Liu X. Integrated navigation models of a mobile fodder-pushing robot based on a standardized cow husbandry environment. *Transactions of the ASABE*. 2020;63(2):221-230. <https://doi.org/10.13031/trans.13365>

6. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M., Kuznetsov Y.A., Kravchenko I.N., Kalashnikova L.V. Modeling of mobile TMR mixer operation. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):193-198. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-21>

7. Купреенко А.И., Исаев Х.М.О., Михайличенко С.М. Настройка автоматического кормового вагона на заданную норму выдачи // Агроинженерия. 2020. № 4 (98). С. 20-25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-4-20-25>

8. Булатов С.Ю., Зыкин А.А., Миронов К.Е., Сергеев А.Г., Шкилев Н.П. Смеситель-дозатор сухих сыпучих материалов // Техника и оборудование для села. 2023. № 1 (307). С. 30-32. EDN: ECOOWY

9. Булатов С.Ю., Зыкин А.А., Нечаев В.Н., Сергеев А.Г., Шамин А.Е. Модель приготовления кормов в условиях малых форм хозяйствования // Техника и оборудование для села. 2023. № 4 (310). С. 26-30. EDN: LIHQCT

10. Алешкин А.В., Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Низовцев С.Л. Обоснование конструктивных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 37-51. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>

11. Pavkin D., Nikitin E., Shilin D., Belyakov M., Golyshev I., Mikhailichenko S., Chepurina E. Development results of a cross-platform positioning system for a robotics feed system at a dairy cattle complex. *Agriculture*. 2023;13(7):1422. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071422>

12. Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Nikitin E.A., Kiryushin I.A. Designing and simulating the control process of a feed pusher robot used on a dairy farm. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10665. <https://doi.org/10.3390/app112210665>

13. Никитин Е.А., Дорохов А.С. Модернизация технологических процессов в животноводстве путём использования малогабаритных роботизированных машин // Аграрная наука – сельскому хозяйству: Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции: В 2 кн. Барнаул, 2020. С. 59-61.

#### Сведения об авторе

**Никитин Евгений Александрович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5, строение 1; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>; [evgeniy.nicks@yandex.ru](mailto:evgeniy.nicks@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 20.07.2023; поступила после рецензирования и доработки 14.11.2023; принята к публикации 14.11.2023

recommended by the AsiaSim. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. 2017;8(2):1750046. <https://doi.org/10.1142/S1793962317500465>

4. Zhang C., Yong L., Chen Y., Zhang S., Ge L., Wang S., Li W. A Rubber-tapping robot forest navigation and information collection system based on 2D LiDAR and a gyroscope. *Sensors*. 2019;19(9):2136. <https://doi.org/10.3390/s19092136>

5. Yang Sh., Liang Sh., Zheng Y., Tan Y., Xiao Zh., Li B., Liu X. Integrated navigation models of a mobile fodder-pushing robot based on a standardized cow husbandry environment. *Transactions of the ASABE*. 2020;63(2):221-230. <https://doi.org/10.13031/trans.13365>

6. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M., Kuznetsov Y.A., Kravchenko I.N., Kalashnikova L.V. Modeling of mobile TMR mixer operation. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):193-198. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-21>

7. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhaylichenko S.M. Adjusting the automatic feed wagon to the selected feeding rate. *Agricultural Engineering*. 2020;4(98):20-25. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-4-20-25>

8. Bulatov S.Yu., Zykin A.A., Mironov K.E., Sergeev A.G., Shkilev N.P. Dosing mixer for dry bulk materials. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;1:30-32. (In Rus.)

9. Bulatov S.Yu., Zykin A.A., Nechaev V.N., Sergeev A.G., Shamin A.E. Model of Feed Preparation in the Conditions of Small Farms. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;4:26-30. (In Rus.)

10. Aleshkin A.V., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovtsev S.L. Substantiation of the structural and technological parameters of the working body of the milling grain shredder. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):37-51. (In Rus.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>

11. Pavkin D., Nikitin E., Shilin D., Belyakov M., Golyshev I., Mikhailichenko S., Chepurina E. Development results of a cross-platform positioning system for a robotics feed system at a dairy cattle complex. *Agriculture*. 2023;13(7):1422. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071422>

12. Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Nikitin E.A., Kiryushin I.A. Designing and simulating the control process of a feed pusher robot used on a dairy farm. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10665. <https://doi.org/10.3390/app112210665>

13. Nikitin E.A., Dorokhov A.S. Modernization of technological processes in livestock farming through the use of small-sized robotic machines. In: *Agricultural science's contribution to agriculture. Proceedings of XV International Scientific and Practical Conference in 2 books*. Barnaul, 2020:59-61. (In Rus.)

#### Author Information

**Evgeniy A. Nikitin**, CSc (Eng), Senior Research Engineer; Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>; [evgeniy.nicks@yandex.ru](mailto:evgeniy.nicks@yandex.ru)

Received 20.07.2023; revised 14.11.2023; accepted 14.11.2023

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.313

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-37-46>

## Полуаналитическая модель взаимодействия дисковой секции лушильника с неоднородной по глубине почвой

**Ю.В. Константинов**

Чувашский государственный аграрный университет; г. Чебоксары, Россия

yukonsc@yandex.ru

**Аннотация.** Тяговое сопротивление дисковой секции лушильника определяет удельные энергетические затраты на обработку почвы. С целью минимизации затрат по определению тягового сопротивления секции в зависимости от параметров лушильника и свойств почвы произведено математическое моделирование взаимодействия секции лушильника с почвой. Построена полуаналитическая модель с учетом неоднородности почвы по глубине и постоянства заглубления, поступательной скорости и угла атаки секции лушильника. Показано, что в случае неоднородности почвы только по глубине ее свойства можно охарактеризовать с помощью двух эмпирических постоянных и коэффициента трения почвы о поверхность дисков. Кинематический параметр дисковой секции, равный отношению окружной скорости на лезвиях дисков к поступательной скорости лушильника, определяется свойствами почвы, относительным заглублением, равным отношению максимальной глубины обработки к радиусу дисков, и углом атаки секции лушильника. Анализ моментов сил сопротивления почвы резанию и трению показал, что в случае пренебрежимо малых сил трения в подшипниках дисков в неоднородной по глубине почве дисковая секция лушильника вращается с угловой скоростью, при которой минимальна потребная мощность секции для обработки почвы. Получены явные выражения для потребной мощности и тягового сопротивления секции лушильника в зависимости от числа дисков, угла атаки секции лушильника, относительного заглубления, радиуса дисков и свойств почвы. По полученным выражениям можно определять тяговое сопротивление секции лушильника со сферическими дисками. Сравнение с опубликованными полевыми экспериментами показало, что максимальная относительная погрешность определения тягового сопротивления дисковой секции лушильника с плоскими дисками при лушении стерни составила 3,3%, а для дисковой секции со сферическими дисками в почвенном канале погрешность составила 2,6%.

**Ключевые слова:** полуаналитическая модель, неоднородность почвы по глубине, дисковая секция лушильника, угол атаки, относительное заглубление, кинематический параметр, мощность, тяговое сопротивление

**Для цитирования:** Константинов Ю.В. Полуаналитическая модель взаимодействия дисковой секции лушильника с неоднородной по глубине почвой // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 37-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-37-46>

## ORIGINAL ARTICLE

## Semi-analytical model of the interaction of a harrow disc gang with variable-depth soil

**Yu. V. Konstantinov**

Chuvash State Agrarian University; Cheboksary, Russia

yukonsc@yandex.ru

**Abstract.** The draft force of a harrow disc gang determines the specific energy cost of tillage. To minimize the cost of determining the draft force of the disc gang in relation to the harrow parameters and soil properties, the author carried out a mathematical modeling of the interaction of the harrow gang with the soil. The semi-analytical model has been built on the assumption of variable depth soil, constancy of depth, forward speed and approach angle of the harrow. It is shown that when the soil is variable only in depth, it can be characterised by two empirical constants and the coefficient of friction of the soil on the disc surface. The kinematic parameter of the disc gang, equal to the ratio of the circumferential speed on the disc blades to the forward speed of the harrow, is determined by the soil properties, the relative depth, equal to the ratio of the working depth to the radius of the discs, and the approach angle of the harrow gang. Based on the analysis of the moments of the soil resistance forces

to cutting and friction, the author has shown that when the friction forces in the disc bearings in the variable depth soil are negligibly small, the disc gang of the harrow rotates at an angular speed that provides the minimum possible power of the harrow gang required for tillage. Explicit expressions are obtained for the required power and tractive force of the harrow gang as a function of the number of discs, the angle of approach of the harrow gang, the relative depth, the radius of the discs and the soil properties. Their comparison with published field experiments showed that the maximum relative error in determining the draft of a harrow gang with flat discs was 3.3% for post-harvest stubble harrowing, and 2.6% for a harrow gang with spherical discs in a tillage bin.

**Keywords:** semi-analytical model, variable depth soil, disc harrow, angle of approach, relative depth, kinematic parameter, power, draft resistance

**For citation:** Konstantinov Yu.V. Semi-analytical model of the interaction of a harrow disc gang with variable-depth soil. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):37-46. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-37-46>

## Введение

Лущение стерни является обязательным агротехническим приёмом как в отвальной, так и безотвальной системах обработки почвы. В качестве рабочих органов дисковых лущильников обычно используются сферические диски<sup>1</sup>. Плоские диски принято использовать в зонах, подверженных ветровой эрозии, поскольку при обработке почвы такими дисками большая часть растительных остатков остаётся на ее поверхности, эти диски меньше распыляют почву и не выносят на поверхность её нижние влажные слои. Среди наиболее распространенных лущильников ЛД-10 (ЛДГ-10) выпускалось с плоскими дисками около 30%<sup>1</sup>.

Тяговое сопротивление дисковой секции лущильника, определяющее энергозатраты на обработку почвы, является наиболее важной силовой характеристикой дискового лущильника. Чаще всего оно находится экспериментально в поле или в почвенном канале лаборатории [1-3]. Математическое моделирование позволяет определять тяговое сопротивление диска с наименьшими затратами.

Величина тягового сопротивления определяется не только параметрами самого лущильника, но и свойствами обрабатываемой почвы. При рассмотрении взаимодействия лущильника и почвы нужно учитывать механическую неоднородность почвы [4], проявляющуюся в изменении плотности и твёрдости почвы по глубине [5].

С увеличением глубины резания как при блокированном, так и полублокированном резании изменяется удельное сопротивление чистому резанию<sup>2</sup>, поэтому математическая модель должна учитывать изменение удельного давления почвы на круговой сегмент диска в почве и удельного сопротивления

резанию дугой его лезвия с изменением глубины резания диска.

Обзор источников литературы показал, что известные модели взаимодействия с почвой плоских дисков сошников [6, 7], батареи из дисков [8] и других рабочих органов не учитывают неоднородности почвы по глубине. Таким образом, разработка более совершенных методов расчёта, учитывающих действительный технологический процесс земледельческих орудий и реальные свойства почвы, остается актуальной задачей [4].

Математические модели должны быть простыми и адекватными, то есть определять искомые величины с удовлетворительной погрешностью<sup>3</sup>. Этим требованиям отвечают полуаналитические модели, имеющие решение в аналитической форме, содержащей эмпирические постоянные коэффициенты. Они позволяют не только рассчитывать тяговое усилие основного диска однодискового сошника [6, 7], но и решать задачи оптимизации функционирования дискового ножа [9].

**Цель исследований:** построить простую полуаналитическую модель взаимодействия с неоднородной по глубине почвой дисковой секции пассивного лущильника с плоскими дисками с учётом количества дисков секции, радиуса дисков, максимальной глубины обработки, угла атаки и свойств почвы, используя эмпирические постоянные; показать, что полученное выражение позволяет рассчитывать также тяговое сопротивление дисковой секции со сферическими дисками.

## Материалы и методы

Полуаналитическая модель взаимодействия плоского диска лущильника с однородной почвой была построена нами ранее [10]. На базе этой модели продолжим развивать модель взаимодействия дисковой

<sup>1</sup> Стрельбицкий В.Ф. Дисковые почвообрабатывающие машины: монография. М.: Машиностроение, 1978. 135 с.

<sup>2</sup> Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами: монография. М.: Машиностроение, 1968. 376 с.

<sup>3</sup> Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. М.: КомКнига, 2007. 192 с. EDN: QJRGDD.

секции лушителя и неоднородной по глубине почвой. Пусть дисковый лушитель движется поступательно с постоянной скоростью  $v_n$ , а все  $n$  дисков его секции погружены на глубину  $h$  в неоднородную по глубине почву. Поскольку диски секции закреплены на одной оси, они вращаются с некоторой одинаковой постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Режим работы секции лушителя характеризуется углом атаки  $\alpha$ , безразмерным относительным заглублением  $\xi = h/r$  и безразмерным кинематическим параметром  $\lambda = \omega r / (v_n \cos \alpha)$ , где  $r$  – радиус дисков лушителя.

Поскольку диски секции лушителя параллельны между собой, а почва является неоднородной только по глубине, то каждый из них одинаково взаимодействует с почвой. Поэтому для определения ее силовых характеристик достаточно рассмотреть взаимодействие с почвой одного из дисков секции лушителя (рис. 1).

Начало подвижной прямоугольной системы координат, связанной с диском, поместим в его центре, направив ось  $Ox$  в направлении вектора поступательной скорости лушителя, ось  $Oz$  направим вертикально вниз, а ось  $Oy$  – перпендикулярно этим двум осям в сторону, соответствующей правой системе координат. Свяжем с диском также вторую подвижную систему координат  $Ox_1y_1z$ , ось  $Ox_1$  которой направим горизонтально в плоскости диска так, чтобы угол между осями  $Ox$  и  $Ox_1$  был равен углу атаки  $\alpha$ , а ось  $Oy_1$  была направлена по оси вращения диска (рис. 1).

Нормальные составляющие вектора скорости почвенной частицы и контактирующей с ней точкой

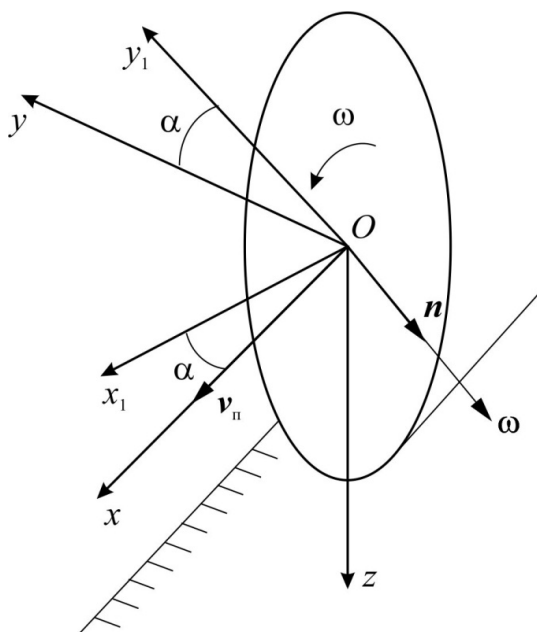


Рис. 1. Почвообрабатывающий диск и связанные с ним системы координат

Fig. 1. Tillage disc and associated coordinate systems

диска одинаковы. Поэтому сила трения частицы почвы о диск направлена против векторной проекции  $v'$  на плоскость диска вектора скорости  $v$  точки диска, контактирующей с этой частицей (рис. 2).

Поле векторных проекций скоростей точек диска на плоскость диска соответствует вращательному движению диска с одновременным поступательным движением со скоростью  $v_n \cos \alpha$  в направлении оси  $Ox_1$ . Поэтому его мгновенный центр скоростей расположен на оси  $Oz$  в точке  $C(0; a)$ , (где  $a = r/\lambda$ ), координаты которой и координаты точки  $M$  указаны для плоской системы координат  $x_1Oz$  (рис. 2).

На круговой сегмент диска, контактирующий с почвой, действует плоская система распределенных сил трения (рис. 2a). Приводя эту систему сил к центру диска  $O$ , заменим ее эквивалентной системой: главным вектором  $F_r$ , приложенным в центре приведения  $O$ , и парой с моментом, равным главному моменту  $m_o$  системы распределенных сил трения относительно точки  $O$ .

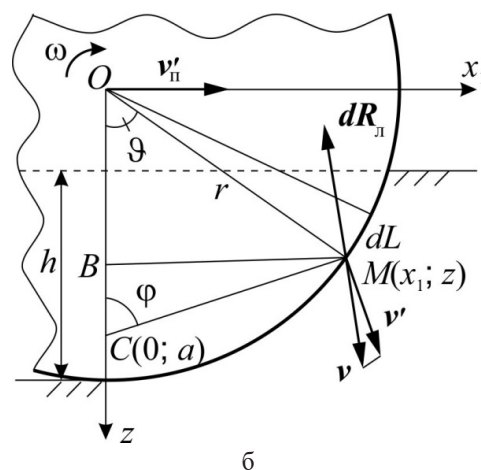
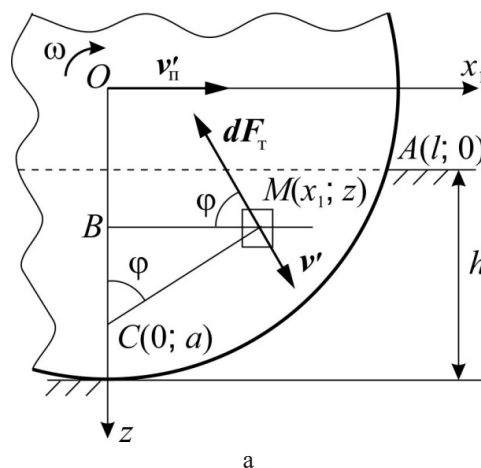


Рис. 2. Схема взаимодействия с почвой элементарной площадки кругового сегмента диска (а) и элементарной дуги лезвия диска (б)

Fig. 2. Interaction scheme between the soil and the elementary area of a circular disc segment (a) and the elementary arc of a disc blade (b)

Найдём момент  $m_o$ . На произвольную элементарную площадку контактирующего с почвой кругового сегмента диска, содержащую точку  $M(x_1; z)$  и имеющую площадь  $dS = dx_1 dz$ , действует элементарная сила трения о почву  $dF_T$ . Эта сила направлена против вектора  $\mathbf{v}'$  – векторной проекции вектора абсолютной скорости  $\mathbf{v}$  точки  $M(x_1; z)$  этой площадки на плоскость диска, то есть перпендикулярно отрезку  $CM$  (рис. 2а). Величина этой силы равна  $dF_T = fp_1(z)dx_1 dz$ , где  $f$  – коэффициент трения почвы о стальную поверхность диска, а  $p_1(z)$  – давление почвы на рассматриваемую площадку, зависящее от глубины её расположения.

Сила  $dF_T$  образует с отрицательным направлением оси  $Ox_1$  угол  $\varphi$  (рис. 2а), для которого из прямоугольного треугольника  $MBC$  находим

$$\cos\varphi = \frac{a-z}{\sqrt{x_1^2 + (a-z)^2}}, \quad \sin\varphi = \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + (a-z)^2}}. \quad (1)$$

Примем направление вращения диска за положительное направление моментов сил. Тогда момент, который создаёт элементарная сила трения, действующая на элементарную площадку, содержащую точку  $M(x_1; z)$ , будет равен

$$dm_o = dF_T \cos\varphi \cdot z - dF_T \sin\varphi \cdot x_1.$$

Подставляя равенства (1) в последнее равенство и вычисляя двойной интеграл по круговому сегменту  $S$ , контактирующему с почвой, получим искомый главный момент относительно центра диска (оси вращения) системы сил трения почвы, действующих на этот сегмент:

$$m_o = -f \iint_S p_1(z) \frac{x_1^2 + (z-a)z}{\sqrt{x_1^2 + (z-a)^2}} dx_1 dz. \quad (2)$$

Отметим, что при  $p_1(z) = p = \text{const}$  из равенства (2) следует, как частный случай, формула для главного момента в случае взаимодействия диска с однородной почвой [10].

Из прямоугольного треугольника  $MBC$  (рис. 2а) следует, что модуль векторной проекции вектора скорости на плоскость диска произвольной точки диска  $M(x_1; z)$  равен  $v' = \omega \cdot MC$ . Эта проекция направлена перпендикулярно отрезку  $MC$ , соединяющему данную точку с мгновенным центром  $C$ . Поскольку сила  $dF_T$  направлена противоположно вектору  $\mathbf{v}'$ , элементарная мощность, необходимая для преодоления этой элементарной силы трения, равна

$$dP_T = -\mathbf{v}' \cdot d\mathbf{F}_T = fp_1(z)\omega\sqrt{x_1^2 + (a-z)^2} dx_1 dz.$$

Мощность  $P_T$ , необходимая для преодоления сил трения, действующих на круговой сегмент диска

в почве, находится двойным интегрированием по этому сегменту элементарной мощности  $dP_T$ :

$$P_T = f\omega \iint_S p_1(z)\sqrt{x_1^2 + (a-z)^2} dx_1 dz. \quad (3)$$

При  $p_1(z) = p = \text{const}$  из равенства (3) следует, как частный случай, формула для этой мощности в случае взаимодействия диска с однородной почвой [10].

На фаски лезвия диска действует система распределённых сил сопротивления почвы расклиниванию фасками. Выбрав в качестве центра приведения этой системы сил центр  $O$ , заменим систему элементарных реакций почвы на лезвие диска эквивалентной системой: главным вектором  $\mathbf{R}_n$ , приложенным в центре приведения, и парой с моментом  $M_o$ , равным главному моменту системы этих элементарных реакций относительно точки  $O$ .

Найдём  $M_o$ . Рассмотрим произвольную элементарную дугу лезвия диска длиной  $dL = r \cdot d\vartheta$  с точкой  $M(r\sin\vartheta; r\cos\vartheta)$  на ней, координаты которой указаны в плоской системе координат  $x_1 Oz$  (рис. 2б). Для дисков с острым лезвием элементарное сопротивление почвы расклиниванию фасками лезвия дуги – вектор  $d\mathbf{R}_n$  – лежит в плоскости диска, и этот вектор направлен против векторной проекции на плоскость диска  $\mathbf{v}'$  вектора скорости  $\mathbf{v}$  точки  $M$  [10]. Согласно В.Ф. Стрельбицкому<sup>1</sup> лезвия дисков луцильника быстро затупляются. Для затупленного лезвия эта реакция почвы выходит из плоскости диска, при этом вектор  $d\mathbf{R}_n$  направлен против вектора скорости  $\mathbf{v}$ :

$$d\mathbf{R}_n = -Q_1(r\cos\vartheta) \cdot \frac{\mathbf{v}}{v} r d\vartheta, \quad (4)$$

где  $Q_1(r\cos\vartheta)$  – удельное сопротивление почвы расклиниванию фасками лезвия дуги  $dL$  (на глубине  $r-z = r - r\cos\vartheta$ ).

Движение точки  $M_1$  диска с радиус-вектором  $\mathbf{r}_1 = x_1 \mathbf{i}_1 + y_1 \mathbf{j}_1 + z \mathbf{k}$ , где  $\mathbf{i}_1, \mathbf{j}_1$  и  $\mathbf{k}$  – орты системы координат  $Ox_1 y_1 z$ , можно представить как сложное движение, относительным движением которого является вращательное движение диска, а переносным – его поступательное движение.

Относительную скорость  $\mathbf{v}_r$  рассматриваемой точки найдём по формуле Эйлера:

$$\mathbf{v}_r = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_1 = -\omega z \mathbf{i}_1 + \omega x_1 \mathbf{k},$$

где вектор  $\boldsymbol{\omega}$  направлен противоположно оси  $Oy_1$  (рис. 1).

Переносная скорость  $\mathbf{v}_e$  любой точки диска равна вектору  $\mathbf{v}_n$  (рис. 1), то есть

$$\mathbf{v}_e = v_n \cos \alpha \mathbf{i}_1 - v_n \sin \alpha \mathbf{j}_1.$$

Поэтому искомый вектор скорости равен

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_e = (v_n \cos \alpha - \omega z) \mathbf{i}_1 - v_n \sin \alpha \mathbf{j}_1 + \omega x_1 \mathbf{k},$$

а его модуль определяется формулой:

$$v = \sqrt{v_n^2 - 2v_n \omega \cos \alpha z + \omega(x_1^2 + z^2)}.$$

Для рассматриваемой точки  $M$  на лезвии диска  $x_1 = r \sin \vartheta$ ,  $z = r \cos \vartheta$ . Подстановка этих двух равенств в два предыдущих позволяет определить вектор скорости точки  $M$ :

$$\mathbf{v} = v_n \cos \alpha ((1 - \lambda \cos \vartheta) \mathbf{i}_1 - tg \alpha \mathbf{j}_1 + \lambda \sin \vartheta \mathbf{k}), \quad (5)$$

его модуль:

$$v = v_n \cos \alpha \sqrt{1 + tg^2 \alpha + \lambda^2 - 2\lambda \cos \vartheta}. \quad (6)$$

Как следует из данных рисунка 2б и равенства (5), момент вектора  $\mathbf{v}$  относительно точки  $O$  равен

$$m_o(\mathbf{v}) = v_z r \sin \vartheta - v_{x1} r \cos \vartheta = r(\lambda - \cos \vartheta) v_n \cos \alpha.$$

Поэтому из равенств (4) и (6) следует, что момент элементарной реакции почвы  $d\mathbf{R}_n$  относительно точки  $O$  определяется равенством:

$$\begin{aligned} dM_o &= - \frac{Q_1(r \cos \vartheta) r d\vartheta}{v} m_o(\mathbf{v}) = \\ &= \frac{Q_1(r \cos \vartheta) r^2 (\cos \vartheta - \lambda) d\vartheta}{\sqrt{1 + tg^2 \alpha + \lambda^2 - 2\lambda \cos \vartheta}}. \end{aligned}$$

Вычисляя определенный интеграл в пределах от 0 до  $\vartheta_0 = \arccos(1 - \xi)$  от левой и правой частей последнего равенства, находим искомый момент:

$$M_o = r^2 \int_0^{\vartheta_0} \frac{Q_1(r \cos \vartheta) (\cos \vartheta - \lambda) d\vartheta}{\sqrt{1 + tg^2 \alpha + \lambda^2 - 2\lambda \cos \vartheta}}. \quad (7)$$

Поскольку сила  $d\mathbf{R}_n$  направлена противоположно вектору  $\mathbf{v}$ , то согласно равенству (4) элементарная мощность, необходимая для преодоления элементарной реакции почвы, действующей на рассматриваемую элементарную дугу лезвия, равна

$$dP_n = -\mathbf{v} \cdot d\mathbf{R}_n = Q_1(r \cos \vartheta) v r d\vartheta.$$

Вычисляя определённый интеграл в пределах от 0 до  $\vartheta_0$  от левой и правой частей последнего равенства, находим полную мощность  $P_n$ , необходимую для преодоления сил сопротивления почвы расклиниванию фасками всей режущей части лезвия диска:

$$P_n = r v_n' \int_0^{\vartheta_0} Q_1(r \cos \vartheta) \sqrt{1 + tg^2 \alpha + \lambda^2 - 2\lambda \cos \vartheta} d\vartheta, \quad (8)$$

где для краткости обозначено  $v_n' = v_n \cos \alpha$ .

Вектор элементарной нормальной реакции почвы  $d\mathbf{N}$  на элементарную площадку площадью  $dx_1 dz$ , содержащую точку  $M(x_1; z)$  (рис. 2а), равен

$$d\mathbf{N} = -p_1(z) dx_1 dz \cdot \mathbf{n},$$

где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к диску, направленный в сторону сминаемой круговым сегментом диска почвы (рис. 1).

Элементарная мощность, необходимая для преодоления реакции почвы  $d\mathbf{N}$ , равна  $dP_c = -d\mathbf{N} \cdot \mathbf{v} = p_1(z) dx_1 dz \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}$ , то есть окончательно

$$dP_c = p_1(z) v_n \sin \alpha dx_1 dz.$$

Вычислив двойной интеграл от левой и правой частей этого равенства по круговому сегменту  $S$ , контактирующему с почвой, найдём мощность, необходимую для преодоления сил сопротивления почвы смятию и перемещению круговым сегментом диска:

$$P_c = v_n \sin \alpha \iint_S p_1(z) dx_1 dz.$$

Обозначим через  $p$  среднее давление почвы на диск:

$$p = \frac{1}{S_1} \iint_S p_1(z) dx_1 dz,$$

где  $S_1$  – площадь кругового сегмента в почве. Тогда

$$P_c = p v_n \sin \alpha S_1 = p r^2 v_n \sin \alpha (\vartheta_0 - \sin \vartheta_0 \cos \vartheta_0).$$

Подставляя сюда выражение для угла  $\vartheta_0$ , выразим эту мощность через относительное заглубление  $\xi$ :

$$P_c = p r^2 v_n \sin \alpha \left( \arccos(1 - \xi) - (1 - \xi) \sqrt{2\xi - \xi^2} \right). \quad (9)$$

Мощность, потребная для функционирования одного диска секции луцильника, равна сумме мощности, необходимой для преодоления сил трения о боковые поверхности диска, мощности, необходимой для преодоления сопротивления почвы расклиниванию фасками его лезвия, и мощности, необходимой для преодоления сил сопротивления почвы смятию и перемещению круговым сегментом диска.

Поскольку секция луцильника содержит  $n$  одинаковых дисков, движущихся в почве в одинаковых условиях, то потребная мощность  $P$  для работы секции луцильника в  $n$  раз больше потребной мощности для функционирования одного диска секции:

$$P = n \cdot (P_t + P_n + P_c). \quad (10)$$

Поскольку интеграл, входящий в равенство (3), содержит неизвестную функцию  $p_1(z)$ , а интеграл из равенства (8) содержит неизвестную функцию  $Q_1(z)$ , то использовать полученные формулы для определения потребной мощности дисковой секции луцильника, обрабатывающего неоднородную по глубине почву, не удаётся. Это затруднение можно обойти.

### Результаты и их обсуждение

Равенство (8) явно выражает мощность  $P_n$  через кинематический коэффициент  $\lambda$ . Чтобы выразить явно через  $\lambda$  мощность  $P_t$  и момент  $m_o$ , выполним

замену переменных  $x = ru, z = rw$  в двойных интегралах (2) и (3):

$$m_o = -fr^3 \iint_{S'} p_1(rw) \frac{\lambda u^2 + (\lambda w - 1)w}{\sqrt{\lambda^2 u^2 + (\lambda w - 1)^2}} dudw,$$

$$P_\tau = fr^2 v'_n \iint_{S'} p_1(rw) \sqrt{\lambda^2 u^2 + (\lambda w - 1)^2} dudw,$$

где  $S'$  – круговой сегмент единичного радиуса, являющийся образом кругового сегмента  $S$ .

Продифференцировав частным образом по параметру  $\lambda$  под знаком двойного интеграла второе из двух последних равенств, с учётом первого из них, получим

$$\frac{\partial P_\tau}{\partial \lambda} = -\frac{m_o}{r} v'_n. \quad (11)$$

Частное дифференцирование равенства (8) по параметру  $\lambda$  под знаком определённого интеграла с учётом (7) приводит к следующему равенству:

$$\frac{\partial P_n}{\partial \lambda} = -\frac{M_o}{r} v'_n. \quad (12)$$

Поскольку из (9) следует, что  $\frac{\partial P_c}{\partial \lambda} = 0$ , то частное дифференцирование равенства (10) по параметру  $\lambda$  в силу равенств (11) и (12) даёт

$$\frac{\partial P}{\partial \lambda} = -\frac{v'_n}{r} \cdot n(m_o + M_o). \quad (13)$$

Диски секции луцильника, движущегося с постоянной поступательной скоростью, будут вращаться с постоянной угловой скоростью в случае, когда сумма всех реактивных моментов, приложенных к каждому из дисков секции, равна нулю, то есть

$$m_o + M_o = 0. \quad (14)$$

Решая это уравнение относительно кинематического параметра  $\lambda$ , находим  $\lambda = \lambda^*$  и угловую скорость вращения дисков секции луцильника  $\omega^* = \lambda^* v_n \cos \alpha / r$ .

Как следует из (14) и (13),  $\frac{\partial P}{\partial \lambda}(\lambda^*) = 0$ . Находя с помощью равенств (11)-(12) вторую производную  $\frac{\partial^2 P}{\partial \lambda^2}$ , несложно показать  $\frac{\partial^2 P}{\partial \lambda^2}(\lambda^*) > 0$ , следовательно, в точке  $\lambda = \lambda^*$  функция  $P(\lambda)$  имеет минимум, который является глобальным минимумом, что позволяет использовать для определения  $\lambda^*$  хорошо развитые численные методы оптимизации.

Пусть поступательная скорость луцильника и максимальная глубина обработки почвы постоянны, силы трения в подшипнике диска пренебрежимо малы, а почва является неоднородной только по глубине. Тогда секция дискового луцильника движется

с такой постоянной угловой скоростью, при которой минимальны суммарные затраты мощности на преодоление сил трения почвы о круговые сегменты дисков секции в почве, сил сопротивления почвы расклиниванию фасками лезвия дисков и сил сопротивления почвы смятию и перемещению круговыми сегментами дисков в почве.

Поскольку модель однородной почвы является частным случаем модели неоднородной почвы при  $p_1(z) = p = \text{const}$  и  $Q(z) = Q = \text{const}$ , то полученный результат является верным также и для однородной почвы, что было показано ранее для одного диска [10].

Поскольку почва неоднородна по глубине, ее давление на диск изменяется по глубине и является некоторой неизвестной функцией  $p_1(z)$ . Предположим, что эта функция непрерывна. Поскольку  $\sqrt{x_1^2 + (a-z)^2} > 0$  (при  $x_1 \neq 0$  и  $z \neq a$  одновременно), то по обобщенной теореме о среднем для двойного интеграла справедливым является равенство<sup>4</sup>:

$$\iint_S p_1(z) \sqrt{x_1^2 + (a-z)^2} dx_1 dz = p_1(z^*) \iint_S \sqrt{x_1^2 + (a-z)^2} dx_1 dz,$$

где  $p_1(z^*)$  – значение давления почвы на диск секции на некоторой промежуточной глубине  $r - h \leq z^* \leq r$ .

Предположим для упрощения модели, что  $p_1(z^*) \approx p$  (давление приближённо равно среднему давлению), подставив предыдущее равенство в (3), перейдем в полученном двойном интеграле к повторному интегралу:

$$P_\tau = 2fp\omega \int_{r-h}^r dz \int_0^{\sqrt{r^2-z^2}} \sqrt{x_1^2 + (a-z)^2} dx_1.$$

Сделав замену переменных  $x_1 = ru$  во внутреннем интеграле и замену переменных  $z = rt$  во внешнем, вычислим внутренний интеграл. В итоге выразим мощность  $P_\tau$  через следующий определённый интеграл:

$$P_\tau = fpr^2 \lambda v_n \cos \alpha \int_{1-\xi}^1 \left( \sqrt{1-t^2} \sqrt{\mu^2 - 2\mu t + 1} + (\mu - t)^2 \ln \frac{\sqrt{1-t^2} + \sqrt{\mu^2 - 2\mu t + 1}}{|\mu - t|} \right) dt, \quad (15)$$

где  $\mu = 1/\lambda$ .

В силу неоднородности почвы по глубине ее удельное сопротивление расклиниванию фасками лезвия диска изменяется по глубине и является некоторой неизвестной функцией  $Q_1(z)$ . Предположим, что эта функция непрерывна. Поскольку  $\sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha + \lambda^2 - 2\lambda \cos \vartheta} > 0$ , то по обобщенной

<sup>4</sup> Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. II. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 848 с. EDN: QJTKMX.

теореме о среднем для определённого интеграла справедливо равенство<sup>5</sup>:

$$\int_0^{\vartheta_0} Q_1(r \cos \vartheta) \sqrt{1 + tg^2 \alpha + \lambda^2 - 2\lambda \cos \vartheta} d\vartheta = \\ = Q_1(r \cos \vartheta^*) \int_0^{\vartheta_0} \sqrt{1 + tg^2 \alpha + \lambda^2 - 2\lambda \cos \vartheta} d\vartheta,$$

где  $Q_1(r \cos \vartheta^*)$  – значение удельного сопротивления почвы расклиниванию фасками лезвия диска в некоторой промежуточной точке дуги резания  $0 \leq \vartheta^* \leq \vartheta_0$ .

Введём для удобства обозначение  $Q = Q_1(r \cos \vartheta^*)$  и, подставив предыдущее равенство в (8), выразим мощность  $P_{\text{л}}$  через определённый интеграл:

$$P_{\text{л}} = Qrv_{\text{п}} \cos \alpha \int_0^{\vartheta_0} \sqrt{1 + tg^2 \alpha + \lambda^2 - 2\lambda \cos \vartheta} d\vartheta. \quad (16)$$

Чтобы воспользоваться формулами (15), (16) и (9), (10) для определения мощности  $P$ , потребной для работы секции дискового луцильника, необходимо предварительно определить величину кинематического параметра  $\lambda$  из трансцендентного уравнения (14). Однако для неоднородной почвы в общем случае это сделать не удаётся, поскольку момент  $m_o$  выражается через неизвестную функцию  $p_1(z)$ , а момент  $M_o$  выражается через неизвестную функцию  $Q_1(z)$ .

Поскольку потребная мощность почвообрабатывающего диска достигает минимума при  $\lambda = \lambda^* \approx 1$ , то естественно предположить, что эта мощность мало изменяется в некоторой окрестности точки  $\lambda = \lambda^*$ . Анализ зависимости мощности диска от параметров  $\lambda$ ,  $\xi$  и  $\alpha$  показал, что это действительно так.

Введём для сокращения числа независимых параметров исследуемых зависимостей безразмерные мощности диска [10]:

$$P_{\text{т}}^* = \frac{P_{\text{т}}}{fpr^2 v_{\text{п}} \cos \alpha}, \quad P_{\text{л}}^* = \frac{P_{\text{л}}}{Qrv_{\text{п}} \cos \alpha}. \quad (17)$$

Выразив из равенств (17) мощности через соответствующие безразмерные мощности и подставив их в равенство (10), получим

$$P = n[(fprP_{\text{т}}^* + QP_{\text{л}}^*)rv_{\text{п}} \cos \alpha + P_{\text{с}}], \quad (18)$$

где  $P_{\text{т}}^* = P_{\text{т}}^*(\lambda^*, \xi)$ ,  $P_{\text{л}}^* = P_{\text{л}}^*(\lambda^*, \xi, \alpha)$ .

Из (15)–(17) следует, что безразмерная мощность  $P_{\text{л}}^*$  является функцией трёх безразмерных параметров  $\lambda$ ,  $\xi$  и  $\alpha$ , определяющих режим работы диска, а безразмерная мощность  $P_{\text{т}}^*$  является функцией только двух из них ( $\lambda$  и  $\xi$ ). Эти функции задаются формулами (17), в которых мощности  $P_{\text{т}}$  и  $P_{\text{л}}$  определяются равенствами (15) и (16) через интегралы, которые можно найти известными численными методами.

<sup>5</sup> Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. I. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 614 с. EDN: QJTKNH.

Как следует из уравнения (14), величина безразмерного кинематического параметра  $\lambda^*$  зависит от относительного заглубления  $\xi$ , угла атаки  $\alpha$  и свойств обрабатываемой почвы. Согласно экспериментальным данным<sup>6</sup> при малых углах атаки диска  $\alpha$  кинематический параметр  $\lambda^*$  диска заключён в пределах  $0,85 \leq \lambda^* \leq 1,1$ .

По данным В.Ф. Стрельбицкого, глубина обработки почвы  $h$  луцильниками составляет 4...10 см. Радиус дисков луцильника обычно равен  $r = 45/2 = 22,5$  см. Поэтому диапазон относительных заглублений луцильника составляет  $0,15 < \xi < 0,5$ .

Анализ зависимости мощности  $P_{\text{т}}^*$  от  $\lambda$  и  $\xi$ , проведённый ранее, показал, что при указанных  $\xi$  и  $0,85 \leq \lambda \leq 1,1$  справедливо приближённое равенство  $P_{\text{т}}^*(\lambda, \xi) \approx P_{\text{т}}^*(1, \xi)$  [10].

С помощью Mathcad построены графики изменения мощности  $P_{\text{л}}^* \cos \alpha$  в зависимости от  $\lambda$  для фиксированного значения  $\xi = 0,5$  и  $\alpha = 0, 20, 35^\circ$  (рис. 3). Как показывают расчёты, для значений  $\xi = 0,3$  и  $0,1$  характер изменения мощности  $P_{\text{л}}^* \cos \alpha$  не меняется. На рисунке 4 приведены графики зависимости мощности  $P_{\text{л}}^* \cos \alpha$  от угла  $\alpha$  для значений  $\lambda = 0,85; 1,0; 1,1$  и значений  $\xi = 0,1; 0,3; 0,5$ . Отметим, что для  $\xi = 0,1$  пунктирная линия практически совпадает со штрихпунктирной линией.

Как следует из рисунков 3 и 4, при  $0,85 \leq \lambda \leq 1,1$  справедливо приближённое равенство  $P_{\text{л}}^*(\lambda, \xi, \alpha) \approx P_{\text{л}}^*(1, \xi, \alpha)$ . Значит, из равенства (18) при  $0,85 \leq \lambda \leq 1,1$  следует приближённое равенство для искомой мощности

$$P = n[(fprP_{\text{т}}^*(1, \xi) + QP_{\text{л}}^*(1, \xi, \alpha))rv_{\text{п}} \cos \alpha + P_{\text{с}}]. \quad (19)$$

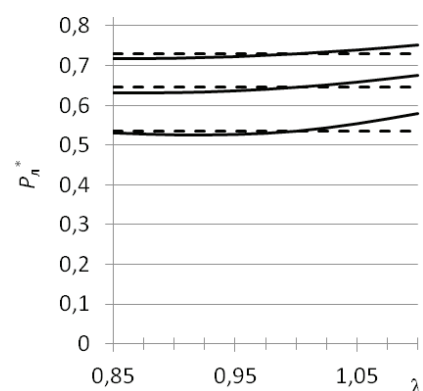


Рис. 3. Зависимость безразмерной мощности  $P_{\text{л}}^* \cos \alpha$  от кинематического коэффициента  $\lambda$ :

----- для фиксированного значения  $\xi = 0,5$ ;  
----- при  $\lambda = 1$

Fig. 3. Relationship between the dimensionless power  $P_{\text{л}}^* \cos \alpha$  and the parameter  $\lambda$ :

———— for a fixed value  $\xi = 0.5$ ; ———— when  $\lambda = 1$

<sup>6</sup> Нартов П.С. Дисковые почвообрабатывающие орудия. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1972. 184 с. EDN: SKWQBH.

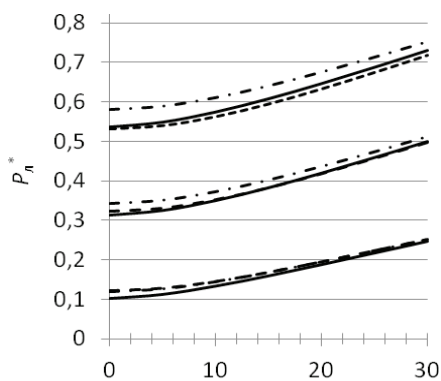


Рис. 4. Зависимость безразмерной мощности  $P_{\pi}^* \cos \alpha$  от угла атаки диска  $\alpha$ :

-----  $\lambda = 1$ ; - - - -  $\lambda = 0,85$ ; - · - ·  $\lambda = 1,1$

Fig. 4. Relationship between the dimensionless power  $P_{\pi}^* \cos \alpha$  and the angle of approach  $\alpha$ :

——  $\lambda = 1$ ; - - - -  $\lambda = 0.85$ ; - · - ·  $\lambda = 1.1$

При  $\lambda = 1$  интеграл в равенстве (15) выражается через элементарные функции, что с учётом первого из равенств (17) даёт

$$P_{\pi}^*(1, \xi) = \frac{32}{9} + \frac{(3\xi^2 - 4\xi - 16)\sqrt{4 - 2\xi} - \frac{\xi^3}{3} \ln\left(\frac{2 - \sqrt{4 - 2\xi}}{\sqrt{2\xi}}\right)}{9}.$$

При  $\lambda = 1$  интеграл в равенстве (16) упрощается, что с учётом второго из равенств (17) приводит к

$$P_{\pi}^*(1, \xi, \alpha) = \int_0^{\vartheta_0} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + 4 \sin^2 \frac{\vartheta}{2}} \frac{\vartheta}{2} d\vartheta.$$

Интеграл в последнем равенстве при  $\alpha \neq 0$  не выражается через элементарные функции. Но поскольку обычно  $\xi \leq 0,5$ , то есть  $\vartheta/2 \leq \vartheta_0/2 = \arccos(0,5)/2 < 0,53$ , то  $\sin(\vartheta/2) \approx \vartheta/2$  – с относительной ошибкой, меньшей  $0,53^3/6 < 2,5\%$ . Поэтому

$$P_{\pi}^*(1, \xi, \alpha) \approx \int_0^{\vartheta_0} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \vartheta^2} d\vartheta = \frac{\vartheta_0}{2} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \vartheta_0^2} + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{2} \ln \left| \vartheta_0 \operatorname{ctg} \alpha + \sqrt{1 + \vartheta_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} \right|.$$

Подставив в равенство (19) выражения для функций  $P_{\pi}^*(1, \xi)$ ,  $P_{\pi}^*(1, \xi, \alpha)$  и выражение (9) для мощности  $P_c$ , получим следующее явное приближённое выражение для мощности  $P$  секции дискового луцильника, потребной для обработки почвы:

$$\frac{P}{nv_{\pi}r} = Q \cos \alpha \left( \frac{\vartheta_0}{2} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \vartheta_0^2} + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{2} \ln (\vartheta_0 \operatorname{ctg} \alpha + \sqrt{1 + \vartheta_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}) \right) + pr \left\{ [\arccos(1 - \xi) - (1 - \xi) \sqrt{2\xi - \xi^2}] \sin \alpha + f \left[ -\frac{\xi^3}{3} \ln \left( \frac{2 - \sqrt{4 - 2\xi}}{\sqrt{2\xi}} \right) + \frac{(3\xi^2 - 4\xi - 16)\sqrt{4 - 2\xi} + \frac{32}{9}}{9} \right] \cos \alpha \right\},$$

где  $\vartheta_0 = \arccos(1 - \xi)$ .

Тяговое сопротивление дисковой секции луцильника  $F = P/v_{\pi}$ , поэтому приближённое явное выражение для тягового сопротивления секции луцильника примет следующий вид:

$$\frac{F}{nr} = Q \cos \alpha \left( \frac{\vartheta_0}{2} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \vartheta_0^2} + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{2} \ln (\vartheta_0 \operatorname{ctg} \alpha + \sqrt{1 + \vartheta_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}) \right) + pr \left\{ [\arccos(1 - \xi) - (1 - \xi) \sqrt{2\xi - \xi^2}] \sin \alpha + f \left[ -\frac{\xi^3}{3} \ln \left( \frac{2 - \sqrt{4 - 2\xi}}{\sqrt{2\xi}} \right) + \frac{(3\xi^2 - 4\xi - 16)\sqrt{4 - 2\xi} + \frac{32}{9}}{9} \right] \cos \alpha \right\}, \quad (20)$$

где  $\vartheta_0 = \arccos(1 - \xi)$ .

Расчёты по формуле (20) проще и быстрее проводить в современных математических пакетах Maple, MathCAD и т.д.

Поскольку направление проекции на горизонтальную плоскость равнодействующей нормальных сил реакций почвы на сферический диск и направление равнодействующей нормальных сил реакций почвы на плоский диск совпадают, то возможность использования формулы (20) для определения тягового сопротивления сферического диска зависит от величины результирующей силы трения почвы о его внутреннюю поверхность в почве. По сообщениям многих исследователей, в том числе П.С. Нартова<sup>6</sup>, её доля в тяговом сопротивлении диска невелика, и в этих случаях использование формулы (20) и для сферического диска не приведёт к существенным погрешностям.

Для подтверждения количественной адекватности построенной полуаналитической модели взаимодействия секции дискового луцильника с почвой были использованы результаты полевых экспериментов по пространственному динамометрированию дисковой секции из 8 плоских дисков диаметром 450 мм, опубликованные В.Ф. Стрельбицким.

Как указывает автор, механический состав исследуемого участка стерни представлял лёгкую глину. В слоях 0...5, 5...10, 10...15 см средняя твердость (по твердомеру Ревякина) составляла 10,8; 14,4; 17,6 кГ/см<sup>2</sup>, средняя влажность – соответственно 20,2; 22,4; 24,6%. Поскольку в экспериментах коэффициент трения почвы о диски не измерялся, то для него было принято наиболее вероятное значение:  $f = 0,5$ .

Глубина хода дисков составляла  $h = 90$  мм, то есть относительное заглубление  $\xi = h/r = 0,4$ .

На рисунке 5 изображены средние результаты полевого динамометрирования тягового сопротивления дисковой секции при лущении стерни, опубликованные В.Ф. Стрельбицким. Сплошной линией

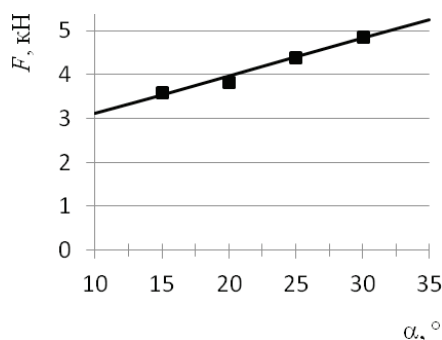


Рис. 5. Зависимость тягового сопротивления от угла  $\alpha$  для секции из плоских дисков:  
 $Q = 19,098 \text{ Н/см}$ ,  $p = 2,187 \text{ Н/см}^2$

Fig. 5. Relationship between draft force and angle  $\alpha$  for a gang of flat discs:  
 $Q = 19.098 \text{ N/cm}$ ,  $p = 2.187 \text{ N/cm}^2$

изображён график зависимости (20) при значениях  $Q = 19,098 \text{ Н/см}$  и  $p = 2,187 \text{ Н/см}^2$ , найденных методом наименьших квадратов в пакете Mathcad. Максимальная относительная погрешность определения тягового сопротивления дисковой секции по выражению (20) не превышает 3,3%, а средняя погрешность составляет 1,6%.

На рисунке 6 изображены средние результаты экспериментального определения тягового усилия батареи из 4 сферических дисков в почвенном канале [8]. Коэффициент трения почвы о диск в этих опытах также не измерялся, поэтому было принято значение:  $f = 0,5$ . Глубина хода дисков составляла  $h = 100 \text{ мм}$ , а диаметр –  $450 \text{ мм}$ , то есть относительное заглубление  $\xi = h/r = 0,444$ . Сплошной линией на этом рисунке изображён график зависимости (20) при значениях  $Q = 16,099 \text{ Н/см}$  и  $p = 0,748 \text{ Н/см}^2$ , найденных методом наименьших квадратов в пакете Mathcad. Как показали расчёты, максимальная относительная погрешность определения тягового усилия диска по выражению (20) составила 2,6%, а средняя – 2,0%. Отметим, что максимальная относительная погрешность

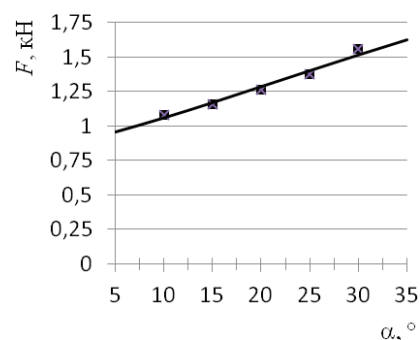


Рис. 6. Зависимость тягового сопротивления от угла  $\alpha$  для секции из сферических дисков:  
 $Q = 16,099 \text{ Н/см}$ ,  $p = 0,748 \text{ Н/см}^2$

Fig. 6. Relationship between draft force and angle  $\alpha$  for a gang of spherical discs:  
 $Q = 16.099 \text{ N/cm}$ ,  $p = 0.748 \text{ N/cm}^2$

определения тягового усилия при дискретно-элементном моделировании составила значительно большую величину – 22,2% [8].

### Выводы

1. Полуаналитическая модель взаимодействия дисковой секции лушителя с неоднородной по глубине почвой позволяет определить требуемую мощность секции дискового лушителя и её тяговое сопротивление в зависимости от количества дисков секции, радиуса дисков, относительного заглубления, угла атаки секции лушителя и свойств почвы.

2. Полученная модель является применимой для определения силовых характеристик секций с плоскими и сферическими дисками.

3. Для секции лушителя с плоскими дисками погрешность определения тягового сопротивления составила 3,3%, а для секции со сферическими дисками – 2,6% (рассчитанная по данным лабораторных экспериментов в почвенном канале).

4. В дальнейшем предполагается исследовать возможность обобщения предложенной модели для описания взаимодействия с почвой дисков дискаторов.

### Список литературы

1. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Гринь А.М. Энергетические и технологические аспекты работы дискового рабочего органа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 1. С. 18-22. EDN: YFTHEZ
2. Malasli M.Z., Celik A. Disc angle and tilt angle effects on forces acting on a single-disc type no-till seeder opener. *Soil and Tillage Research*. 2019;194:104304. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104304>
3. Murray S.E., Chen Y. Soil bin tests and discrete element modeling of a disc opener. *Canadian Biosystems Engineering/Le genie des biosystemes au Canada*. 2018;60:2.1-2.10.
4. Дьяков В.П. О природе сопротивления почвы механической нагрузке // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 8. С. 184-189. EDN: VQHNXD
5. Смильский В.В. К вопросу о механических свойствах почв // Агропанорама. 2013. № 3. С. 17-20. EDN: JZIAEQ

### References

1. Lobachevsky Ya.P., Starovoirov S.I., Grin A.M. Energetic and technological aspects of disc working tool operation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017;1:18-22. (In Rus.).
2. Malasli M.Z., Celik A. Disc angle and tilt angle effects on forces acting on a single-disc type no-till seeder opener. *Soil and Tillage Research*. 2019;194:104304. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104304>
3. Murray S.E., Chen Y. Soil bin tests and discrete element modeling of a disc opener. *Canadian Biosystems Engineering/Le genie des biosystemes au Canada*. 2018;60:2.1-2.10
4. Dyakov V.P. On soil resistance to mechanical loading. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2018;8:42-46. (In Rus.)
5. Smilsky V.V. To the question of the mechanical properties of soils. *Agropanorama*. 2013;3:17-20. (In Rus.)

6. Goshtasb A.K., Desbiolles J., Fielke J. Circular disc blade considerations in soil force prediction modelling. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2014;4:371-383.

7. Khosravani A., Desbiolles J.M.A., Fielke J.M., Ucgul M., Saunders C. Prediction of single disc seeding system forces, using a semi-analytical and discrete element method (DEM). *Agriculture*. 2023;13(1):206. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010206>

8. Лысыч М.Н. Компьютерное моделирование процесса обработки почвы рабочими органами почвообрабатывающих машин // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12, № 3. С. 607-627. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-3-607-627>

9. Акимов А.П., Константинов Ю.В., Аквильянова И.Н. Критерии и оптимальные параметры функционирования дискового ножа // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 4. С. 31-34. EDN: KWPMPPF

10. Константинов Ю.В. Полуаналитическая модель взаимодействия с почвой плоского диска лушителя // Вестник НГИЭИ. 2022. № 11 (138). С. 19-32. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-11-19-32>

#### Сведения об авторе

**Юрий Валентинович Константинов**, канд. техн. наук, доцент; Чувашский государственный аграрный университет; 428003, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29; <https://orcid.org/0000-0002-2076-0432>; [yukonsc@yandex.ru](mailto:yukonsc@yandex.ru)

Статья поступила 29.08.2023; после рецензирования и доработки 19.10.2023; принята к публикации 20.10.2023

6. Goshtasb A.K., Desbiolles J., Fielke J. Circular disc blade considerations in soil force prediction modelling. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2014;4:371-383.

7. Khosravani A., Desbiolles J.M.A., Fielke J.M., Ucgul M., Saunders C. Prediction of single disc seeding system forces, using a semi-analytical and discrete element method (DEM). *Agriculture*. 2023;13(1):206. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010206>

8. Lysych M.N. Computer simulation of the process soil treatment by tillage tools of soil processing machines. *Computer Research and Modeling*. 2020;12(3):607-627 (In Rus.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-3-607-627>

9. Akimov A.P., Konstantinov Yu.V., Akvilyanova I.N. Criteria and optimal parameters for the disc knife operation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2008;4:31-34. (In Rus.)

10. Konstantinov Yu.V. Semi-analytical model of interaction of a flat harrow disc with soil. *Bulletin NGIEI*. 2022;11:19-32. (In Rus.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-11-19-32>

#### Author Information

**Yuriy V. Konstantinov**, PhD (Eng), Associate Professor; Chuvash State Agrarian University; 29, K. Marx Str., Cheboksary, 428003, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2076-0432>; [yukonsc@yandex.ru](mailto:yukonsc@yandex.ru)

Received 29.08.2023; revised 19.10.2023; accepted 20.10.2023

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 338.436.33:51-7:338.436.33

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-47-52>

## Разработка интеллектуальной информационно-консультационной службы агропромышленного комплекса

Ю.Т. Фаринюк<sup>1</sup>, Н.В. Алдошин<sup>2✉</sup>, А.В. Ганичева<sup>3</sup>, А.В. Ганичев<sup>4</sup>, А.С. Васильев<sup>5</sup>

<sup>1,3,5</sup> Тверская государственная сельскохозяйственная академия; г. Тверь, Россия

<sup>2</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

<sup>4</sup> Тверской государственный технический университет; г. Тверь, Россия

<sup>1</sup> [ikc\\_tver@mail.ru](mailto:ikc_tver@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0974-8330>

<sup>2</sup> [naldoshin@yandex.ru](mailto:naldoshin@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>

<sup>3</sup> [TGAN55@yandex.ru](mailto:TGAN55@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0224-8945>

<sup>4</sup> [alexey.ganichev@yandex.ru](mailto:alexey.ganichev@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-3389-7582>

<sup>5</sup> [vasilevtgsha@mail.ru](mailto:vasilevtgsha@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0936-2011>

**Аннотация.** Внедрению инновационных информационных технологий в сельское хозяйство способствует эффективная организация информационно-консультационной службы производителей сельскохозяйственной продукции. С целью оптимизации размещения информационно-консультационных пунктов в условиях неопределённости информации о деятельности сельхозпроизводителей разработана математическая модель размещения пунктов информационно-консультационной службы в виде нечёткого ориентированного графа. Для данного графа находятся все нечёткие внешне устойчивые множества с наибольшей степенью внешней устойчивости и среди них выбираются минимальные множества. Для минимизации нечёткого множества используются логические правила нечёткого поглощения элементов множества. Эти минимальные множества определяют оптимальное размещение пунктов, обеспечивающих максимальную степень обслуживания территории. Для обоснования разработанного метода представлен пример определения территориальной структуры консультационных пунктов агропромышленного комплекса Тверской области. В результате решения задачи предложена сеть из 5 информационных пунктов, обеспечивающая степень обслуживания региона 0,9 в условиях неопределённости информации о связях между пунктами. Предложенный метод может найти применение не только в сельском хозяйстве, но и в других областях, где рассматриваются задачи оптимизации размещения на территории пунктов обслуживания населения и оказания услуг. Это могут быть ремонтные мастерские, пункты медицинского обслуживания, объекты сетевого маркетинга, станции сотовой связи.

**Ключевые слова:** интеллектуальная информационно-консультационная служба, агропромышленный комплекс, агроконсалтинг, административно-территориальная единица, информационно-консультационный центр, нечёткий граф, внешне устойчивое множество, степень обслуживания

**Для цитирования:** Фаринюк Ю.Т., Алдошин Н.В., Ганичева А.В., Ганичев А.В., Васильев А.С. Разработка интеллектуальной информационно-консультационной службы агропромышленного комплекса // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 47-52. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-47-52>

## ORIGINAL PAPER

## Developing an intelligent information and consulting service for the agro-industrial sector

Yu. T. Farinyuk<sup>1</sup>, N. V. Aldoshin<sup>2</sup>, A. V. Ganicheva<sup>3</sup>, A. V. Ganichev<sup>4</sup>, A. S. Vasiliev<sup>5</sup>

<sup>1,3,5</sup> Tver State Agricultural Academy; Tver, Russia

<sup>2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

<sup>4</sup> Tver State Technical University; Tver, Russia

**Abstract.** The introduction of advanced information technologies in agriculture is facilitated by the effective organization of information and advisory services for agricultural producers. To optimize the location of information and consulting points in the region under conditions of uncertain information about the activities of agricultural producers, the authors have developed a mathematical model of the location of information and consulting points

in the form of a fuzzy oriented graph. For this graph, all fuzzy sets with the highest degree of external stability are found and the minimal sets are selected from them. To minimize the fuzzy set, the logical rules of fuzzy absorption of elements of the set are used. These minimal sets determine the optimal placement of points that provide the maximum possible coverage of the area. To justify the developed method, the authors present an example of determining the territorial structure of the agro-industrial consulting points in the Tver region. The resulting solution presents a network of five information points providing a degree of service to the region of 0.9 under conditions of uncertain information about connections between points. The proposed method can be used not only in agriculture, but also in other areas where the task is to optimize the location of public service points and the provision of services. These can be repair shops, medical service points, network marketing facilities or mobile communication stations.

**Key words:** intelligent information and advisory service, agro-industrial sector, agro-consulting, administrative-territorial unit, information and advisory center, fuzzy graph, externally stable set, degree of service

**For citation:** Farinyuk Yu.T., Aldoshin N.V., Ganicheva A.V., Ganichev A.V., Vasiliev A.S. Developing an intelligent information and consulting service for the agro-industrial sector. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):47-52. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-47-52>

## Введение

При развитии цифровой экономики особое внимание должно уделяться организации информационно-консультационной службы (ИКС) агропромышленного комплекса (АПК) по оказанию квалифицированных и качественных консультационных услуг производителям товарной сельскохозяйственной продукции и населению, проживающему в сельской местности<sup>1</sup> [1, 2].

В предыдущих исследованиях анализировалось состояние сельскохозяйственного консультирования и направлений его развития [3], рассматривалась роль консультационных услуг в принятии сельхозпроизводителями решений по внедрению инноваций в производство продукции и формированию её конкурентоспособности [4, 5]. Изучалось действие информационно-консультационной поддержки на инновационное развитие аграрного производства<sup>1</sup> и отмечалась необходимость повышения эффективности функционирования информационно-консультационных служб [6, 7]. Освещались информационное обеспечение деятельности консультационных служб (баз данных и программных продуктов, информационно-телекоммуникационных средств) [8], технологии организации и работы с информационными ресурсами и базами данных в сфере АПК, задачи представления полнотекстовых документов в базах данных [9]. Рассматривались концептуальная модель организации региональной системы информационно-консультационного обслуживания [10], функциональный и организационно-финансовый механизм деятельности системы аграрного консультирования, задача рационального размещения консультационных пунктов на основе игрового подхода [11, 12].

<sup>1</sup> Фаринюк Ю.Т., Глебова А.Г. Управление инновационным развитием АПК региона: Монография. Тверь: Изд-во ТГСХА «АгросферА», 2018. 417 с.

Несмотря на изученность ряда вопросов, недостаточно внимания уделяется разработке интеллектуальной информационно-консультационной службе АПК, базирующейся при своей организации в отличие от обычной ИКС на широком использовании цифровых инструментов и математического аппарата. При этом ключевым элементом оценки эффективности функционирования ИКС является степень обслуживания, под которой понимают уровень (коэффициент) удовлетворённости нужд сельхозтоваропроизводителей в информационно-консультационных услугах. Чем он ближе к единице, тем выше эффективность ИКС.

**Цель исследований:** разработка метода оптимального размещения информационно-консультационных центров (ИКЦ) в условиях неопределённости информации о деятельности и потребностях работников АПК.

## Материалы и методы

Разработка метода заключалась в реализации математической модели в виде нечёткого ориентированного графа, нахождении всех нечётких внешних устойчивых множеств с наибольшей степенью внешней устойчивости, выборе минимальных множеств среди всех найденных, в определении оптимального размещения ИКЦ и степени обслуживания территории.

Размещение консультационных пунктов является в общем случае задачей оптимального размещения центров, нечётко покрывающих данную территорию, и сводится к нахождению минимальных нечётких, внешне устойчивых множеств. Степень обслуживания пользователей должна быть максимальной.

Рассмотрим понятие нечёткого внешне устойчивого множества графа  $\tilde{G} = (X, \tilde{U})$  [12].

**Основные определения.** Пусть  $X'$  – произвольное подмножество множества вершин  $X$ . Для каждой вершины  $y$  из  $X \setminus X'$  определим  $\gamma(y) = \max_{x \in X} [\mu_{ij}(y, x)]$ . Тогда нечётким, внешне устойчивым множеством

для вершины  $y$  со степенью внешней устойчивости  $\beta(X') = \min_{y \in X \setminus X'} \gamma(y) = \min_{y \in X \setminus X'} \max_{x \in X'} [\mu_{ij}(y, x)]$  называется подмножество  $X' \subseteq X$ , если для любого подмножества  $X'' \subset X'$  выполняется неравенство  $\beta(X'') < \beta(X')$ .

Рассмотрим задачу размещения консультационных пунктов для 10 регионов Тверской области (рис. 1).

Моделью данной задачи является нечёткий ориентированный граф размещения информационно-консультационных центров (ИКЦ) (рис. 2). Нумерация вершин графа соответствует нумерации районов на рисунке 1. Предполагается, что информационно-коммуникационные связи охватывают только близкие районы и не охватывают удаленные между собой территории.

Граф размещения ИКЦ является нечётким, так как имеется неопределённость информации о связях между его вершинами (сельское население может обращаться в ИКЦ не по принципу административного деления, а по соображениям территориальной близости, дружественных связей, общих интересов и т.д.).

$$\text{Пусть матрица } M_{ij} = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{110} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{210} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{10,1} & \mu_{10,2} & \dots & \mu_{10,10} \end{pmatrix}$$

определяет степень обслуживания  $i$ -го района в случае нахождения консультационного пункта в  $j$ -м районе.

К задаче размещения ИКЦ применён алгоритм нахождения всех минимальных нечётких, внешне устойчивых множеств нечёткого графа  $\tilde{G} = (X, \tilde{U})$  с наибольшей степенью внешней устойчивости, заключающийся в следующем:

1) при  $T$  – некотором нечётком, внешне устойчивом множестве нечёткого графа  $\tilde{G} = (X, \tilde{U})$ , каждой

вершине  $x_i \in X$  нужно поставить в соответствие булеву переменную  $p_i$ , которая равна 1 при  $x_i \in T$  и 0;

2) записать высказывание  $\Phi_T = \bigwedge_i \bigvee_j (\xi_{ij} p_j)$ , где  $\xi_{ij} = \mu_u(x_i, x_j)$ ;

2) представить  $\Phi_T$  с использованием правила нечёткого поглощения в виде дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ);

3) для каждого дизъюнктивного слагаемого записать минимальные, внешне устойчивые множества вершин;

4) из полученных минимальных, внешне устойчивых множеств выбрать множества либо по критерию минимального количества элементов, либо по критерию максимальной степени внешней устойчивости.

### Результаты и их обсуждение

Согласно представленному алгоритму находим все минимальные внешне устойчивые множества  $\Phi_T$  для 10 вершин графа, представленного на рисунке 2:

$$\begin{aligned} \Phi_T = & (\mu_{11} p_1 \vee \mu_{12} p_2 \vee \mu_{13} p_3 \vee \mu_{15} p_5) \wedge \\ & \wedge (\mu_{21} p_1 \vee \mu_{22} p_2 \vee \mu_{23} p_3 \vee \mu_{24} p_4) \wedge \\ & \wedge (\mu_{31} p_1 \vee \mu_{32} p_2 \vee \mu_{33} p_3 \vee \mu_{34} p_4 \vee \mu_{35} p_5 \vee \mu_{36} p_6) \wedge \\ & \wedge (\mu_{41} p_1 \vee \mu_{42} p_2 \vee \mu_{43} p_3 \vee \mu_{44} p_4 \vee \mu_{46} p_6) \wedge \\ & \wedge (\mu_{51} p_1 \vee \mu_{53} p_3 \vee \mu_{55} p_5 \vee \mu_{56} p_6 \vee \mu_{57} p_7) \wedge \\ & \wedge (\mu_{63} p_3 \vee \mu_{64} p_4 \vee \mu_{65} p_5 \vee \mu_{66} p_6 \vee \mu_{68} p_8) \wedge \\ & \wedge (\mu_{75} p_5 \vee \mu_{77} p_7 \vee \mu_{78} p_8 \vee \mu_{79} p_9) \wedge \\ & \wedge (\mu_{86} p_6 \vee \mu_{87} p_7 \vee \mu_{88} p_8 \vee \mu_{8,10} p_{10}) \wedge \\ & \wedge (\mu_{97} p_7 \vee \mu_{99} p_9 \vee \mu_{9,10} p_{10}) \wedge \\ & \wedge (\mu_{10,8} p_8 \vee \mu_{10,9} p_9 \vee \mu_{10,10} p_{10}). \end{aligned} \quad (1)$$

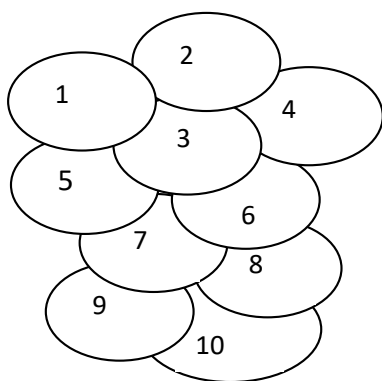


Рис. 1. Схема районов Тверской области:

1 – Спировский; 2 – Кесоровагорский;  
3 – Лихославльский; 4 – Кашинский; 5 – Торжокский;  
6 – Калязинский; 7 – Старицкий; 8 – Калининский;  
9 – Оленинский; 10 – Зубцовский

Fig. 1. Scheme of districts of the Tver region:

1 – Spirovo; 2 – Kesorova Gora; 3 – Likhoslavl;  
4 – Kashin; 5 – Torzhok; 6 – Kalyazin; 7 – Staritsa;  
8 – Kalinin; 9 – Olenino; 10 – Zubtsov

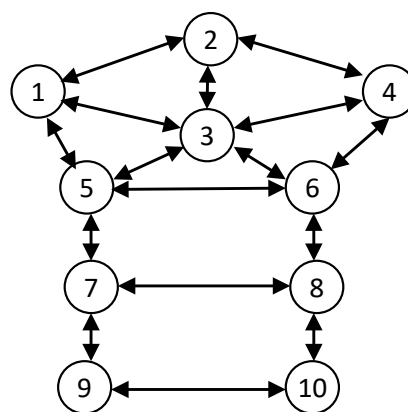


Рис. 2. Граф размещения информационно-консультационных центров:

1...10 – районы Тверской области;  
↔ – связь между районами

Fig. 2. Information and advisory center location graph:

1...10 – districts of the Tver region;  
↔ – connection between districts

Пусть на основе экспериментальных данных, полученных в результате изучения условий предоставления информационно-консультационных услуг сельхозпроизводителями исследуемого региона, матрица степеней обслуживания равна

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,9 & 0,9 & 0,9 & 0,9 & 0,9 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 1 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 1 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 1 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 1 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Phi_T = & (p_1 \vee 0,5p_2 \vee 0,5p_3 \vee 0,5p_4 \vee 0,5p_5) \wedge \\ & \wedge (0,5p_1 \vee p_2 \vee 0,5p_3 \vee 0,5p_4) \wedge \wedge (0,9p_1 \vee \\ & \vee 0,9p_2 \vee p_3 \vee 0,9p_4 \vee 0,9p_5 \vee 0,9p_6) \wedge \\ & \wedge (p_1 \vee p_2 \vee p_3 \vee p_4 \vee p_6) \wedge (p_1 \vee p_3 \vee p_5 \vee p_6 \vee p_7) \wedge \\ & \wedge (0,5p_3 \vee 0,5p_4 \vee 0,5p_5 \vee p_6 \vee 0,5p_8) \wedge \\ & \wedge (0,5p_5 \vee p_7 \vee 0,5p_8 \vee 0,5p_9) \wedge (0,5p_6 \vee \\ & \vee 0,5p_7 \vee p_8 \vee 0,5p_{10}) \wedge (0,9p_7 \vee p_9 \vee 0,9p_{10}) \wedge \\ & \wedge (p_8 \vee p_9 \vee p_{10}). \end{aligned} \quad (2)$$

Для упрощения данного выражения используем правила нечёткого поглощения:

$$\begin{aligned} a \vee a \wedge b &= a, \quad a \wedge b \vee a \wedge \bar{b} = a, \\ \xi' \wedge a \vee \xi'' \wedge a \wedge b &= \xi' \wedge a, \text{ если } \xi' \geq \xi'' \\ \text{и } \xi', \xi'' &\in [0,1], \quad a, b \in \{0,1\}. \end{aligned}$$

Получим

$$\begin{aligned} \Phi_T = & 0,5p_1p_4p_5p_7p_8 \vee 0,5p_1p_6p_7p_8 \vee 0,5p_1p_4p_7p_8 \vee \\ & \vee 0,9p_1p_2p_6p_7p_8 \vee 0,5p_3p_7p_8 \vee 0,5p_5p_7p_8p_9 \vee \\ & \vee 0,5p_4p_5p_7p_8 \vee 0,5p_2p_7p_8. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, 5 ИКЦ (первый, второй, шестой, седьмой и восьмой районы) в совокупности обеспечивают максимальную степень обслуживания региона, равную 0,9.

Количество ИКЦ, равное 3 или 4, в разных конфигурациях позволяет достичь степень обслуживания, равную только 0,5. В результате оптимальным количеством ИКЦ является 5.

В рассмотренном примере для обеспечения наглядности выкладок охвачены не все районы Тверской области (10 из 36 административно-территориальных единиц области). Задача легко может быть распространена непосредственно на все 36 районов

области, а также охватывать и соседние регионы: на северо-западе – экономически связанные районы Новгородской области, на востоке – Ярославской, на западе – Псковской, на юге – Смоленской областей). В этом случае ИКЦ превращаются в специализированные ИКС, охватывающие не только местный и региональный уровни, но и федеральный уровень. Задача расчёта степени обслуживания сельхозпроизводителей, а также оптимального территориального размещения ИКЦ в этом случае существенно усложняется.

Наиболее близким к проблеме разработки интеллектуальных систем консультирования является исследование [11], в котором разработана нечёткая игровая модель определения рационального территориального размещения консультационных пунктов исходя из численности производителей сельхозпродукции. Задача решается при использовании чётких (детерминированных и структурированных) данных, а также по нечёткой (неточно сконструированной) информации.

В данном исследовании применен другой математический аппарат, а именно разработана графовая модель оптимизации размещения ИКЦ, обеспечивающая обслуживание региона минимальным количеством центров.

По применяемому математическому аппарату (нахождению минимальных нечётких, внешне устойчивых множеств) к данному исследованию наиболее близким является труд Л.С. Берштейна<sup>2</sup>, в котором разработан общий алгоритм нахождения минимальных нечётких, внешне устойчивых множеств. К.И. Радилова<sup>3</sup> также показано решение задачи оптимального размещения ретрансляторов мобильной связи, нечётко обслуживающих сотовой связью городскую территорию с помощью модели минимальных нечётких, внешне устойчивых множеств нечёткого графа.

## Выводы

1. Схема расположения ИКЦ в Тверской области, полученная в результате нахождения минимальных нечётких, внешне устойчивых множеств, является оптимальной по критерию минимума количества пунктов, обеспечивающих заданное качество обслуживания пользователей.

<sup>2</sup> Берштейн Л.С., Боженюк А.В. Нечеткие графы и гиперграфы. М.: Научный мир, 2005. 255 с.

<sup>3</sup> Радилова К.И., Барышевский С.О. Математическая модель оптимального размещения центров с нечетким обслуживанием заданной области // Материалы IX Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». Электронный ресурс. URL: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2017/38008.pdf> (дата обращения: 25.08.2023).

2. В дальнейшем может быть разработана консалтинговая система консультирования АПК Тверской области для создания, получения, хранения, систематизации, обработки, анализа и применения знаний в сельскохозяйственной сфере.

### Список литературы

1. Глебова А.Г., Мигулев П.И., Фаринюк Ю.Т., Котельников К.А., Васильев А.С. Российские и зарубежные подходы к анализу производительных сил в развитии региона // Экономика, труд и управление в сельском хозяйстве. 2021. № 5 (74). С. 122-132. EDN: GKCGGK
2. Кондратьева О.В., Слинько О.В. Развитие региональных информационно-консультационных служб и центров компетенций в АПК // Профессиональное образование в современном мире. 2023. Т. 13, № 2. С. 299-306. <https://doi.org/10.20913/2618-7515-2023-2-12>
3. Алексеева Е.А. Система консультирования в развитии аграрного сектора экономики региона: проблемы и перспективы // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 392. EDN: UZJDPR
4. Carayannis E., Grigoroudis E. Quadruple innovation helix and smart specialization: Knowledge production and national competitiveness. *Foresight and STI Governance*. 2016;10(1):31-42. <https://doi.org/10.17323/1995-459x.2016.1.31.42>
5. Сухарникова М.А. Информационно-консультационная деятельность как инструмент поддержки бизнеса в аграрном секторе экономики // Экономика сельского хозяйства России. 2021. № 9. С. 37-40. <https://doi.org/10.32651/219-37>
6. Фролова О.А., Гришина Т.В., Панина Е.В. Функционирование инновационно-консультационной инфраструктуры в АПК // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4 (119). С. 81-94. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-4-81-94>
7. Ибрагимов К.Х., Ибрагимов А.К., Ибрагимов Д.К. Некоторые вопросы организационно-правового регулирования цифровизации сельского хозяйства // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18, № 2 (70). С. 135-141. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-135-141>
8. Егоров В.А. Информационное обеспечение деятельности региональной информационно-консультационной службы // Теория и практика мировой науки. 2019. № 5. С. 12-17. EDN: MECNZQ
9. Чавыкин Ю.И. Технологии формирования и представления электронных информационных ресурсов в сфере сельского хозяйства // Техника и оборудование для села. 2017. № 5. С. 35-38. EDN: YQGBEN
10. Помогаев В.М. Развитие региональной системы информационно-консультационных услуг в АПК // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2015. № 1 (17). С. 73-79. EDN: TKHWSD
11. Алдошин Н.В. Исследование технологических процессов в растениеводстве при помощи стохастических матриц // Техника в сельском хозяйстве. 2007. № 3. С. 45-47. EDN: IATUAN
12. Ганичева А.В. Матричная игра рационального размещения консультационных пунктов // EUROPEAN SOCIAL SCIENCE JOURNAL. 2011. № 9 (12). С. 424-429. EDN: RWBNVZ

3. Предлагаемый метод может найти практическое применение и в других сферах: для размещения автозаправочных станций, пунктов скорой медицинской помощи, ремонтных мастерских сельскохозяйственной техники, территориальных органов службы МЧС, в сетевом маркетинге, сотовой связи и т.д.

### References

1. Glebova A.G., Migulev P.I., Farinyuk Yu.T., Kotelnikov K.A., Vasilev A.S. Russian and foreign approaches to analysis of productive forces in the development of the region. *Ekonomika, Trud i Upravlenie v Selskom Khozyaystve*. 2021;5:122-132. (In Rus.)
2. Kondrateva O.V., Slinko O.V. Development of regional information consulting services and competence centers in the agricultural sector. *Professional Education in the Modern World*. 2023;13(2):299-306. (In Rus.) <https://doi.org/10.20913/2618-7515-2023-2-12>
3. Alekseeva E.A. Counseling system in agrarian sector development region: problems and prospects. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2015;2-2:392. (In Rus.)
4. Carayannis E., Grigoroudis E. Quadruple Innovation Helix and Smart Specialization: Knowledge Production and National Competitiveness. *Foresight and STI Governance*. 2016;10(1):31-42. <https://doi.org/10.17323/1995-459x.2016.1.31.42>
5. Sukharnikova M.A. Consulting activities as a tool for supporting businesses in the agricultural sector of the economy. *Ekonomika Selskogo Khozyaystva Rossii*. 2021;9:37-40. (In Rus.) <https://doi.org/10.32651/219-37>
6. Frolova O.A., Grishina T.V., Panina E.V. The functioning of innovation and consulting infrastructure in the agro-industrial complex. *Bulletin NGIEI*. 2021;4(119):81-94. (In Rus.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-4-81-94>
7. Ibragimov K.Kh., Ibragimov A.K., Ibragimov D.K. Some issues of organizational and legal regulation of the digitalization of agriculture. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2023;18(2):135-141. (In Rus.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-135-141>
8. Egorov V.A. Information support for the activities of the regional information and consulting service. *Theory and Practice of the World Science*. 2019;5:12-17. (In Rus.)
9. Chavykin Yu.I. Technologies for formation and presentation of digital information resources in the field agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017;5:35-38. (In Rus.)
10. Pomogaev V.M. Development of regional system information and consulting services in the agribusiness. *Vestnik Omskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2015;1:73-79. (In Rus.)
11. Aldoshin N.V. Studying technological processes in the crop production by means of stochastic matrixes. *Tekhnika v Selskom Khozyaystve*. 2007;3:45-47. (In Rus.)
12. Ganicheva A.V. Matrix game of the rational placement of consulting points. *European Social Science Journal*. 2011;9:424-429. (In Rus.)

## Сведения об авторах

**Юрий Теодорович Фаринюк**<sup>1</sup>, д-р экон. наук, профессор, заслуженный работник сельского хозяйства Российской Федерации, профессор; [ikc\\_tver@mail.ru](mailto:ikc_tver@mail.ru)

**Николай Васильевич Алдошин**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; [naldoshin@yandex.ru](mailto:naldoshin@yandex.ru)

**Антонина Валериановна Ганичева**<sup>3</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент; [TGAN55@yandex.ru](mailto:TGAN55@yandex.ru)

**Алексей Валерианович Ганичев**<sup>4</sup>, старший преподаватель; [alexej.ganichev@yandex.ru](mailto:alexej.ganichev@yandex.ru)

**Александр Сергеевич Васильев**<sup>5</sup>, д-р с.-х. наук, доцент; [vasilevtgsha@mail.ru](mailto:vasilevtgsha@mail.ru)

<sup>1,3,5</sup> Тверская государственная сельскохозяйственная академия; 170904, Российская Федерация, г. Тверь, пос. Сахарово, ул. Василевского, 7

<sup>2</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

<sup>4</sup> Тверской государственный технический университет; 170026, Российская Федерация, Тверская область, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22

## Вклад авторов

Ю.Т. Фаринюк – формулирование основной концепции исследования.

Н.В. Алдошин – разработка методологии исследования.

А.В. Ганичева – математическая обработка результатов, описание результатов.

А.В. Ганичев – подготовка начального варианта текста, формирование выводов, анализ литературы.

А.С. Васильев – описание результатов, анализ литературы.

## Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 04.09.2023; после рецензирования и доработки 18.12.2023; принята к публикации 19.12.2023

## Author Information

**Yuri T. Farinyuk**<sup>1</sup>, DSc (Econ), Professor, Honored Worker of Agriculture of the Russian Federation, Professor of the Department of Management and Entrepreneurship; [ikc\\_tver@mail.ru](mailto:ikc_tver@mail.ru)

**Nikolay V. Aldoshin**<sup>2</sup>, DSc (Eng), Professor, Chief Researcher; tel.: 89039717327; [naldoshin@yandex.ru](mailto:naldoshin@yandex.ru)

**Antonina V. Ganicheva**<sup>3</sup>, CSc (Phys-Math), Associate Professor of the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Information Technologies; [TGAN55@yandex.ru](mailto:TGAN55@yandex.ru)

**Aleksei V. Ganichev**<sup>4</sup>, Senior Lecturer, the Department of Computer Science and Applied Mathematics; [alexej.ganichev@yandex.ru](mailto:alexej.ganichev@yandex.ru)

**Aleksandr S. Vasiliev**<sup>5</sup>, DSc (Agr), Associate Professor, Head of the Department of Agrobiotechnologies, Processing Industries and Seed Production; [vasilevtgsha@mail.ru](mailto:vasilevtgsha@mail.ru)

<sup>1,3,5</sup> Tver State Agricultural Academy; Vasilevsky str., 7, village Sakharovo, Tver, 170904, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

<sup>4</sup> Tver State Technical University; Af. Nikitina Emb., 22, Tver, Tver region, 170026, Russian Federation

## Author Contribution

Yu.T. Farinyuk – conceptualization.

N.V. Aldoshin – research methodology.

A.V. Ganicheva – mathematical processing of the results, description of the results.

A.V. Ganichev – original draft preparation, drawing conclusions, literature review.

A.S. Vasiliev – description of the results, literature review.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 04.09.2023; revised 18.12.2023; accepted 19.12.2023

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 631.3:629.3.032.2:629.3.01

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-53-58>

## Энергетические и экономические параметры работы трактора с электроприводом колёс

*А.В. Бижаев<sup>1✉</sup>, С.Н. Девянин<sup>2</sup>, В.Л. Чумаков<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [a.bizhaev@mail.ru](mailto:a.bizhaev@mail.ru)<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255><sup>2</sup> [s.devyanin@rgau-msha.ru](mailto:s.devyanin@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432><sup>3</sup> [valery.chumakov@gmail.com](mailto:valery.chumakov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

**Аннотация.** Агропромышленный комплекс нуждается в тракторах с электроприводом колёс малого тягового класса, которые более перспективны на фоне растущей стоимости топлива и экологических требований. Однако возникают вопросы о перспективе использования электродвигателей в качестве привода силового агрегата трактора, энергетической оснащённости и общей подготовленности к переходу тракторов на такие системы в условиях текущего состояния энергетических ресурсов на территории РФ. С этой целью представлена методика оценки энергетических и экономических характеристик трактора с электроприводным силовым агрегатом относительно трактора с дизельным двигателем. Введенный показатель – удельная энергетическая стоимость – позволил сравнить параметры тракторов с дизельным двигателем и электроприводным силовым агрегатом. Расчёты показали, что использование вентильного электродвигателя постоянного тока по сравнению с дизелем на средних и низких нагрузках позволит снизить удельную энергетическую стоимость на 5...7 руб/кВт·ч, или на 30...50%. Расчётами установлено превышение электроэнергетического потенциала в РФ возможных энергетических затрат сельскохозяйственной техники на 300 млрд кВт·ч, что указывает на возможность перехода на электропривод силового агрегата. Однако использование электродвигателей в тракторах без дальнейшего развития энергетических комплексов и накопителей электрического заряда невозможно.

**Ключевые слова:** трактор с электроприводом колёс, электропривод силового агрегата, электродвигатель, дизельный двигатель, электроэнергетический потенциал, удельная энергетическая стоимость

**Финансирование:** Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение 075-15-2023-220).

**Для цитирования:** Бижаев А.В., Девянин С.Н., Чумаков В.Л. Энергетические и экономические параметры работы трактора с электроприводом колёс // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 53-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-53-58>

## ORIGINAL PAPER

## Energy and economic operating parameters of tractor equipped with electrically driven wheels

*A.V. Bizhaev<sup>1✉</sup>, S.N. Devyanin<sup>2</sup>, V.L. Chumakov<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia<sup>1</sup> [a.bizhaev@mail.ru](mailto:a.bizhaev@mail.ru)<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255><sup>2</sup> [s.devyanin@rgau-msha.ru](mailto:s.devyanin@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432><sup>3</sup> [valery.chumakov@gmail.com](mailto:valery.chumakov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

**Abstract:** The modern agro-industrial sector requires a large proportion of tractors of a small-traction class due to the rising fuel costs and environmental requirements. The authors raise questions about the prospects of using electric motors as a means to drive the tractor power unit and energy equipment, as well as consider pre-conditions for the integration of such systems in the tractor design under the current economic state of energy resources in the Russian Federation. For this purpose, the article presents a methodology for evaluating the energy and economic parameters of a tractor with an electrically driven power unit as compared with a tractor with a diesel engine. The offered indicator – specific energy cost – makes it possible to compare the parameters of tractors with a diesel engine and an electrically driven power unit. Calculations have shown that the use of a brushless DC electric motor compared with a diesel engine at medium and low loads will reduce the specific energy cost by 5 to 7 roubles/kWh, or by 30 to 50%. The study has established that the electric

power potential in the Russian Federation exceeds the possible energy costs of agricultural machinery by 300 billion kWh, which makes it possible to switch to electrically driven power units. However, it is impossible to use electric motors in tractors without further development of power complexes and electric charge storage batteries.

**Keywords:** tractor with electrically driven wheels, electric drive of power unit, electric motor, diesel engine, electric energy potential, specific energy cost

**Funding:** The research was funded by the University Development Programme within the framework of the Priority-2030 Strategic Academic Leadership Programme (agreement 075-15-2023-220).

**For citation:** Bizhaev A.V., Denyanin S.N., Chumakov V.L. Energy and economic operating parameters of tractor equipped with electrically driven wheels. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):53-58. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-53-58>

Введение

Дизельные двигатели сельскохозяйственных тракторов характеризуются токсичными выбросами отработавших газов [1, 2] и сравнительно невысоким КПД (40...50%) силовой установки на режимах максимальной эффективной мощности трактора<sup>1</sup>. Токсичные выбросы приносят ущерб здоровью человека и животных и сдерживают работу тракторов в помещениях с ограниченной вентиляцией воздуха – таких, как фермы, теплицы и т.д.

Для снижения токсичности ДВС используют разные методы: например, в цилиндры добавляют воду вместе с дизельным топливом или используют альтернативные виды топлива [3]. Проблемы снижения токсичных выбросов, повышения эффективности машины и улучшения её потребительских свойств комплексно решить весьма сложно.

Электропривод силового агрегата трактора не создает вредных выбросов в окружающую среду и имеет сравнительно высокий КПД – 80...96% [4], что позволяет использовать его в качестве источника механической энергии [5]. Гибкость управления электроприводом существенно повышает эффективность

работы трактора. Различные типы электродвигателей будут давать разный результат при их использовании в силовом агрегате, в результате мобильная машина будет иметь различные характеристики [6].

Электродвигатель по сравнению с дизельным двигателем имеет возможность рекуперации энергии при динамических изменениях состояния системы привода. Вентильный электродвигатель, не имеющий контактирующих элементов в конструкции мотора, обладающий хорошей нагрузочной характеристикой и гибким управлением при сравнительно высокой удельной мощности двигателя, предпочтительнее источников механической энергии для привода силового агрегата трактора [7].

Трактор, предназначенный для работы в ограниченно вентилируемых помещениях, должен иметь небольшие габариты и мощность двигателя в диапазоне 10...60 кВт.

Параметры двигателей различных типов необходимо сравнивать у одинаковых категорий тракторов, эксплуатируемых в идентичных условиях. Анализируя различные группы дизельных двигателей<sup>1</sup> и вентильных электродвигателей<sup>2</sup> [8], можно сравнить их основные параметры (табл.).

Основные параметры дизельного и электрического двигателей для привода силового агрегата

Таблица

Table

| Параметр<br><i>Parameter</i>                                       | Вид двигателя / <i>Engine type</i>           |                                            |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                                    | Дизельный двигатель<br><i>Diesel engines</i> | Электродвигатель<br><i>Electric motors</i> |
| Максимальный КПД, % / <i>Maximal efficiency, %</i>                 | 40...50                                      | 80...96                                    |
| Удельная мощность, кВт/кг / <i>Specific power, kW/kg</i>           | 0,1...0,6                                    | 2...5                                      |
| Рыночная цена, тыс. руб/кВт / <i>Market price, thousand rub/kW</i> | 1,5...8                                      | 3,5...15                                   |
| Рабочая температура, С° / <i>Work temperature, C°</i>              | 80...100                                     | -50...80                                   |
| Предельная температура, С° / <i>Temperature limit, C°</i>          | 120...140                                    | 90...250                                   |

<sup>1</sup> Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004.

<sup>2</sup> Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе: Курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век, 2016.

Анализ двигателей одинаковых мощностных диапазонов выявил различия в их основных параметрах и ценовой категории. Эффективность работы вентильного электродвигателя почти в 2 раза выше, чем у дизельного двигателя, а удельная мощность – в 5...10 раз больше, что оправдывает перспективу использования вентильных двигателей в качестве привода силовых агрегатов мобильных машин.

**Цель исследований:** оценка энергоэкономических параметров и целесообразности использования трактора с электроприводным силовым агрегатом в условиях текущего состояния энергетических ресурсов на территории РФ.

### Материалы и методы

Электроэнергетический потенциал в РФ оценивался по данным из открытых источников за 2019 г., возможное предельное потребление электроэнергии сельскохозяйственной техникой определялось исследованиями [9].

Оценка энергетических характеристик трактора с электроприводным силовым агрегатом производилась относительно трактора с дизельным двигателем эквивалентной мощности 20 кВт. В качестве трактора низкого тягового класса, способного работать в теплицах или на фермах на кормораздаче, выбран прототип – трактор ВТЗ-2032. Сравнивались характеристики дизельного двигателя Д-120 и бесколлекторного электродвигателя постоянного тока с неодимовыми магнитами типа НРМ20KW. Характеристики двигателей строились по общеизвестным методикам [10, 11].

### Результаты и их обсуждение

Потребление дизельного топлива в России практически не меняется и составляет 33 млн т в год<sup>3</sup>. Доля топлива, используемого в сельском хозяйстве, составляет примерно 18...25% от общего объёма, то есть 5,9...8,3 млн т в год.

Количество энергии,  $W$ , Дж, требуемое для преобразования в механическую работу из потребляемого дизельного топлива, можно определить по формуле:

$$W = \frac{H_u \cdot G_w \cdot \eta_d \cdot \eta_e}{K_t}, \quad (1)$$

где  $H_u$  – низшая удельная теплота сгорания дизельного топлива ( $H_u \approx 42$  МДж/кг);  $G_w$  – весовое потребление топлива за год, кг;  $\eta_d$  – КПД дизельного двигателя ( $\eta_d \approx 0,4$ );  $\eta_e$  – КПД электродвигателя ( $\eta_e \approx 0,9$ );  $K_t$  – коэффициент времени для приведения в систему СИ ( $K_t = 3600$ ).

<sup>3</sup> Доживем – увидим: Пост-релиз конференции «Моторные топлива 2018». Организатор – CREON Energy в составе Группы CREON. URL: <http://rcc.ru/article/dozhivem-uvividim-63812> (дата обращения: 01.10.2023).

Количество электрической энергии, преобразованной в механическую работу дизельным топливом за год в сельскохозяйственном секторе, можно оценить в размере 24,8...34,9 млрд кВт·ч, что составляет примерно 10% от запаса производства электроэнергии. С учётом того, что до 60% работ общего объёма приходится на весенний и начало осеннего периодов, максимальная месячная доля топлива от общего годового объёма может достигать 35%. Тогда предельное месячное потребление энергии  $W_{max}$ , Дж, –

$$W_{max} = \frac{H_u \cdot G_w \cdot \tau \cdot \eta_d \cdot \eta_e}{K_t}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – доля топлива, израсходованного в самый нагруженный месяц ( $\tau = 0,35$ ).

Ежемесячное максимальное потребление энергии сельскохозяйственной техникой может составить 8,7...12,2 млрд кВт·ч. Энергия, производимая электростанциями за 1 месяц, составила 25 млрд кВт·ч [9], что в 2...3 раза больше максимального её месячного потребления. Запас энергии позволяет осуществить переход тракторов на электропривод силового агрегата, однако использование электродвигателей в тракторах, потребляющих энергию от внешней сети, без дальнейшего развития энергетических комплексов невозможно.

Рыночная стоимость электродвигателей выше, чем стоимость дизельных, в 1,5...2 раза. Разброс стоимости в 11,5 тыс. руб./кВт объясняется различием материалов и технологий изготовления, сроков службы, производителей изделия и комплектующих и т.д. Массовое использование электродвигателей ограничивается в связи с проблемой хранения электрической энергии на борту трактора, а также низким электроэнергетическим потенциалом, составившим в 2019 г. в РФ приблизительно 1200 млрд кВт·ч [8]. При этом предельное потребление электроэнергии<sup>2</sup>, ограничиваемое электростанциями, составило около 1500 млрд кВт·ч. Условный запас энергии, который потенциально можно использовать для эксплуатации электроприводных тракторов, составил примерно 300 млрд кВт·ч.

Для оценки параметров эффективности трактора необходимо проанализировать характеристику вентильного электродвигателя в сравнении с характеристикой дизеля эквивалентной мощности. Характеристики вентильного электродвигателя и дизельного двигателя различаются, однако их можно приближённо смоделировать, исходя из физических законов и аппроксимации по эмпирическим показателям<sup>1</sup> [11]. Характеристики электродвигателей могут различаться в зависимости от их геометрических параметров [12]. За базу для моделирования характеристики

взят электродвигатель НРМ20KW. Удобнее всего рассматривать скоростную характеристику двигателя с изменением различных показателей в зависимости от частоты вращения вала двигателя (рис. 1).

Одним из основных показателей работы двигателей являются энергозатраты на образование единицы мощности. Для ДВС эффективность оценивается удельным эффективным расходом топлива  $g_e$ , показывающим количество затрачиваемого топлива, требуемого для получения единицы мощности за единицу времени<sup>1</sup>. В электроприводе такого показателя не существует, и его эффективность обычно оценивают по КПД ( $\eta_e$ ). В отличие от мощности и крутящего момента, которые легко сравнить между собой, возникает проблема единого подхода к оценке и сравнения показателей эффективности работы двигателей различного типа. В этом случае удобным является показатель удельной энергетической стоимости ( $g_p$ , руб/кВт), характеризующий эффективность работы двигателя путём оценки удельных материальных затрат на энергию или топливо, для производства им единицы мощности. Данный показатель может отличаться при изменении цен на топливо или тарифов на электроэнергию при одних и тех же категориях двигателей, поэтому он носит прикладной характер и является удобным для сравнения эффективности их работы в конкретных условиях (рис.).

Для дизельного двигателя удельная энергетическая стоимость ( $g_p$ , руб/кВт) определяется по формуле:

$$g_p = \frac{P_D \cdot G_D}{\rho \cdot N_D}, \quad (3)$$

где  $P_D$  – цена за 1 л дизельного топлива, руб/л;  $G_D$  – часовой расход топлива, кг/ч;  $\rho$  – плотность топлива, кг/л;  $N_D$  – текущая мощность двигателя.

Для электродвигателя, питающегося от аккумулятора или другого накопителя электрической энергии, удельная энергетическая стоимость определяется другим способом:

$$g_p = T_E \frac{P_e}{N_e} \eta_B, \quad (4)$$

где  $T_E$  – тарифная ставка за электроэнергию, руб/кВт·ч;  $P_e$  – электрическая мощность, подведённая к электродвигателю, Вт;  $N_e$  – механическая мощность на выходе, Вт;  $\eta_B$  – КПД зарядки/разрядки накопителя электрической энергии и преобразователя.

Согласно данным рисунка при средних и низких нагрузках удельные затраты на дизельный двигатель выше, чем на электрический, на 6...7 руб/кВт·ч. При повышении нагрузки удельная энергетическая стоимость сближается и стремится к 15 руб/кВт·ч для обоих типов двигателей. Аналогично можно сравнивать тягово-экономические характеристики тракторов с различными типами привода силового агрегата.

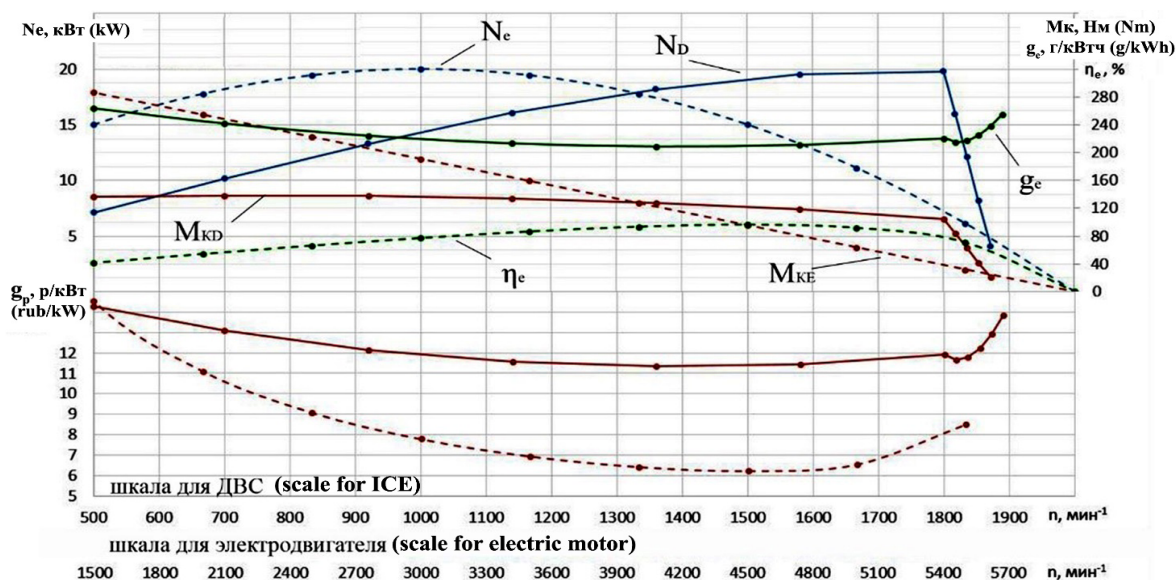


Рис. Скоростные характеристики дизельного и электрического бесщёточного двигателей:

----- характеристики электрического двигателя; ———— характеристики дизельного ДВС;  
 $N_e, N_D$  – выходные мощности дизельного и электрического двигателей соответственно;  
 $M_k$  – крутящий момент двигателей;  $g_e$  – удельный эффективный расход топлива ДВС;  
 $\eta_e$  – КПД электродвигателя;  $g_p$  – удельная энергетическая стоимость (стоимость дизельного топлива принята за 45 руб/л, электроэнергии – 6 руб/кВт·ч)

Fig. Speed characteristics of diesel engines and electric brushless motors::

----- characteristics of the electric motor, ———— characteristics of the diesel internal combustion engine;  
 $N_e, N_D$  – output power of the diesel and electric motor, respectively;  $M_k$  – torque of the electric motor and the diesel engine;  
 $g_e$  – specific effective fuel consumption of the internal combustion engine;  $\eta_e$  – efficiency of the electric motor;  $g_p$  – specific energy cost

В базовом варианте для трактора существует показатель – удельный эффективный крюковой расход топлива ( $g_{кр}$ ), по которому оценивается количество топлива, затрачиваемого для производства единицы мощности на крюке трактора за единицу времени. Для электропривода можно воспользоваться обобщающим показателем – удельной крюковой энергетической стоимостью  $g_{ркр}$ , которая учитывает стоимость производимой мощности на крюке за единицу времени:

$$g_{ркр} = \frac{g_p}{\eta_{кр}} = g_p \frac{N_e}{N_{кр}}, \quad (5)$$

где  $\eta_{кр}$  – тяговый КПД трактора;  $N_e$  – выходная мощность двигателя;  $N_{кр}$  – тяговая мощность трактора на крюке.

Предложенные показатели энергетических затрат  $g_p$  и  $g_{ркр}$  оценивают экономическую составляющую. Для решения прикладных инженерных задач при сравнении тракторов с различными типами привода силового агрегата удобнее оперировать энергетическими показателями (Дж или Вт).

Рассматривая проблему потребления электрической энергии тракторами на электрической тяге, нужно учитывать, что агропромышленный сектор не является привилегированным. Поэтому при внедрении подобных технологий в массовое использование основная доля использования электроприводных силовых агрегатов придётся на автобусы, легковые и грузовые автомобили. В таком случае запаса энергии электростанций 300 кВт·ч будет недостаточно и возникнет потребность в увеличении объёмов производимой электрической энергии.

Использование электроприводных тракторов пока не получило широкого распространения. Полагается, что проблему ограничения запаса электроэнергии можно решить, используя гибридную силовую установку, которая должна содержать в себе двигатель внутреннего сгорания и электрическую трансмиссию. Такие системы получили широкое распространение на автомобилях и подтвердили свою эффективность

при работе. Использование комбинированных энергоустановок на тракторах не требует постоянной зарядки от внешней сети, так как можно заряжаться от преобразованной энергии двигателя. В качестве накопителей энергии можно использовать не только литий-ионные аккумуляторы, но и ионисторы (суперконденсаторы), которые в последние годы начинают активно внедряться и рассматриваться в качестве временных накопителей заряда с хорошими характеристиками<sup>4</sup> [13]. Эти факторы являются определяющими в концепции электротрактора, однако остаётся множество проблем, связанных с выбором и взаимным расположением электротехнических узлов [8], а также алгоритмов их управления. Данные задачи в настоящее время являются перспективными и решаются фирмами John Deere, Claas, Tesla, Toyota [14], Drive Electro и т.д.

### Выводы

1. Электроэнергетический потенциал в РФ превышает возможные энергетические затраты электротракторов и другой сельскохозяйственной техники на 300 млрд кВт·ч. и указывает на возможность перехода на электропривод силового агрегата.

2. Использование электродвигателей в тракторах без дальнейшего развития энергетических комплексов и накопителей электрического заряда является невозможным.

3. Введённый показатель удельной энергетической стоимости позволил сравнить трактора с различным типом привода. Использование вентильного электродвигателя постоянного тока по сравнению с дизелем на средних и низких нагрузках позволит снизить удельную энергетическую стоимость на 5...7 руб/кВт·ч, или на 30...50%. При повышенных нагрузках удельная энергетическая стоимость сближается и стремится к 15 руб/кВт·ч для обоих типов двигателей.

<sup>4</sup> Дидманидзе О.Н., Иванов С.А., Пуляев Н.Н. Эффективность тягово-транспортных средств при использовании накопителей энергии: Монография. М.: Мегатрип, 2018. 97 с.

### Список литературы

1. Fenimore C.P., Jones G.W. Coagulation of soot to smoke in hydrocarbon flames. *Combustion and Flame*. 1969;13(3):303-310. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(69\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0010-2180(69)90008-X)
2. Чумаков В.Л., Бижаев А.В., Путан А.А. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами газодизеля // Чтения академика В.Н. Болтинского (115 лет со дня рождения): Сборник трудов конференций. М.: ООО «Мегаполис», 2019. С. 118-122. EDN: ZCFNTR
3. Devyanin S.N., Bigaev A.V., Markov V.A. Influence of Method of Adding Water to Combustible Mixture on Diesel Engine Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(2):022024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022024>
4. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Andreev O.P., Levshin A.G., Kabdin N.E. Application of the electric drive of the power unit

### References

1. Fenimore C.P., Jones G.W. Coagulation of soot to smoke in hydrocarbon flames. *Combustion and Flame*. 1969;13(3):303-310. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(69\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0010-2180(69)90008-X)
2. Chumakov V.L., Bizhaev A.V. Reduction of nitrogen oxide emissions with exhaust gases of gas-diesel. In: *Readings of Academician V.N. Boltinskii: collection of conference papers*. Moscow, 2019:118-122. (In Rus.)
3. Devyanin S.N., Bigaev A.V., Markov V.A. Influence of Method of Adding Water to Combustible Mixture on Diesel Engine Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(2):022024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022024>
4. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Andreev O.P., Levshin A.G., Kabdin N.E. Application of the electric drive of the power unit

- of the small traction tractor. *The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;206:971-980. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7\\_107](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7_107)
5. Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006;55(6):1756-1764. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.878719>
6. Chau K., Chan C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(6):2246-2257. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>
7. Hanselman D.C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. 2003. 392 p.
8. Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. № 14 (4). С. 33-42. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42>
9. Трухачёв В.И., Дидманидзе О.Н., Девянин С.Н. Какие сельскохозяйственные тракторы нужны завтра России? // Чтения академика В.Н. Болтинского: Сборник трудов конференции (Москва, 22-24 января 2020 г.). М.: ООО «Мегapolis», 2020. С. 11-19. EDN: YSXSHT
10. Дерюшев В.В., Виноградова Т.А. Анализ скоростных характеристик современных двигателей // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 1 (64). С. 3-10. EDN: ZAMKZF
11. Шухарев С.А. Моделирование работы двигателя постоянного тока // Вестник Института тяги и подвижного состава. 2018. № 14. С. 7-12. EDN: CZLPGJ
12. Dolgih A., Martemyanov V., Borikov V. Dependence of the torque-rotor position characteristic from the tape winding current. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2019;95(9):71-75. <https://doi.org/10.15199/48.2019.09.14>
13. Bijaev A., Ishutochkina K. Assessment of the starter motor system use powered by capacitive power sources on internal combustion engine. *MATEC Web of Conferences*. 2021;341(490):00054. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134100054>
14. Burrell T.A., Campbell S.L., Coomer C.L., Ayers C.W. et al. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 2011. 79 p.

#### Информация об авторах

**Антон Владиславович Бижаев**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент;  
a.bizhaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>

**Сергей Николаевич Девянин**<sup>2</sup>, д.т.н.,  
профессор; s.devyanin@rgau-msha.ru;  
<https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>

**Валерий Леонидович Чумаков**<sup>3</sup>, к.т.н.,  
профессор; valery.chumakov@gmail.com;  
<https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

<sup>1,2,3</sup> Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская  
Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

#### Вклад авторов

А.В. Бижаев – аналитика, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование, визуализация  
В.Л. Чумаков – концептуализация, редактирование окончательной версии рукописи  
С.Н. Девянин – актуальность проблемы, ресурсы

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 02.08.2023, после рецензирования и доработки 12.10.2023; принята к публикации 12.10.2023

- of the small traction tractor. *The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;206:971-980. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7\\_107](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7_107)
5. Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006;55(6):1756-1764. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.878719>
6. Chau K., Chan C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(6):2246-2257. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>
7. Hanselman D.C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. 2003. 392 p.
8. Bizhaev A.V. Parameters of a tractor equipped with an electrically driven power unit. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(4):33-42. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42>
9. Trukhachev V.I., Didmanidze O.N., Devyanin S.N. What agricultural tractors does Russia need tomorrow? In: *Readings of Academician V.N. Boltinskiy: Collection of conference papers*. (Moscow, January 22-24, 2020). Moscow, 2020:11-19. (In Rus.)
10. Deryushev V.V., Vinogradova T.A. Analysis of speed characteristics of modern engines. *World of Transport and Technological Machines*. 2019;1(64):3-10. (In Rus.)
11. Shukharev S.A. Modeling of the operation of a DC engine. *Vestnik Instituta tyagi i Podvizhnogo Sostava*. 2018;14:7-12. (In Rus.)
12. Dolgih A., Martemyanov V., Borikov V. Dependence of the torque-rotor position characteristic from the tape winding current. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2019;95(9):71-75. <https://doi.org/10.15199/48.2019.09.14>
13. Bijaev A., Ishutochkina K. Assessment of the starter motor system use powered by capacitive power sources on internal combustion engine. *MATEC Web of Conferences*. 2021;341(490):00054. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134100054>
14. Burrell T.A., Campbell S.L., Coomer C.L., Ayers C.W. et al. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 2011. 79 p.

#### Author Information

**Anton V. Bizhaev**<sup>1</sup>, CSc (Eng), Professor Associate;  
<https://orcid.org/0000-0002-0807-1255>; a.bizhaev@mail.ru

**Sergey N. Denyanin**<sup>2</sup>, DSc(Eng), Professor;  
<https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>;  
s.devyanin@rgau-msha.ru

**Valery L. Chumakov**<sup>3</sup>, CSc (Eng), Professor;  
<https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>;  
valery.chumakov@gmail.com

<sup>1,2,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev  
Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow,  
127434, Russian Federation

#### Author contribution

A.V. Bizhaev – analytics, methodology, draft finalization and editing, visualization  
S.N. Denyanin – conceptualization, draft finalization and editing  
V.L. Chumakov – problem relevance, resources

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 02.08.2023; revised 12.10.2023; accepted 12.10.2023

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.17:629.733.5:629.7.015

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-59-64>**Рассредоточенный нагрев гелия в беспилотном дирижабле сельскохозяйственного назначения****С.А. Андреев<sup>1</sup>**, **Д.В. Белов<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [asa-finance@yandex.ru](mailto:asa-finance@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8945-963X><sup>2</sup> [moyggddl@gmail.com](mailto:moyggddl@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

**Аннотация.** В современном сельскохозяйственном производстве беспилотные летательные аппараты способны решать множество задач. Для выполнения длительных технологических операций над поверхностью земли целесообразно применять дирижабли. С целью обоснованности рассредоточенного нагрева гелия в рабочем пространстве дирижабля рассмотрено влияние соотношения объемов, занимаемых нагретым и холодным гелием в рабочем пространстве дирижабля, а также температуры гелия на величину подъемной силы. В результате расчетов установлено, что рассредоточенный нагрев гелия определяет ускоренное изменение его плотности, обеспечивает уменьшение энергозатрат на нагрев и снижает требования к термической прочности оболочки. Показано, что рассредоточенный нагрев гелия во всем рабочем пространстве дирижабля обладает рядом преимуществ перед локальным нагревом. В разработанной конструкции беспилотного дирижабля техническая реализация рассредоточенного нагрева гелия достигается использованием электронагревательного прибора, токопроводящие элементы которого размещены по всему объему рабочего пространства на кронштейнах из легкого диэлектрического материала. С целью повышения эффективности нагрева внутренняя поверхность оболочки покрыта отражателем из тонкослойной фольгированной базальтовой ваты. Вертикальное маневрирование дирижабля поддерживается автоматически блоком управления посредством подключения электронагревательного прибора в зависимости от температуры гелия и температуры окружающей среды.

**Ключевые слова:** беспилотный дирижабль, дирижабль сельскохозяйственного назначения, рассредоточенный нагрев гелия, подъемная сила, вертикальное маневрирование дирижабля, температура гелия, электронагревательный прибор, токопроводящие элементы

**Для цитирования:** Андреев С.А., Белов Д.В. Рассредоточенный нагрев гелия в беспилотном дирижабле сельскохозяйственного назначения // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 59-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-59-64>

## ORIGINAL PAPER

**Distributed helium heating in the working space of an agricultural unmanned airship****S.A. Andreev<sup>1</sup>**, **D.V. Belov<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia<sup>1</sup> [s.andreev@aol.com](mailto:s.andreev@aol.com); <https://orcid.org/0000-0002-8945-963X><sup>2</sup> [moyggddl@gmail.com](mailto:moyggddl@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

**Abstract.** In modern agricultural production, unmanned aerial vehicles are capable of solving many tasks. It is expedient to use airships to perform long technological operations above the ground. To justify the need for the dispersed heating of helium in the working chamber of the airship, the authors considered the influence of the ratio of the volumes occupied by heated and cold helium in the working chamber of the airship, as well as the influence of the helium temperature on the lifting force. Calculations have shown that the dispersed heating of helium causes an accelerated change in its density, provides a reduction in the energy consumption for heating, and reduces the requirements for the thermal strength of the envelope. It is shown that distributed heating of helium in the whole working chamber of the airship has a number of advantages over local heating. In the proposed design of the unmanned airship, the technical implementation of the distributed heating of helium is achieved by means of an electrical heating device, the conductive elements of which are placed throughout the working chamber on supports made of light dielectric material. To increase the heating efficiency, the inner surface of the envelope is covered with a reflector made of thin

basalt wool foil. The vertical maneuvering of the airship is automatically maintained by the control unit by connecting an electric heating device depending on the helium temperature and the ambient temperature.

**Key words:** unmanned airship, agricultural airship, dispersed helium heating, lifting force, vertical maneuvering of airship, helium temperature, electrical heating device, conductive elements

**For citation:** Andreev S.A., Belov D.V. Distributed helium heating in the working space of an agricultural unmanned airship. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):59-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-59-64>

## Введение

В сельскохозяйственном производстве небольшие пилотируемые и беспилотные самолёты, радиоуправляемые беспилотные дроны (коптеры) [1] успешно осуществляют ряд технологических процессов: срочную доставку специфических грузов (препараты для искусственного осеменения животных, икра, мальки и др.); аэрофотосъёмку местности и отдельных объектов; борьбу с вредителями и болезнями растений; аэросев; орошение при аномальной засухе; распыление удобрений; борьбу с лесными пожарами [2]. Несмотря на возрастающую роль дронов, их широкое использование ограничивается незначительной продолжительностью полёта, акустическими помехами и необходимостью постоянного тщательного контроля за их движением квалифицированным оператором.

Перечисленных недостатков лишены дирижабли<sup>1,2</sup>. Способность дирижаблей находиться над землёй в течение нескольких недель позволяет осуществлять длительный мониторинг состояния почвы и вегетации растений, непрерывное наблюдение за появлением насекомых-вредителей, контроль за выпасом животных, ретрансляцию радиосигналов от наземных измерительно-передающих устройств, усиление и раздачу сигналов Интернет.

Вертикальное маневрирование дирижабля происходит достаточно инерционно, технически невозможно быстро прогреть весь объём. Для ускорения нагрева прибегают к увеличению мощности источника тепловой энергии. Например, при взлёте воздушных шаров на горячем воздухе мощность горелок может достигать нескольких мегаватт.

Существенное снижение энергозатрат для обеспечения полёта дирижабля достигается при использовании газов, обладающих малой плотностью. К таким газам относятся в первую очередь водород и гелий с плотностью 0,95 и 1,17 кг/м<sup>3</sup> соответственно. В современных дирижаблях в качестве рабочего газа используется гелий, так как водород обладает высокой взрывоопасностью.

Значительное увеличение мощности источника при использовании электронагрева гелия является сложной технической задачей. Помимо дефицита больших запасов энергии, увеличение мощности локальных тепловых источников связано со значительным повышением температуры в непосредственной близости от них, следовательно, с повышенными требованиями к термической прочности оболочки и других частей.

Некоторую равномерность нагрева гелия при относительно небольшой мощности источника можно достичь при использовании вентиляторов. Однако эта мера влечёт за собой увеличение массы конструкции и требует затрат энергии на электропривод лопастей. Таким образом, быстрый и равномерный нагрев гелия в рабочем пространстве дирижаблей является актуальной задачей.

**Цель исследований:** обосновать целесообразность рассредоточенного нагрева гелия в рабочем пространстве дирижабля и рассмотреть пример практической реализации.

## Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы сведения из теории воздухоплавания летательных аппаратов легче воздуха и справочные данные по термодинамическим свойствам гелия. При проведении теоретических исследований принимался принцип абстрагирования по отношению к потерям тепловой энергии от нагреваемого гелия в окружающую среду. Это позволило упростить расчёты, однако не могло отрицательно сказаться на их результатах, поскольку вычисляемые значения подъёмной силы рассматривались как результаты изменения плотности газа при изменении его температуры.

Установленные на экспериментальном дирижабле фотоэлектрические преобразователи обеспечивают бортовую энергосистему электрической энергией за счёт преобразования солнечной энергии в электрическую форму в светлое время суток (рис. 1). В качестве рабочего газа в дирижабле использовался гелий, плотность которого зависит от температуры<sup>3</sup>. Эта зависимость позволила осуществить управление вертикальным

<sup>1</sup> Арие М.Я. Дирижабли. Киев: Наукова думка, 1986. 264 с.

<sup>2</sup> Кирилин А.Н. Малогабаритные дирижабли. Конструкции и эксплуатация. М.: Издательство Московского авиационного института, 2003. 60 с.

<sup>3</sup> Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. Термодинамические свойства гелия: Монография / ГСССД. М.: Изд-во стандартов, 1984. 320 с.

маневрированием дирижабля [3] за счёт принудительного нагрева и естественного охлаждения гелия [4].

Результаты и их обсуждение

Для равномерного повышения температуры гелия предложено отказаться от локального подвода тепловой энергии, заменив его рассредоточенным нагревом всего объёма рабочего пространства дирижабля. Рассредоточенный нагрев позволяет повысить быстродействие вертикального маневрирования за счёт сокращения продолжительности теплообмена между источником теплоты и наиболее удалёнными точками камеры. Кроме того, скорость изменения температуры гелия в рабочем пространстве дирижабля оказывается выше, чем при локальном нагреве, поскольку экспонента, отражающая динамику нагрева тела с учётом тепловых потерь в окружающую среду, на начальном этапе характеризуется большим углом проведённой к ней касательной (нагрев при большей разности температур протекает более интенсивно).

Достаточно простой способ реализации рассредоточенного нагрева основан на явлении выделения тепловой энергии при прохождении по проводникам электрического тока. При этом проводники можно разместить в любой плотности и в любой части нагреваемого объёма. Помимо этого, рассредоточенный нагрев исключает необходимость использования вентиляторов, позволяет не допускать явного перегрева отдельных частей камеры и отказаться от использования массивных термостойких материалов для изготовления оболочки.



Рис. 1. Экспериментальный дирижабль в лаборатории  
Fig. 1. Experimental airship in the laboratory

При рассредоточенном нагреве гелия происходит равномерное повышение его температуры во всём внутреннем пространстве дирижабля, что при определенных условиях позволяет получить выигрыш в подъемной силе. Рассмотрим рабочее пространство (камеру), заполненное гелием, имеющее форму эллипсоида вращения с условной перегородкой, разделяющей объём на две части и предотвращающей теплообмен на некоторое время. В одной части находится холодный гелий (V1), в другой – нагретый (V2) (рис. 2). Пусть дирижабль находится в окружении воздуха, имеющего температуру 0°С.

Для расчёта подъемной силы  $F_v^T$  используем выражение<sup>4</sup>:

$$F_v^T = (\rho_v - \rho_{г1})gV_1 + (\rho_v - \rho_{г2})gV_2,$$

где T – температура нагретого гелия, °С;  $\rho_v$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{г1}$  – плотность холодного гелия (при температуре окружающего воздуха), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{г2}$  – плотность нагретого гелия, кг/м<sup>3</sup>; g – ускорение свободного падения, g = 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Для удобства выполнения расчётов сведём значения плотностей воздуха и гелия при температурах 0, 25, 50, 75 и 100°С в таблицу 1.

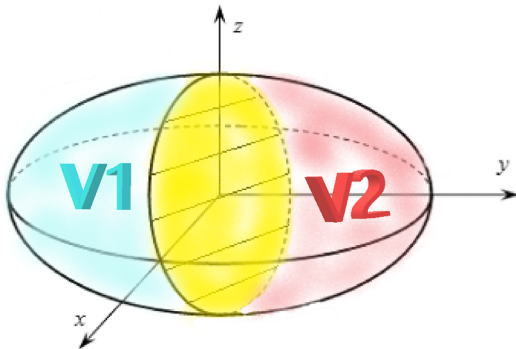


Рис. 2. Условное изображение рабочей камеры дирижабля:  
V1 – объём с холодным гелием;  
V2 – объём с нагретым гелием  
Fig. 2. Conditional image of the working chamber of the airship:  
V1 – volume with cold helium;  
V2 – volume with heated helium

Зависимость плотностей воздуха и гелия от температуры

Таблица 1

Relationship between air and helium density and temperature

Table 1

| Плотность, кг/м³<br>Density, kg/m³ | Температура, °С / Temperature, °C |       |       |       |       |
|------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | 0                                 | 25    | 50    | 75    | 100   |
| Гелий / Helium                     | 0,179                             | 0,177 | 0,152 | 0,141 | 0,134 |
| Воздух / Air                       | 1,292                             | 1,184 | 1,145 | 1,040 | 0,946 |

<sup>1</sup> Щербаков Ю.В. Теория полета дирижаблей: Краткий курс. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 80 с.

Обозначим полный объём эллипсоида символом  $V$ : ( $V = V_1 + V_2$ ). Объёмы, заполненные нагретым гелием, выразим в долях от полного объёма: 0,25V, 0,5V, 0,75V, 1V. В таблице 2 представлены значения подъёмных сил при этих объёмах и температуре гелия 0, 25, 50 и 75°C.

Из результатов расчёта таблицы 2 следует, что меньший нагрев гелия во всём объёме эллипсоида в ряде случаев является более эффективным, чем его нагрев до большей температуры в малом объёме. Например, при нагреве гелия, находящегося в полном объёме эллипсоида до температуры 50°C, подъёмная сила оказывается на 11% выше, чем при локальном нагреве вдвое меньшего объема гелия до температуры 100°C. Кроме того, нагрев гелия до меньших температур определяет уменьшение тепловых потерь в окружающую среду и снижает требования к термической прочности оболочки.

Таблица 2

Подъёмные силы при различных температурах и долях объёма рабочей камеры, занимаемого нагретым гелием

Table 2

Lifting forces at different temperatures and fractions of the working chamber volume occupied by heated helium

| Температура нагретого гелия<br><i>Temperature of heated helium, °C</i> | Доля объёма рабочей камеры, занимаемого нагретым гелием<br><i>Fraction of the working chamber volume occupied by heated helium</i> | Подъёмная сила<br><i>Lifting force, F<sub>г</sub><sup>T</sup>, Н</i> |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 0                                                                      | 0,25                                                                                                                               | 10,92V                                                               |
| 25                                                                     | 0,25                                                                                                                               | 10,93V                                                               |
| 50                                                                     | 0,25                                                                                                                               | 10,98V                                                               |
| 75                                                                     | 0,25                                                                                                                               | 11,02V                                                               |
| 100                                                                    | 0,25                                                                                                                               | 11,04V                                                               |
| 0                                                                      | 0,50                                                                                                                               | 10,92V                                                               |
| 25                                                                     | 0,50                                                                                                                               | 10,93V                                                               |
| 50                                                                     | 0,50                                                                                                                               | 11,05V                                                               |
| 75                                                                     | 0,50                                                                                                                               | 11,10V                                                               |
| 100                                                                    | 0,50                                                                                                                               | 11,14V                                                               |
| 0                                                                      | 0,75                                                                                                                               | 10,92V                                                               |
| 25                                                                     | 0,75                                                                                                                               | 10,93V                                                               |
| 50                                                                     | 0,75                                                                                                                               | 11,12V                                                               |
| 75                                                                     | 0,75                                                                                                                               | 11,20V                                                               |
| 100                                                                    | 0,75                                                                                                                               | 11,25V                                                               |
| 0                                                                      | 1,00                                                                                                                               | 10,92V                                                               |
| 25                                                                     | 1,00                                                                                                                               | 10,94V                                                               |
| 50                                                                     | 1,00                                                                                                                               | 11,18V                                                               |
| 75                                                                     | 1,00                                                                                                                               | 11,29V                                                               |
| 100                                                                    | 1,00                                                                                                                               | 11,36V                                                               |

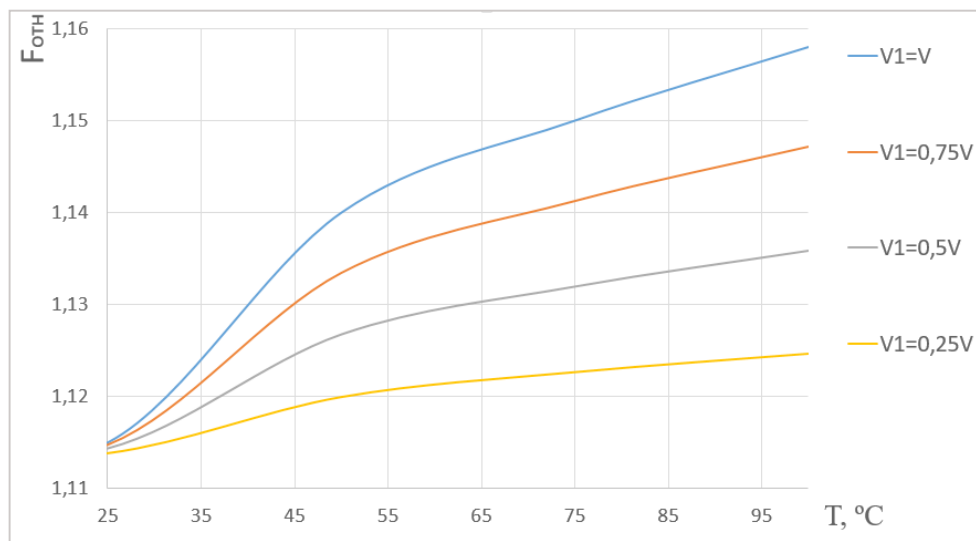
На рисунке 3 представлены зависимости подъёмной силы от объёма заполнения рабочего пространства нагретым гелием и его температуры.

Для реализации рассредоточенного нагрева гелия в рабочем пространстве дирижабля предложено электрооборудование [5], схема размещения которого представлена на рисунке 4а. На рисунке 4б изображена схема соединения токопроводящих элементов электронагревательного прибора.

В качестве оболочки 1 дирижабля использован мягкий газонепроницаемый материал. Электронагревательный прибор 2 содержит токопроводящие элементы 3 из металла с большим удельным электрическим сопротивлением. Токопроводящие элементы не соприкасаются между собой и оболочкой и укреплены на кронштейнах 4, выполненных из лёгкого диэлектрического материала. Отражателем 5 тепловой энергии является тонкослойная фольгированная базальтовая вата, а в качестве блока управления 8 использован регулятор с дискретно-нелинейной статической характеристикой.

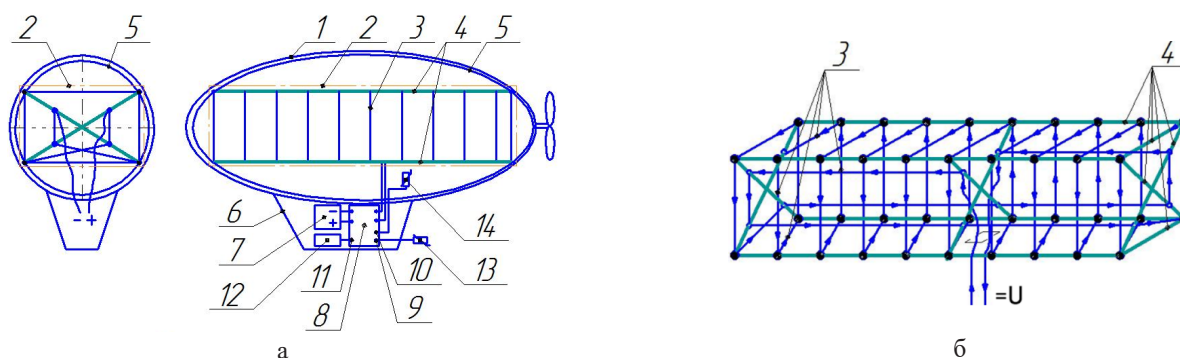
Перед началом использования дирижабля устанавливается требуемая высота полёта посредством задатчика 12. При этом соответствующий сигнал поступает на информационный вход 11 блока управления 8. Сигнал, соответствующий информации о температуре окружающей среды с датчика 13, подается на вход 9 блока управления. Одновременно на вход 10 поступает сигнал, соответствующий температуре гелия, с датчика 14. В блоке управления 8 определяется разность температур гелия и окружающего воздуха, соответствующая разности сигналов на его входах 10 и 9. Далее сформированная разность в виде электрического сигнала сравнивается с сигналом, поступающим на вход 11 и соответствующим требуемой высоте полёта. Сравнение сигналов производится их вычитанием. При величине разности сравниваемых сигналов, превышающей установленный порог срабатывания, происходит переключение блока управления, обеспечивающее подачу питания от аккумулятора 7 электрической энергии к электронагревательному прибору.

Электрический ток протекает по токопроводящим элементам электронагревательного прибора, выделяя тепловую энергию и нагревая гелий. Благодаря креплению токопроводящих элементов на кронштейнах электронагревательный прибор может занимать любой объём (вплоть до полного) внутреннего пространства дирижабля. При этом тепловая энергия выделяется во всех точках электронагревательного прибора, что обеспечивает ускоренный нагрев гелия.



**Рис. 3. Зависимости подъёмной силы от объёма заполнения рабочей камеры нагретым гелием и его температуры**

**Fig. 3. Relationship between the lifting force, the working chamber volume filled with heated helium, and its temperature**



**Рис. 4. Схема размещения электрооборудования дирижабля (а) и соединения токопроводящих элементов электронагревательного прибора (б):**

1 – оболочка; 2 – электронагревательный прибор; 3 – токопроводящие элементы; 4 – кронштейны; 5 – отражатель тепловой энергии; 6 – гондола; 7 – аккумулятор электрической энергии; 8 – блок управления; 9, 10, 11 – информационные входы; 12 – задатчик высоты полёта; 13, 14 – датчики температуры

**Fig. 4. Arrangement of airship electrical equipment (a) and connection scheme of conductive elements of the electrical heating device (b):**

1 – envelope; 2 – electric heating device; 3 – conductive elements; 4 – supports; 5 – heat energy reflector; 6 – nacelle; 7 – electric energy accumulator; 8 – control unit; 9, 10, 11 – information inputs; 12 – flight altitude setter; 13, 14 – temperature sensors

Кроме того, равномерность нагрева повышается за счёт многократного отражения выделяющейся тепловой энергии отражателем 5. Нагрев гелия приводит к уменьшению его плотности, что увеличивает подъёмную силу, и воздухоплавательный аппарат поднимается вверх.

При уменьшении сигнала, соответствующего отклонению разности температур гелия и окружающей среды от величины сигнала, соответствующего требуемой высоте полёта, подача электрической энергии к электронагревательному прибору 2 прекращается. Гелий остывает, его плотность увеличивается, и дирижабль опускается вниз.

Таким образом, за счёт изменения подъёмной силы происходит быстрая стабилизация высоты полёта дирижабля. При необходимости осуществления вертикального маневрирования необходимо ручную или дистанционно воздействовать на задатчик и изменить величину сигнала, поступающего на информационный вход 11 блока управления. Одновременная обработка сигналов с задатчика высоты полёта и датчиков температуры снаружи и внутри дирижабля позволяет автоматически учитывать разность температур газа и окружающей среды и корректировать высоту полёта за счёт управления подачей питания на электронагревательный прибор.

### Выводы

1. Повышение эффективности вертикального маневрирования беспилотного дирижабля может быть достигнуто посредством рассредоточенного нагрева гелия в рабочем пространстве.

2. Рассредоточенный нагрев гелия определяет ускоренное изменение его плотности, обеспечивает уменьшение энергозатрат на нагрев и снижает требования к термической прочности оболочки.

### Список литературы

1. Курченко Н.Ю., Даус Ю.В., Труфляк Е.В., Ильченко Я.А. Параметры применения беспилотных летательных аппаратов при обработке средствами защиты растений сельскохозяйственных культур // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1 (69). С. 527-536. EDN: OIBLWB
2. Галушина П.С., Кравчук А.А. Применение авиации в сельском хозяйстве Российской Федерации // Аграрное образование и наука. 2023. № 2. С. 8. EDN: VZXBAU
3. Андреев С.А., Белов Д.В. Вертикальное маневрирование микродирижаблей сельскохозяйственного назначения // Сборник статей XVII Международной научно-практической конференции «European Scientific Conference», 7 ноября 2019 г. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 72-75. EDN: IKGDBK
4. Андреев С.А., Белов Д.В. Оценка энергозатрат на нагрев гелия при вертикальном маневрировании дирижаблей сельскохозяйственного назначения // Доклады ТСХА. 2020. Вып. 292. Ч. 1. С. 102-107. EDN: OCPRQL
5. Воздухоплавательный аппарат: Патент RU197257 U1, МПК В64В1/62 / С.А. Андреев, Д.В. Белов. Заяв. № 2020106046, 10.02.2020, опубл. 16.04.2020. Бюл. № 11. EDN: FOXVEE

### Информация об авторах

**Сергей Андреевич Андреев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент;  
s.andreev@aol.com; <https://orcid.org/0000-0002-8945-963X>  
**Дмитрий Владимирович Белов**<sup>2</sup>,  
аспирант; moyggddl@gmail.com;  
<https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>  
<sup>1,2</sup> Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская  
Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

### Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 08.07.2023; поступила после рецензирования и доработки 24.10.2023; принята к публикации 25.10.2023

3. Техническая реализация рассредоточенного нагрева гелия достигается использованием электронагревательного прибора, токопроводящие элементы которого размещены по всему объему рабочего пространства. При этом управление подачей электрической энергии к электронагревательному прибору осуществляется в зависимости от температуры гелия, температуры окружающей среды и заданной высоты полета.

### References

1. Kurchenko N.Yu., Daus Yu.V., Truflyak E.V., Ilchenko Ya.A. Parameters of the use of unmanned aerial vehicles in the processing of crop protection products. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2023;1:527-536. (In Rus.)
2. Galushina P.S., Kravchuk A.A. The use of aviation in agriculture of the Russian Federation. *Agrarnoe Obrazovanie i Nauka*. 2023;2:8. (In Rus.)
3. Andreev S.A., Belov D.V. Vertical maneuvering a microdrivable of agricultural purpose. *Collection of papers of the XVII International Scientific and Practical Conference "European Scientific Conference"*, November 07, 2019. Penza, Science and Education. 2019. P. 72-75. (In Rus.)
4. Andreev S.A., Belov D.V. Estimation of energy consumption for heating helium during vertical maneuvering of airships for agricultural purposes. *Doklady TSKhA*. 2020;292(1):102-107. (In Rus.)
5. Andreev S.A., Belov D.V. Aerostat: Patent 197257 Russian Federation, IPC B64B1. No. 2020106046, 2020. (In Rus.)

### Author Information

**Sergey A. Andreev**<sup>1</sup>, CSc (Eng), Associate Professor,  
s.andreev@aol.com; <https://orcid.org/0000-0002-8945-963X>  
**Dmitriy V. Belov**<sup>2</sup>, postgraduate student, moyggddl@gmail.com;  
<https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>  
<sup>1,2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev  
Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow,  
127434, Russian Federation

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 08.07.2023; revised 24.10.2023; accepted 25.10.2023

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.563.2:631.53.011:633.358

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-65-72>

## Влияние различных способов сушки на физико-механические свойства и всхожесть семян гороха

*А.Н. Мартеха<sup>1</sup>, В.В. Торопцев<sup>2</sup>*

<sup>1,2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

<sup>1</sup> [man6630@rgau-msha.ru](mailto:man6630@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

<sup>2</sup> [toroptsev@rgau-msha.ru](mailto:toroptsev@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

**Аннотация.** Процесс сушки посевного материала влияет на качество семян. С целью выбора подходящего способа сушки для зелёного горошка проведено исследование по влиянию конвективной и вакуумной сушки, а также комбинации сушки и предварительной микроволновой обработки семян на всхожесть и физико-механические свойства зерна гороха. Конвективная сушка в сушильном шкафу проводилась при температуре 65...70°C, вакуумная сушка в вакуумно-ротаторной сушилке – при той же температуре и давлении 0,9 МПа. Предварительная микроволновая обработка семян проводилась при частоте электромагнитного поля 900 МГц и импульсном излучении длительностью 60 с. В качестве свежего образца исследовали замороженный при –20°C и предварительно бланшированный горох. Механические свойства свежеразмороженного и сушеного гороха измеряли с помощью анализатора текстуры Структурометр СТ-2. Измерения окраски зёрен гороха производились трехфилтровым колориметром КФК-2. Через 24 ч обработки для обоих способов сушки получен абсолютно сухой продукт. В результате сушки геометрический и арифметический диаметры зёрен гороха уменьшились на 21...23%. При конвективной сушке нарушение сферичности зёрен гороха наблюдалось у 4...5% зёрен. При вакуумной сушке в сравнении с конвективной сушкой наблюдалось статистически значимое снижение плотности зёрен гороха на 6...% и нагрузки на 50...70%. Микроволновая обработка семян, и особенно совместно с конвективной сушкой, оказывает статистически значимое влияние на механические свойства и внутреннюю текстуру гороха. Вакуумная сушка в отличие от микроволновой обработки и конвективной сушки не влияет на цвет семян. Вакуумная сушка с предварительной микроволновой обработкой обеспечила наивысшую всхожесть семян гороха 95...97%. Наибольшая эффективность вакуумной сушки с предварительной микроволновой обработкой семян зелёного горошка позволяет рекомендовать данный вид сушки при уборке и переработке урожая зерновых бобовых культур.

**Ключевые слова:** способ сушки семян гороха, физико-механические свойства семян гороха, конвективная сушка, вакуумная сушка, микроволновая обработка семян, сушка зёрен гороха, всхожесть семян гороха

**Для цитирования:** Мартеха А.Н., Торопцев В.В. Влияние различных способов сушки на физико-механические свойства и всхожесть семян гороха // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 65-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-65-72>

ORIGINAL PAPER

## Influence of various types of drying on the germination and physico-mechanical properties of pea seeds

*A.N. Martekha<sup>1</sup>, V.V. Toroptsev<sup>2</sup>*

<sup>1,2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

<sup>1</sup> [man6630@rgau-msha.ru](mailto:man6630@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

<sup>2</sup> [toroptsev@rgau-msha.ru](mailto:toroptsev@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

**Abstract.** Seed drying affects the quality of seed material. To select a suitable drying method for green peas, the authors studied the effect of convective and vacuum drying, as well as a combination of drying and preliminary

microwave treatment of seeds on the germination and physic-mechanical properties of peas. The temperature of convective drying in an oven ranged between 65 and 70°C, vacuum drying in a vacuum rotary dryer was carried out at the same temperature and a pressure of 0.9 MPa. Preliminary microwave treatment of seeds was carried out at an electromagnetic field frequency of 900 MHz and pulsed radiation lasting for 60 s. Peas frozen at -20°C and pre-blanching were tested as a fresh sample. The mechanical properties of freshly defrosted and dried peas were measured using a texture analyzer, Structometer ST-2. The color of pea grains was measured with a three-filter colorimeter KFK-2. The completely dry product was obtained after 24 hours of processing for both drying methods. As a result of drying, the geometric and arithmetic diameter of pea grains decreased by 21 to 23%. During convective drying, the loss of sphericity in peas was observed in 4 to 5% of the grains. During vacuum drying, as contrasted to convective drying, a statistically significant decrease in the density of pea grains by 6 to 7% and load by 50 to 70% was observed. Microwave treatment of seeds, especially in combination with convective drying, has a statistically significant effect on the mechanical properties and internal texture of peas. Vacuum drying, unlike microwave processing and convective drying, does not affect the seed color. Vacuum drying with preliminary microwave treatment ensured the highest germination of pea seeds of 95 to 97%. The greatest efficiency of vacuum drying with preliminary microwave treatment of green peas makes this type of drying a good option for harvesting and processing legumes.

**Keywords:** method of drying pea seeds, physical and mechanical properties of pea seeds, convective drying, vacuum drying, microwave treatment of seeds, drying of pea grains, germination of pea seeds

**For citation:** Martekha A.N., Toroptsev V.V. Influence of various types of drying on the germination and physico-mechanical properties of pea seeds. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):65-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-65-72>

## Введение

Процесс сушки посевного материала влияет на качество семян [1]. Недавние исследования по сушке сельскохозяйственной продукции с использованием вакуумной и микроволновой техники показали перспективность комбинированной сушки, обеспечивающей высокое качество при минимально возможных энергозатратах. На последнем этапе сушки применение вакуума и СВЧ-воздействия одновременно с контролем температуры способствует созданию новых биоактивных соединений и хрустящей текстуры высушенного продукта [2]. Тем не менее для оптимизации процесса комбинированной сушки по критерию показателя качества готовой продукции требуются дополнительные исследования других видов обработки, интенсифицирующих удаление влаги, обеспечивающих улучшение органолептических характеристик и сохранение полезных свойств пищевых продуктов.

Отметим, что механические и термические повреждения в процессе сушки семян составляют большую часть среди всех травмированных семян, прошедших послеуборочную обработку. Повышение доли травмированных семян на 10% приводит к снижению урожайности более чем на 1 ц/га. Поскольку физико-механические свойства семян влияют на их качество, то важно изучить изменение этих свойств при различных способах сушки [1].

Среди зерновых культур зелёный горошек отличается большим содержанием белка и является хорошим лечебно-профилактическим средством [3].

Наиболее распространёнными способами консервации зелёного горошка являются сушка на солнце, конвективная сушка горячим воздухом, в кипящем слое, с использованием микроволнового излучения, сушка с замораживанием и с инфракрасным излучением, а также вакуумная сушка. При консервации зелёного горошка возможна комбинация двух или более способов сушки [3]. Недостаточная изученность влияния различных способов сушки на всхожесть и физико-механические свойства семян гороха послужила целью исследований.

**Цель исследований:** сравнительный анализ различных способов сушки зерна гороха для установления их влияния на всхожесть и физико-механические свойства сырья.

## Материалы и методы

В исследованиях использован замороженный при температуре -20°C горох, предварительно бланшированный. В ходе экспериментов отбирали более крупные зёрна однородных размеров с коэффициентом вариации менее 10%.

Выбор параметров процесса сушки обусловлен сохранением качества сырья [2, 3].

Конвективную сушку семян гороха проводили в сушильном шкафу при температуре 65...70°C. Вакуумная сушка в вакуумно-ротаторной сушилке производилась 300 кг/ч осуществлялась при температуре 65...70°C и пониженном давлении 0,9 МПа.

Также в процессе конвективной и вакуумной сушки исследовалось влияние предварительной

микроволновой обработки семян в аппарате производительностью 250 кг/ч, электрической мощностью 700 Вт, при частоте электромагнитного поля 900 МГц и импульсном излучении длительностью 60 с.

Все испытания проводили в трехкратной повторности с образцами массой около 25 г, которые помещали на алюминиевые подносы. Кинетика сушки измерялась путём забора образцов и их взвешивания с использованием электронных весов каждый час в течение 6 ч. Последнее измерение проведено через 24 ч после начала сушки, и был получен абсолютно высушенный образец зёрен гороха [4].

Длину, ширину и высоту горошин измеряли подвижным щупом (класс точности – 0,1 мм). Измерения проводили до сушки и после неё в 10-кратной повторности. На основании полученных размеров зёрен гороха определились следующие показатели:

– геометрический диаметр зерна  $D_g$ , мм,

$$D_g = (l \cdot w \cdot t)^{1/3}, \quad (1)$$

где  $l$ ,  $w$ ,  $t$  – длина, ширина и высота зёрен гороха соответственно, мм;

– среднеарифметическое значение диаметра зерна  $D_a$ , мм,

$$D_a = \frac{(l + w + t)}{3}, \quad (2)$$

– сферичность зерна,  $\psi$ ,

$$\psi = \frac{D_g}{t}, \quad (3)$$

– форма зерна,  $f$ , определяемая по стандарту ISO 5691-1981 [5]:

$$f = \frac{l^2}{w \cdot t} \cdot 100. \quad (4)$$

На основании измеренного веса и содержания влаги в образцах гороха в начале, во время и в конце процесса усадки был определен коэффициент влажности  $(\varphi_i/\varphi_0)$  [6], где  $\varphi_i$  – содержание влаги в определённый момент измерения,  $\varphi_0$  – начальная влажность.

В начале и в конце конвективной и вакуумной сушки измеряли массу и объём образца, на основании чего определяли удельную массу образца. Измерение объёма производили на аналитических весах  $GH$  (класс точности – 0,001 г), измеряя изменение массы при погружении образца в изопропиловый спирт плотностью 786 кг/м<sup>3</sup>. Размер выборки – 6...7 зёрен гороха, измерение проводили в 10-кратной повторности.

Механические свойства свежеразмороженного и сушёного гороха измеряли с помощью анализатора текстуры Структурометр СТ-2 (с ячейкой для измерения нагрузок до 500 Н). Проводились испытания на сжатие. Давление создавалось с помощью

плоской металлической пластины диаметром 50 мм, помещённой на плоское металлическое основание из того же материала. При испытании нагрузки, действующей на зерно гороха, скорость движения пластины составляла 30 мм/мин. Измерения заканчивали при достижении значения усилия нагрузки 150 Н. При приложении нагрузки к высушенному зерну гороха очень быстро происходит его растрескивание, а затем и полное разрушение [7]. При анализе данных измерений было установлено, что образцы ломались на расстоянии 1,5 мм.

Для более точного определения влияния способов сушки на механические свойства зерна гороха приняты интервалы пройденного пути ( $D$ ): 0...0,5; 0,5...1,0; 1,0...1,5 мм. Для указанных интервалов расстояний рассчитывали средние значения ( $\bar{X}$ ), стандартное отклонение ( $S_d$ ) и коэффициент вариации ( $C_v$ ) в зависимости от нагрузки ( $F$ ). Испытание давлением проводили в 10 повторениях.

Для измерения окраски зёрен гороха до сушки и после неё разными методами, а также предварительно обработанных СВЧ-излучением использовали трехфилтровый колориметр КФК-2. Цветовая система CIE  $L^*a^*b^*$ , основанная на методе трех фильтров, была выбрана для выражения количественных параметров цвета. В этой системе  $L^*$  представляет яркость, а координаты  $a^*$  и  $b^*$  – цвет. Отрицательное значение  $a^*$  обозначается зелёным цветом, а положительное значение – красным. Отрицательный  $b^*$  – жёлтый цвет, положительный – синий [8]. Суммарные цветовые различия  $\Delta E^*$  рассчитывали по уравнению:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}, \quad (5)$$

где  $L_0^*$ ,  $L^*$  – яркость зёрен до сушки и после неё;  $a_0^*$ ,  $b_0^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  – цветовая гамма зёрен до сушки и после неё.

Горох в несколько слоев насыпали в металлическую ёмкость и после калибровки прибора проводили по 10 измерений для каждого варианта.

Для проведения лабораторных опытов на всхожесть из насыпи культуры с помощью щупа по стандартной методике отбирались по 1 кг пробы, которые были упакованы в мешки и опечатаны. Мешки доставляли в лабораторию, вскрывали, вручную отбирали по 100 зёрен для определения всхожести в опытной партии. Опыт проведён в четырёх повторностях, использован метод проращивания на ложе из песка [1].

Статистически значимые различия при пороге значимости 5% между способами сушки выполняли путём тестирования дисперсионного анализа типа ANOVA, а более точное определение наличия статистически значимых различий между отдельными вариантами производили с помощью метода Дункана.

Обработка результатов тестирования производилась с использованием пакета программ *Statistica*. Значения среднего арифметического  $\bar{X}$ , стандартного отклонения  $S_d$  и коэффициента вариации  $C_v$  рассчитывали с использованием программного пакета *Microsoft Excel*.

### Результаты и их обсуждение

**Размеры и форма зерна гороха.** Измеренные размеры и параметры формы зёрен гороха (геометрический и арифметический диаметры, сферичность и коэффициент формы) представлены в таблице 1. Зерно гороха содержит около 75% воды, поэтому неизбежно изменение его размеров в процессе сушки [9]. При анализе сферичности статистически значимые различия между свежими и высушенными образцами не обнаружены. Однако у образцов, высушенных конвективным и вакуумным способами сушки, различия проявились. Применение предварительной микроволновой обработки не вызывало изменения сферичности для наблюдаемых способов сушки. В соответствии со стандартом ISO 5691-1981 измеренные зёрна свежего и сушёного гороха по значениям формы относятся к группе круглых (значения индекса – 100...160).

Отметим, что для вакуумной сушки, проводимой при высокой температуре (65...70°C), определялись статистически более значимые показатели формы по сравнению со свежими и конвективно высушенными образцами.

**Влажность.** Первоначальная влажность зёрен гороха  $\phi_0$ , предварительно замороженных при температуре –20°C и помещённых в пластиковую упаковку, составила 74,78% от начальной влажности, что согласуется со значениями И.С. Богомолова [3]. По изменению  $\phi/\phi_0$  установлено большое влияние способа сушки на её скорость. За трёхчасовой период конвективной сушки и конвективной сушки с предварительным микроволновым воздействием влажность снизилась соответственно до 15 и 16%, а при вакуумной сушке и вакуумной сушке с предварительным микроволновым воздействием по-прежнему имела высокие значения – 53 и 56% (рис. 1). Через 5 ч различия между способами сушки значительно уменьшились, а после 6 ч были минимальными. Через 24 ч обработки при заданных параметрах для обоих способов сушки был получен абсолютно сухой продукт. Предварительная обработка микроволновым излучением не оказала существенного влияния на изменение влажности.

Таблица 1

Размер и форма гороха в зависимости от способа сушки

Table 1

Dimension and shape of the grain of peas depending on drying methods

| Вид воздействия<br>Type of impact                                                                   | Параметр*<br>Parameter | Диаметр зерна, мм / Grain diameter, mm |                                                | Сферичность<br>зерна<br>Grain sphericity,<br>$\psi$ | Форма<br>зерна<br>Grain shape,<br>$f$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                                                                     |                        | Геометрический<br>Geometric, $D_g$     | Среднеарифметический<br>Arithmetic mean, $D_a$ |                                                     |                                       |
| Без воздействия (свежий)<br>No impact (fresh)                                                       | $\bar{X}$              | 8,26a**                                | 8,27a                                          | 1,11ab                                              | 127,66b                               |
|                                                                                                     | $S_d$                  | 0,78                                   | 0,76                                           | 0,05                                                | 11,08                                 |
|                                                                                                     | $C_v$                  | 9,24                                   | 9,25                                           | 3,97                                                | 8,67                                  |
| Конвективная сушка<br>Convective drying                                                             | $\bar{X}$              | 6,48b                                  | 6,50b                                          | 1,09b                                               | 126,65b                               |
|                                                                                                     | $S_d$                  | 0,91                                   | 0,92                                           | 0,05                                                | 17,91                                 |
|                                                                                                     | $C_v$                  | 14,16                                  | 14,25                                          | 4,12                                                | 14,12                                 |
| Конвективная сушка +<br>+ микроволновое воздействие<br>Convective drying +<br>+ microwave treatment | $\bar{X}$              | 6,31b                                  | 6,34b                                          | 1,12ab                                              | 140,05ab                              |
|                                                                                                     | $S_d$                  | 0,79                                   | 0,73                                           | 0,11                                                | 26,73                                 |
|                                                                                                     | $C_v$                  | 12,14                                  | 11,77                                          | 10,14                                               | 18,55                                 |
| Вакуумная сушка<br>Vacuum drying                                                                    | $\bar{X}$              | 6,42b                                  | 6,49b                                          | 1,16a                                               | 151,50a                               |
|                                                                                                     | $S_d$                  | 0,66                                   | 0,67                                           | 0,12                                                | 20,42                                 |
|                                                                                                     | $C_v$                  | 10,36                                  | 10,04                                          | 8,07                                                | 13,46                                 |
| Вакуумная сушка +<br>+ микроволновое воздействие<br>Vacuum drying + microwave treatment             | $\bar{X}$              | 6,40b                                  | 6,45b                                          | 1,15a                                               | 148,01a                               |
|                                                                                                     | $S_d$                  | 0,51                                   | 0,50                                           | 0,06                                                | 15,05                                 |
|                                                                                                     | $C_v$                  | 8,06                                   | 7,87                                           | 5,74                                                | 10,15                                 |

\* $\bar{X}$  – среднее значение;  $S_d$  – стандартное отклонение;  $C_v$  – коэффициент вариации.

\*\*a, b и ab указывают на статистически равные значения при уровне значимости 5%.

\* $\bar{X}$  – average value;  $S_d$  – standard deviation;  $C_v$  – coefficient of variation.

\*\*a, b and ab indicate statistically equal values at the 5% significance level.

**Удельная масса (плотность).** Самые высокие значения плотности ( $\rho$ ) были зафиксированы в свежем образце. При разных способах сушки значения удельной массы зёрен отличались (рис. 2), а это означает, что существуют различия во внутренней текстуре материала. Значения удельной массы зерна существенно ниже по сравнению с удельной массой воды, что свидетельствует о наличии остаточных пустот в ткани [9]. Наименьшие значения удельной массы были определены для зёрен гороха, высушенных в вакууме. Применение кратковременного микроволнового излучения перед сушкой не оказало статистически значимого влияния на изменение удельной массы.

**Механические свойства.** Образцы высушенных зёрен гороха и предварительно обработанных СВЧ-излучением подвергли сжатию и получили зависимость значений нагрузки ( $F$ ) от деформации ( $\delta$ ) (рис. 3).

Зерно гороха, предварительно бланшированное и замороженное, а затем размороженное, не оказывает большого сопротивления прикладываемому усилию, а значение нагрузки постоянно увеличивается без резких скачков. Можно сделать вывод о том, что зёрна гороха имеют низкие значения показателей прочности на сжатие и твёрдости, которые достигаются при медленном увеличении деформации. Через 24 ч сушки одним из применяемых способов при температуре 70°C горох полностью высыхает и становится твёрдым и ломким.

При определении механических свойств наибольший интерес представляет определение величины нагрузки и деформации, при которых происходит хрупкое разрушение зерна [10]. Изменение деформаций наблюдалось в трёх интервалах: 0...0,5; 0,5...1,0; 1,0...1,5 мм. Уже в первом интервале (0...0,5 мм) отчетливо выделяются более высокие

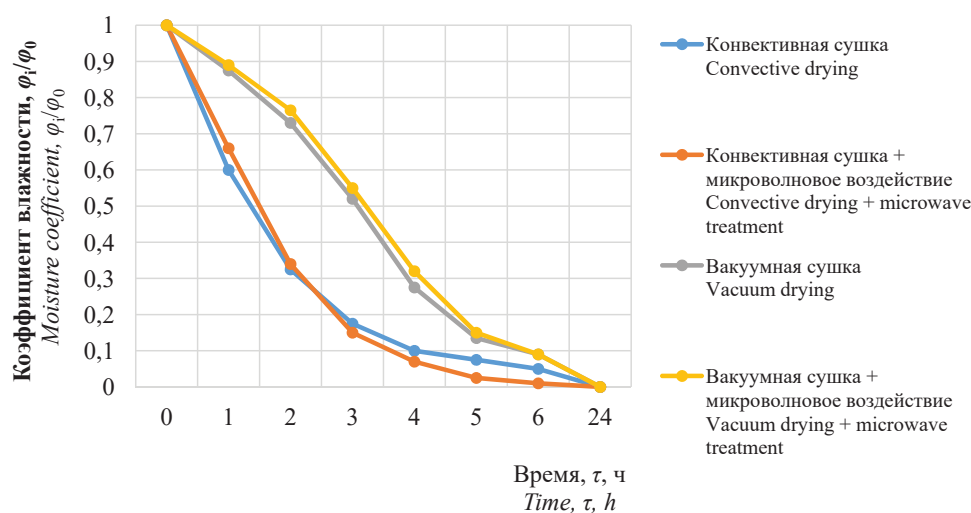


Рис. 1. Изменение коэффициента влажности ( $\phi_i/\phi_0$ ) гороха во времени при разных способах сушки

Fig. 1. Change in the moisture coefficient ( $\phi_i/\phi_0$ ) of peas over time with different drying methods

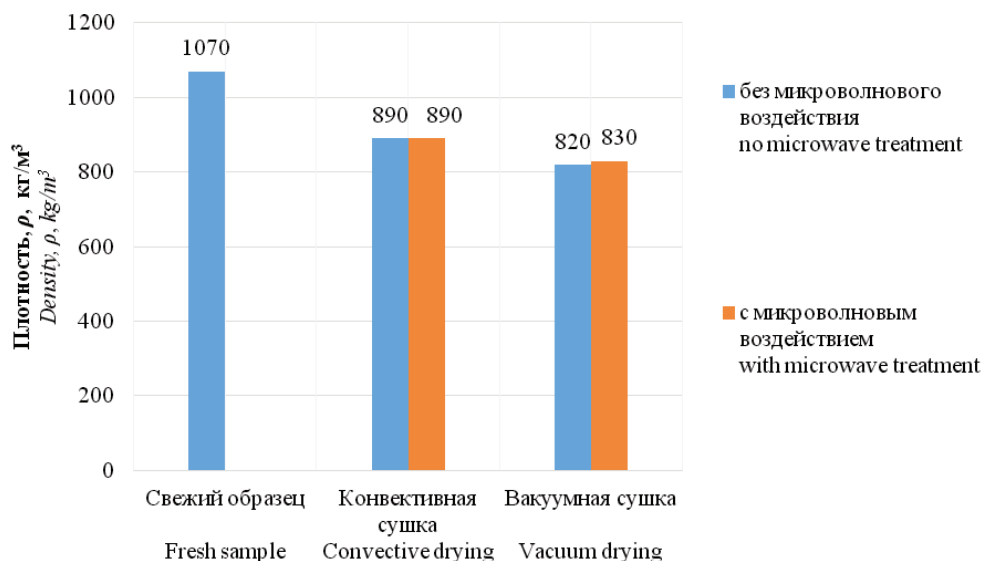


Рис. 2. Изменение плотности гороха в зависимости от способа сушки

Fig. 2. Density of pea grains depending on the drying methods

значения нагрузки при применении конвективной сушки с предварительной СВЧ-обработкой и без нее.

В первом интервале при вакуумной сушке были получены более низкие значения нагрузки, чем при конвективной сушке. Коэффициент вариации в первом интервале достигал 67...75%, что является следствием большого разброса значений измеряемых нагрузок ввиду неоднородного поведения материала. Во втором и третьем интервалах (0,5...1,0 и 1,0...1,5 мм) при обоих способах сушки наблюдалось увеличение нагрузки, однако её значения были значительно выше при конвективной сушке, чем при вакуумной.

На основании разницы в измеренных показаниях установлено, что способ сушки влияет на внутреннюю текстуру зёрен гороха. Расчётное значение коэффициента вариации во втором и третьем интервалах уменьшилось в несколько раз (16...42%), что демонстрирует характер изменения нагрузки после начального хрупкого разрушения зёрен, а также позволяет сделать более точные выводы. Микроволновое излучение, применяемое при конвективной сушке, значительно

снижает значения нагрузки, однако при вакуумной сушке с применением СВЧ-воздействия они остаются прежними или даже увеличиваются.

Измеренные значения, полученные в эксперименте, подтверждают влияние микроволнового излучения на механические свойства гороха, так как воздействие такого поля на материал высокой влажности приводит к разрушению внутренней структуры за счёт интенсивного нагрева. Еще большее влияние на механические свойства и консистенцию зёрен гороха оказывает комбинированная конвективно-микроволновая или вакуумно-микроволновая сушка.

**Всхожесть.** Проверка посевных качеств семян показала, что семена гороха, высушенные комбинированным способом, имеют более высокую всхожесть (табл. 2).

**Цвет.** Установлены статистически значимые различия показателей окраски как между замороженным и размороженным горохом, так и между свежим и сушёным горохом, а также различия между применяемыми способами сушки (табл. 3).

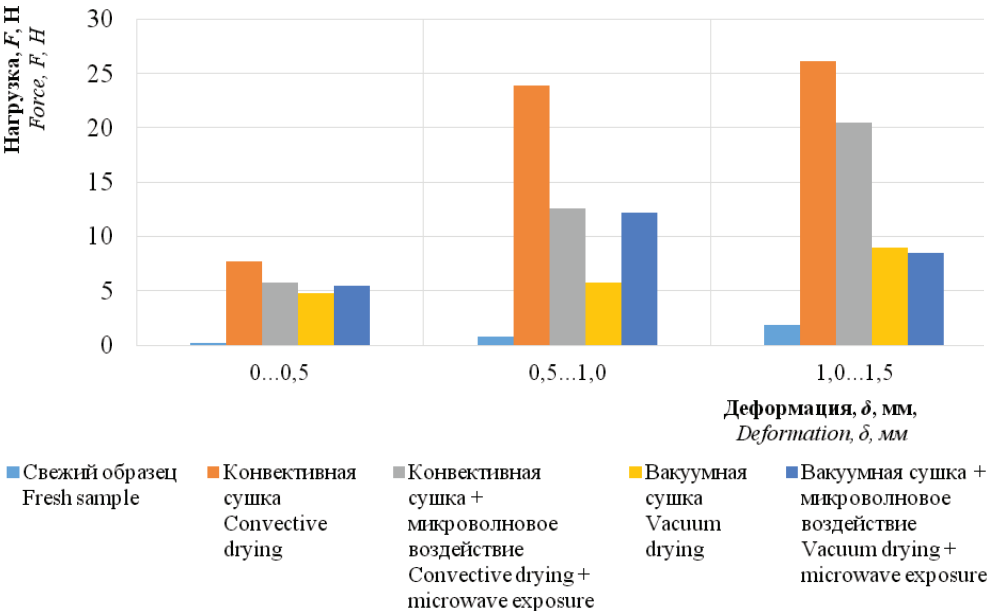


Рис. 3. Изменение нагрузки в зависимости от деформации при различных способах сушки гороха  
Fig. 3. Change of load depending on distance and methods of pea drying

Влияние способов сушки на всхожесть семян гороха

Таблица 2

Effect of drying methods on the germination of pea seeds

Table 2

| Показатель<br>Index                 | Способ воздействия / Treatment method   |                                                                                           |                                  |                                                                                    |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                                     | Конвективная сушка<br>Convective drying | Конвективная сушка + микроволновое воздействие<br>Convective drying + microwave treatment | Вакуумная сушка<br>Vacuum drying | Вакуумная сушка + микроволновое воздействие<br>Vacuum drying + microwave treatment |
| Всхожесть, %<br>Germination rate, % | 92                                      | 95                                                                                        | 94                               | 97                                                                                 |

Таблица 3

Параметры цвета в зависимости от способа сушки зерна гороха

Table 3

Color parameters depending on the drying method of peas

| Вид образца и способ сушки<br>Type of sample and drying method                                                                     | Яркость, $L^*$<br>Brightness, $L^*$ | Параметр цвета / Color parameter |                             | Суммарные различия<br>в цвете, $\Delta E^*$<br>Total color differences, $\Delta E^*$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                    |                                     | Зеленый, $a^*$<br>Green, $a^*$   | Синий, $b^*$<br>Blue, $b^*$ |                                                                                      |
| Замороженный сырой<br>Frozen raw                                                                                                   | 44,71bc**                           | -13,08c                          | 21,88d                      | 47,56c                                                                               |
|                                                                                                                                    | 2,06                                | 1,21                             | 1,51                        | 2,12                                                                                 |
|                                                                                                                                    | 4,65                                | -9,18                            | 6,94                        | 4,42                                                                                 |
| Размороженный сырой<br>Defrosted raw                                                                                               | 39,71d                              | -23,05e                          | 34,61a                      | 58,95a                                                                               |
|                                                                                                                                    | 2,21                                | 1,45                             | 1,48                        | 1,89                                                                                 |
|                                                                                                                                    | 5,55                                | -6,32                            | 4,25                        | 3,21                                                                                 |
| Высушенный конвективной сушкой<br>Dried by convective drying                                                                       | 45,02b                              | -12,21bc                         | 26,31c                      | 48,07c                                                                               |
|                                                                                                                                    | 1,12                                | 1,24                             | 2,57                        | 1,51                                                                                 |
|                                                                                                                                    | 2,45                                | -10,25                           | 9,75                        | 3,12                                                                                 |
| Высушенный конвективной сушкой<br>с предварительным микроволновым воздействием<br>Dried by convective drying + microwave treatment | 50,22a                              | -8,41a                           | 20,65d                      | 45,75d                                                                               |
|                                                                                                                                    | 1,81                                | 1,13                             | 2,38                        | 1,62                                                                                 |
|                                                                                                                                    | 3,62                                | -13,36                           | 11,58                       | 3,56                                                                                 |
| Высушенный вакуумной сушкой<br>Dried by vacuum drying                                                                              | 43,02c                              | -14,31d                          | 29,66b                      | 50,31b                                                                               |
|                                                                                                                                    | 2,84                                | 0,44                             | 0,72                        | 1,15                                                                                 |
|                                                                                                                                    | 6,60                                | -3,13                            | 2,45                        | 2,31                                                                                 |
| Высушенный вакуумной сушкой<br>с предварительным микроволновым воздействием<br>Dried by vacuum drying + microwave treatment        | 44,87bc                             | -12,02b                          | 29,79b                      | 48,93bc                                                                              |
|                                                                                                                                    | 1,23                                | 0,21                             | 0,48                        | 0,50                                                                                 |
|                                                                                                                                    | 2,75                                | -1,67                            | 1,57                        | 1,05                                                                                 |

**Примечание.** Отрицательное значение  $a^*$  – зелёный цвет, положительное значение – красный цвет; отрицательное значение  $b^*$  – жёлтый цвет, положительное значение – синий цвет.

\*\*a, b, c, d и bc указывает на статистически равные значения при уровне значимости 5%.

A negative value of  $a^*$  is marked green, and a positive value is marked red. Negative  $b^*$  is yellow, positive is blue.

\*\*a, b, c, d and bc indicate statistically equal values at the 5% significance level.

Наибольшее значение параметра яркости ( $L^*$ ) было определено при конвективной сушке с предварительной обработкой микроволнами. Наибольшая доля зелёной и синей окраски зафиксирована в свежеразмороженном образце гороха. При вакуумной сушке по сравнению с конвективной сушкой доли зелёного и синего цвета статистически более значимы.

Суммарные различия в цвете, просматриваемые через параметр  $\Delta E^*$ , также подтверждают установленные зависимости. Статистически наиболее значимые показатели получены для свежеразмороженного образца зёрен гороха. Значения, полученные при вакуумной сушке, статистически более значимы по сравнению с конвективной сушкой.

Эксперимент также показал, что вакуумная сушка позволяет получить продукт, близкий по цвету к свежему гороху. Предварительная обработка СВЧ-излучением оказала отрицательное влияние, особенно на параметры зелёного и синего цвета ( $a^*$  и  $b^*$ ), что еще более выражено при конвективной сушке.

# Выводы

1. Исследования по сушке зелёного горошка с использованием конвективного, вакуумного и микроволнового способов показали перспективность применения вакуумной сушки с микроволновым воздействием, обеспечивающей всхожесть сырья на уровне 95...97%.
2. Микроволновое воздействие и конвективная сушка влияют на механические свойства зёрен гороха (значительно снижаются значения нагрузки), однако при вакуумной сушке с применением СВЧ значения остаются прежними или увеличиваются.
3. Результаты исследований можно использовать в качестве рекомендаций по выбору подходящего способа сушки зелёного горошка. Исследование технологии микроволнового воздействия является направлением дальнейших исследований.

## Список литературы

1. Ключников А.С. Исследование влияния новой технологии сушки на посевные качества семян зерновых культур // Известия ТСХА. 2020. № 1. С. 49-60. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2020-1-49-60>
2. Окунев А.В. Современные методы вакуумной и микроволновой сушки зерна и семян // Российский электронный научный журнал. 2021. № 1(39). С. 51-59. <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2021-39-1-51-59>
3. Богомолов И.С., Клейменова Н.Л., Копылов М.В. Исследование процесса сушки зерновых культур // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 14-19. EDN: FOQYNS
4. Королёв А.А., Урубков С.А., Смирнов С.О. Технологические аспекты получения бобового сырья для пищевых концентратов быстрого приготовления // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2019. № 12. С. 126-133. EDN: TBHRQL
5. Антипов С.Т., Овсянников В.Ю., Мартеха А.Н. Параметры процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в виброкипящем слое // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 12. С. 54-55. EDN: RSQMQF
6. Антипов С.Т., Шахов С.В., Мартеха А.Н., Берестовой А.А. Оптимизация процесса прессования семян сафлора в ультразвуковом поле // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 79, № 1. С. 40-45. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-1-40-45>
7. Прибытков А.В., Овсянников В.Ю., Мартеха А.Н., Торопцев В.В. Основные факторы, влияющие на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 5. С. 33-35. EDN: UJZSZH
8. Константинов М.М., Румянцев А.А., Борзов Н.А. Методология количественной оценки цвета гречневой крупы при ее обработке // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (46). С. 105-110. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2018-46-2-105-110>
9. Бабичева Е.Л., Рудобашта С.П., Сидельников И.И. Псевдооживление семян проса и гороха // Агроинженерия. 2021. № 5 (105). С. 13-19. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-5-13-19>
10. Курманов А.К., Камышева Н.А. Частная методика по исследованию процесса разрушения зерна гороха // 3i: Intellect, Idea, Innovation – Интеллект, идея, инновация. 2018. № 4. С. 76-81. EDN: NCNPZI

## Информация об авторах

**Александр Николаевич Мартеха<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доцент; [man6630@rgau-msha.ru](mailto:man6630@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

**Василий Владимирович Торопцев<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, доцент; [toroptsev@rgau-msha.ru](mailto:toroptsev@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

<sup>1,2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

## Вклад авторов

А.Н. Мартеха – концептуализация, методология, проведение исследований, руководство исследованиями, создание черновика рукописи, администрирование проекта  
В.В. Торопцев – проведение исследований, создание черновика рукописи, визуализация данных

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 11.08.2023; после рецензирования и доработки 22.12.2023; принята к публикации 28.12.2023

## References

1. Klyuchnikov A.S. Study of the influence of new drying technology on the quality of grain seeds. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2020;1:49-60. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2020-1-49-60>
2. Okunev A.V. Modern methods of vacuum and microwave drying of grain and seeds. *Rossiyskiy Elektronniy Nauchniy Zhurnal*. 2021;1:51-59 (In Rus.) <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2021-39-1-51-59>
3. Bogomolov I.S., Klejmenova N.L., Kopylov M.V. Research of grain crops drying process. *Polzunovskiy Vestnik*. 2021;4:14-19. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.002> (In Rus.)
4. Korolev A.A., Urubkov S.A., Smimov S.O. Technological aspects of preparation of bean raw food concentrates of quick cooking. *Innovatsionnye Tekhnologii Proizvodstva i Khraneniya Materialnykh Tsennostey dlya Gosudarstvennykh Nuzhd*. 2019;12:126-133. (In Rus.)
5. Antipov S.T., Ovsyannikov V.Yu., Martekha A.N. The parameters of the drying process of fermented wheat raw material in the layer vibroboiling. *Storage and Processing of Farm Products*. 2013;12:54-55. (In Rus.)
6. Antipov S.T., Shahov S.V., Martekha A.N., Berestovoy A.A. Optimization of the process of pressing safflower seeds in an ultrasonic field. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2017;79(1):40-45. (In Rus.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-1-40-45>
7. Pribytkov A.V., Ovsyannikov V.Yu., Martekha A.N., Toroptsev V.V. Analysis of the influence of the main factors on the kinetics of the process drying of raw fermented wheat vibroboiling pour in bed. *Storage and Processing of Farm Products*. 2015;5:33-35. (In Rus.)
8. Konstantinov M.M., Rumyantsev A.A., Borzov N.A. Methodology of quantitative assessment of buckwheat colour at its processing. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2018;2:105-110 (In Rus.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2018-46-2-105-110>
9. Babicheva E.L., Rudobashta S.P., Sidelnikov I.I. Fluidization of millet and pea seeds. *Agricultural Engineering*. 2021;5(105):13-19. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-5-13-19>
10. Kurmanov A.K., Kamysheva N.A. Special methodology for the research of the peas destruction process. *3i: Intellect, Idea, Innovation – Intellekt, Ideya, Innovatsiya*. 2018;4:76-81. (In Rus.)

## Author Information

**Aleksandr N. Martekha<sup>1</sup>**, CSc (Eng), Associate Professor; [man6630@rgau-msha.ru](mailto:man6630@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

**Vasiliy V. Toroptsev<sup>2</sup>**, CSc (Eng), Associate Professor; [toroptsev@rgau-msha.ru](mailto:toroptsev@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

<sup>1,2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

## Author Contribution

A.N. Martekha – conceptualization, methodology, conducting research and investigation, research management, manuscript original draft preparation, project administration  
V.V. Toroptsev – conducting research and investigation, manuscript draft writing, data visualization

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear responsibility for plagiarism

Received 11.08.2023; revised 22.12.2023; accepted 28.12.2023

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 533.9.082.74:621.385.6:664.723:633.1:004.94

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-73-79>**Исследование на компьютерной модели влияния элементов конструкции и влажности зерна на добротность СВЧ-конвективной зоны***А.А. Васильев<sup>1</sup>, Д.А. Тихомиров<sup>2</sup>, А.Н. Васильев<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup> Lex.of@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3147-659X><sup>2</sup> Tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474><sup>3</sup> Vasilev-viesh@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7988-2338>

**Аннотация.** Сушку зерна после уборки урожая часто проводят в конвективных зерносушилках с СВЧ-воздействием. При проектировании СВЧ-устройств с резонаторами стремятся к достижению максимальной добротности СВЧ-конвективных зон. В связи с отсутствием исследований по влиянию влажности зерна и элементов, расположенных в СВЧ-конвективной зоне, на её добротность авторы статьи исследовали данные зависимости на компьютерной модели. С помощью программы CST Microwave Studio 2019 получены данные об изменении добротности резонаторов. Применяли методы Time Domain Solver для выполнения расчёта СВЧ-активной зоны в широком диапазоне частот и Eigenmode Solver – для нахождения собственных мод резонансных структур. Компьютерное моделирование проводили в два этапа. На первом этапе оценивали влияние на величину добротности размещения в СВЧ-конвективной зоне волноводов. На втором этапе исследовали изменение добротности СВЧ-конвективной зоны с волноводами и зерном различной влажности (14, 24 и 26%). Установлена существенная зависимость добротности зоны обработки зерна от особенностей конструкции и размещения в ней технологических элементов, а также от влажности обрабатываемого зерна и его температуры. Авторами дана рекомендация к проектированию СВЧ-конвективной зоны для технологических процессов, заключающаяся в том, чтобы стремиться не к достижению максимума добротности, а к обеспечению равномерного распределения поля СВЧ в активной зоне.

**Ключевые слова:** добротность СВЧ-конвективной зоны, поле СВЧ, СВЧ-активная зона, сушка зерна, влажность зерна, резонатор, добротность, компьютерное моделирование, проектирование СВЧ-конвективной зоны

**Для цитирования:** Васильев А.А., Тихомиров Д.А., Васильев А.Н. Исследование на компьютерной модели влияния элементов конструкции и влажности зерна на добротность СВЧ-конвективной зоны // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 73-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-73-79>

## ORIGINAL PAPER

**Study of a computer model of the influence of structural elements and grain moisture on the Q-factor of the microwave-convective zone***A.A. Vasiliev<sup>1</sup>, D.A. Tikhomirov<sup>2</sup>, A.N. Vasiliev<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; Moscow, Russia<sup>1</sup> Lex.of@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3147-659X><sup>2</sup> Tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474><sup>3</sup> Vasilev-viesh@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7988-2338>

**Abstract.** Grain drying after harvesting is often carried out in convective grain dryers with microwave exposure. When designing microwave devices with resonators strive to achieve the maximum efficiency (Q-factor) of microwave convection zones. Due to the lack of studies on the influence of grain humidity and elements located in the microwave convective zone on its Q-factor, the authors investigated these dependences on a computer model. Using the CST Microwave Studio 2019 software, the authors obtained the data on the change in the Q-factor of the resonators. Time Domain Solver methods were used to perform the calculation of the microwave active zone in a wide range of frequencies, and Eigenmode Solver methods – to find the eigenmodes (natural modes) of resonant structures. Computer modeling was carried out in two stages. At the first stage, the authors evaluated the influence on the Q-factor value of the placement in the microwave convective zone of the waveguides. At the second stage, the authors analyzed the change in the Q-factor of microwave convective zone with waveguides and grain of different

moisture content (14, 24, and 26%). The study established significant dependence of the Q-factor of the grain processing zone on the design features and placement of technological elements in it, as well as on the humidity of the processed grain and its temperature. The authors recommended that when designing microwave convective zone for technological processes, the goal should be not to achieve the maximum Q-factor, but to ensure uniform distribution of the microwave field in the active zone.

**Keywords:** Q-factor of microwave convection zone, microwave field, microwave active zone, grain drying, grain moisture, resonator, Q-factor (efficiency), computer modeling, microwave convection zone design

**For citation:** Vasiliev A.A., Tikhomirov D.A., Vasiliev A.N. Study of a computer model of the influence of structural elements and grain moisture on the Q-factor of the microwave-convective zone. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):73-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-73-79>

## Введение

При использовании микроволнового поля для сушки зерна в процессе его уборки [1-3] необходимо иметь зерносушильное оборудование производительностью 5...50 т/ч [4-6]. Как правило, для этого используют конвективные зерносушилки [7, 8]. Значительная часть таких зерносушилок обеспечивает сушку зерна в плотном слое. Зерно движется сверху вниз и продувается агентом сушки (горячим воздухом), подаваемым непосредственно в зерновой слой по воздушным каналам (коробам) [9]. Зерно нагревается воздухом, влага из него испаряется и выносится агентом сушки за пределы установки. В зерносушилках с СВЧ-воздействием нагрев влажного зерна осуществляется за счёт микроволнового поля, что снижает энергозатраты на сушку и делает эти установки привлекательными с точки зрения энергоёмкости процесса.

Известны два подхода использования поля СВЧ в шахных зерносушилках: в первом используют микроволновое воздействие в процессе рециркуляции для интенсификации влагопереноса между влажным и подсушенным зерном [10]; во втором применяют СВЧ-конвективное воздействие на зерновой слой [11, 12]. Микроволновое поле способствует перемещению влаги из зерновки в межзерновое пространство, а подогретый воздух выносит из зернового слоя влагу.

Авторы статьи разрабатывают модульные СВЧ-конвективные установки, в которых волноводы расположены внутри активной зоны, заполненной зерном. В активной зоне зерно перемещается сверху вниз под собственным весом. Внутри модуля располагаются волноводы со щелевыми излучателями, по которым электромагнитное поле сверхвысокой частоты подаётся в зерно [13]. Количество волноводов в модуле и количество модулей в установке определяют, исходя из требуемой производительности по обработке зерна, места расположения установки и типа установки (мобильная или стационарная).

Нашими исследованиями<sup>1</sup> [14] установлена зависимость изменения влажности зерна, обрабатываемого в СВЧ-конвективной зоне, на глубину проникновения поля в зерновой слой.

СВЧ-конвективная зона – это заполненная обрабатываемым продуктом (зерном) резонаторная камера [15, 16]. В идеальном варианте конструкция резонаторной камеры должна при основной частоте излучения магнетрона (2,45 ГГц) обеспечивать максимальную добротность, тогда всё излучение магнетрона будет в ней максимально накапливаться и распределяться в зерновом слое [17, 18]. Однако в отличие от техники передачи сигналов СВЧ в установках связи резонаторные камеры в технологических процессах переработки продукции не являются пустыми объёмами. Как правило, они полностью или частично заполнены обрабатываемым материалом или элементами конструкции, и тогда встает вопрос о том, как в этом случае изменяется добротность СВЧ-конвективной зоны. На данный момент нет исследований по влиянию элементов, расположенных в активной зоне, и влажности зерна в СВЧ-конвективной зоне на её добротность. Ответ на этот вопрос поможет более точно определить необходимые параметры расчёта СВЧ-конвективной зоны.

**Цель исследований:** установить влияние влажности зерна и особенностей конструкции размещённых в ней технологических элементов на добротность СВЧ-конвективной зоны.

## Материалы и методы

В СВЧ-колебательных системах передачи энергии для уменьшения потерь применяют резонаторы, представляющие собой объём, ограниченный со всех сторон металлической оболочкой [19]. Возбуждаемые в объёме колебания электромагнитной волны могут существовать в нём постоянно.

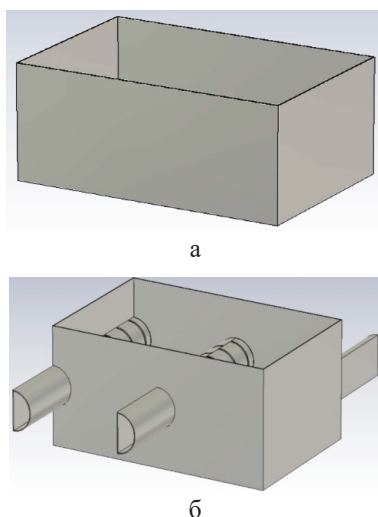
<sup>1</sup> Будников Д.А., Васильев А.Н., Васильев А.А. Проектирование рабочих зон установок СВЧ-конвективной обработки зерна путём электродинамического моделирования. Орёл, 2022. 348 с.

В нашем случае в резонаторе обрабатывается зерно, и резонаторная камера считается СВЧ-активной зоной. Установка для СВЧ-конвективной обработки зерна собирается из нескольких СВЧ-активных зон (резонаторных камер), устанавливаемых вертикально друг на друга. Отличительной особенностью применяемых резонаторных камер является их открытость. СВЧ-активная зона не имеет ограждения сверху и снизу, и зерно движется самотёком из верхней СВЧ-активной зоны в нижнюю, днище которой ограничено корпусом выгрузного бункера с выгрузным устройством.

Исследовались СВЧ-активные зоны, представленные на рисунке 1.

Корпус СВЧ-активной зоны размером  $600 \times 400 \times 300$  выполнен из стали (рис. 1). Такие размеры обусловлены требуемыми расстояниями между волноводами в одном ряду и между рядами волноводов. При моделировании по центру корпуса размещали один двойной волновод из двух полукруглых волноводов. Боковые поверхности волноводов содержат щелевые отверстия, через которые электромагнитное поле попадает в зерновой слой. Возле боковых стенок корпуса размещали два полукруглых волновода, излучающих электромагнитные волны навстречу центральному волноводу (рис. 1б). Такая комплектация модуля позволяет адекватно моделировать процессы распределения микроволнового поля в СВЧ-конвективной зоне.

Для моделирования использовалась программа CST Microwave Studio. Применяли два метода расчёта: Time Domain Solver для вычисления



**Рис. 1. Макеты СВЧ-активных зон, используемые при расчёте их добротности:**  
а – без волноводов; б – с волноводами

**Fig. 1. Layouts of microwave active zones used in the calculation of their goodness:**  
a – without waveguides; b – with waveguides

СВЧ-активной зоны в широком диапазоне частот и Eigenmode Solver – для нахождения собственных мод резонансных структур.

Чтобы вся энергия источника излучения эффективно использовалась для нагрева обрабатываемого материала, желательно, чтобы добротность резонатора была максимальной.

Если резонатор заполнен проводящей средой (влажным зерном), то добротность резонатора будет зависеть и от потерь в этой среде [19]:

$$N = \int_V \frac{\sigma E^2}{2} dV, \quad (1)$$

где  $N$  – потери энергии, Вт/ч;  $V$  – объём резонатора, м<sup>3</sup>;  $E$  – напряжённость электромагнитного поля, В/м;  $\sigma$  – удельная электропроводность, См/м.

Полная энергия, выделяемая в резонаторе, определяется уравнением [15]:

$$\Sigma N = \int_V \frac{\epsilon E^2}{2} dV, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость, Ф/м.

Добротность находится в виде отношения:

$$Q = f \frac{\Sigma N}{N}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота магнетрона, Гц.

Учитывая (2) и (3), получим

$$Q = f \frac{\epsilon}{\sigma}. \quad (4)$$

В резонаторе обязательно существуют потери в стенках и непосредственно в среде, которая заполняет резонатор. Поэтому общая добротность СВЧ-активной зоны найдётся из выражения [19]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{ср}}} + \frac{1}{Q_{\text{ст}}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{ср}}$  – добротность обрабатываемой среды;  $Q_{\text{ст}}$  – добротность стальной конструкции корпуса СВЧ-активной камеры (резонатора).

Из уравнения (5) следует, что добротность обрабатываемого материала зависит от его диэлектрических свойств и удельной электропроводности. Обе эти величины в значительном диапазоне изменяются<sup>2</sup> в процессе обработки зерна полем СВЧ [16, 17], причём изменения происходят за счёт не только уменьшения влажности зерна, повышения его температуры, но и поляризации зерновок в электромагнитном поле.

Следует учитывать, что при стандартных расчётах добротности резонаторов внутри них нет никаких конструкций. В случаях использования

<sup>2</sup> Диденко А.Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика. М.: Наука, 2003. 446 с.

СВЧ-воздействия в технологических процессах обработки сельскохозяйственной продукции внутри резонаторных камер располагают вспомогательное оборудование (мешалки, ёмкости, отражатели и пр.). В нашем варианте внутри резонаторной камеры расположены излучающие волноводы. Для этого случая существующие методики расчёта добротности резонаторных камер не подходят.

Результаты и их обсуждение

При СВЧ-конвективной обработке изменение влажности зерна может быть различным. Начальная влажность зерна может составлять от 16 до 30%. Далее она снижается в процессе сушки. При обеззараживании зерно имеет влажность до 16%. При предпосевной обработке семян в микроволновом поле зерно имеет кондиционную влажность 13...14% (для пшеницы и ячменя). При таком диапазоне изменения влажности зерна существенно изменяются и его диэлектрические свойства.

Теоретические исследования добротности проводили в два этапа. На первом этапе оценили, как влияет на величину добротности размещение в СВЧ-конвективной зоне волноводов. На втором этапе проводили исследование изменения добротности СВЧ-конвективной зоны с волноводами и зерном различной влажности.

Чтобы оценить, как наличие волноводов влияет на добротность СВЧ-активной зоны, произвели моделирование по определению добротности с использованием программы CST Microwave Studio [19] для корпуса зоны без волноводов (рис. 1а) и для корпуса с четырьмя волноводами (рис. 1б). Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Отметим, что наиболее близкими к частоте магнетрона (2,45 ГГц) являются третья и четвёртая моды

для СВЧ-активной зоны без волновода (выделенные курсивом в таблице 1), причём значения добротности для них невысоки: 2,624 и 1,939. Для СВЧ-активной зоны с четырьмя волноводами самое близкое расчётное значение резонансной частоты – 2,456675 ГГц, для которой добротность составляет 15,93. Резонансных частот, близких к частоте магнетрона, нет.

Результаты расчётов показывают, что размещение технологического оборудования в резонаторах приводит к значительному изменению их добротности.

Влияние влажности зерна на добротность исследовалось для характерного для СВЧ-обработки диапазона влажности 14...26%. Результаты представлены в таблице 2.

Сравнение данных, приведённых в таблице 2, показывает отсутствие совпадений мод резонансных частот с частотой генерации магнетрона. Величины добротности для резонансных частот, близких к частоте генерации магнетрона, колеблются от 0,8173 до 6,949 для различных мод, причём они существенно отличаются даже при одной влажности зерна, что является объяснимым. Поскольку в передаче энергии поля СВЧ участвуют несколько типов волн и их резонансные частоты изменяются в зависимости от изменения диэлектрических свойств материала, находящегося в зоне обработки, изменяется и радиационная эффективность излучения.

Результаты расчёта изменения добротности резонаторов показали существенное влияние влажности зерна на изменение добротности СВЧ-активной зоны, причём не просматривается зависимость между величинами по модам СВЧ-излучения для различной влажности зерна.

Изменение влажности зерна в СВЧ-активной зоне приводит к изменению амплитуды воздействия, направленности его максимума как вдоль длины

Моды резонансных частот и добротности для СВЧ-активной зоны

Таблица 1

Modes of resonant frequencies and Q-factor for the microwave active zone

Table 1

| № моды<br>No. of modes | СВЧ-активная зона без волноводов<br><i>Microwave active zone without waveguides</i> |                                | СВЧ-активная зона с 4 волноводами<br><i>Microwave active zone with four waveguides</i> |                                |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                        | Резонансная частота, ГГц<br><i>Resonant frequency, GHz</i>                          | Добротность<br><i>Q-factor</i> | Резонансная частота, ГГц<br><i>Resonant frequency, GHz</i>                             | Добротность<br><i>Q-factor</i> |
| 1                      | 2,401070                                                                            | 8,321                          | <b>2,456675</b>                                                                        | <b>15,930</b>                  |
| 2                      | 2,409471                                                                            | 32,500                         | 2,461078                                                                               | 11,780                         |
| 3                      | <b>2,445958</b>                                                                     | <b>2,624</b>                   | 2,469784                                                                               | 3,044                          |
| 4                      | <b>2,450990</b>                                                                     | <b>1,939</b>                   | 2,470463                                                                               | 21,660                         |
| 5                      | 2,455016                                                                            | 1,212                          | 2,478836                                                                               | 2,795                          |

Таблица 2

Моды резонансных частот и добротности для СВЧ-активной зоны с волноводами и с зерном различной влажности

Table 2

Modes of resonant frequencies and Q-factor for microwave active zone with waveguides and with grains of different moisture content

| №<br>моды<br>No.<br>of modes | СВЧ-активная зона с зерном влажностью W / Microwave active zone with grain moisture content W |                         |                                                     |                         |                                                     |                         |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|
|                              | W = 14%                                                                                       |                         | W = 24%                                             |                         | W = 26%                                             |                         |
|                              | Резонансная частота, ГГц<br>Resonant frequency, GHz                                           | Добротность<br>Q-factor | Резонансная частота, ГГц<br>Resonant frequency, GHz | Добротность<br>Q-factor | Резонансная частота, ГГц<br>Resonant frequency, GHz | Добротность<br>Q-factor |
| 1                            | 2,448412                                                                                      | 4,659                   | 2,445161                                            | 0,8173                  | 2,44959                                             | 5,054                   |
| 2                            | 2,453007                                                                                      | 2,158                   | 2,445267                                            | 4,9950                  | 2,451184                                            | 4,461                   |
| 3                            | 2,453947                                                                                      | 6,979                   | 2,447031                                            | 2,2220                  | 2,452292                                            | 7,881                   |
| 4                            | 2,458258                                                                                      | 5,976                   | 2,448635                                            | 2,6670                  | 2,460817                                            | 6,863                   |
| 5                            | 2,460989                                                                                      | 2,740                   | 2,456276                                            | 0,8439                  | 2,463381                                            | 2,401                   |
| 6                            | 2,464295                                                                                      | 5,541                   | 2,459164                                            | 4,0000                  | 2,465827                                            | 4,347                   |

волновода, так и относительно излучающей поверхности. Изменяется также и равномерность излучения поля вдоль длины волновода.

Поскольку добротность зависит от влажности обрабатываемого зерна и его температуры, то показатель добротности является вторичным, и отводить ему главенствующую роль при расчёте СВЧ-активных зон нет смысла. Приоритетом может быть обеспечение равномерности поля СВЧ в зоне.

#### Список литературы

1. Bruce R.M., Atungulu G.G., Sadaka S., Smith D. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars. *Cereal Chemistry*. 2021;98(3):557-570. <https://doi.org/10.1002/cche.10398>
2. Abano E.E. Kinetics and quality of microwave-assisted drying of mango (*Mangifera indica*). *International Journal of Food Science*. 2016;2037029. <https://doi.org/10.1155/2016/2037029>
3. Kovalev A.V., Spiridonov O.B., Lysenko I.E., Ezhova O.A. Method and system of pre-sowing microwave treatment of agricultural crop seeds. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020;13(11):3964-3969.
4. Soyer Ay., Kolsarici N., Candoğan K. Effect of conventional and microwave cooking methods on some nutritive contents and quality properties of chicken meat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 1999;23(8):289-296. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol23/iss8/6>
5. Vasil'yev A.N., Dorokhov A.S., Budnikov D.A., Vasil'yev A.A. Trends in the use of the microwave field in the technological processes of drying and disinfection of grain. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):63-68. EDN: GGWPRQ
6. Сабашкин В.А., Торопов В.Р. Выбор зерноочистительно-сушильных комплексов в зонах с высокой влажностью зерна // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48, № 3. С. 58-64. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-3-8>

#### Выводы

Компьютерное моделирование с использованием программы CST показало зависимость добротности зоны обработки зерна от особенностей конструкции СВЧ-активной зоны и размещения в ней технологических элементов, а также от влажности и температуры обрабатываемого зерна. При расчете СВЧ-конвективных зон необходимо исследовать равномерность поля СВЧ в зоне.

#### References

1. Bruce R.M., Atungulu G.G., Sadaka S., Smith D. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars. *Cereal Chemistry*. 2021;98(3):557-570. <https://doi.org/10.1002/cche.10398>
2. Abano E.E. Kinetics and quality of microwave-assisted drying of mango (*Mangifera indica*). *International Journal of Food Science*. 2016;2037029. <https://doi.org/10.1155/2016/2037029>
3. Kovalev A.V., Spiridonov O.B., Lysenko I.E., Ezhova O.A. Method and system of pre-sowing microwave treatment of agricultural crop seeds. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020;13(11):3964-3969.
4. Soyer Ay., Kolsarici N., Candoğan K. Effect of conventional and microwave cooking methods on some nutritive contents and quality properties of chicken meat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 1999;23(8):289-296. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol23/iss8/6>
5. Vasil'yev A.N., Dorokhov A.S., Budnikov D.A., Vasil'yev A.A. Trends in the use of the microwave field in the technological processes of drying and disinfection of grain. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):63-68.
6. Sabashkin V.A., Toropov V.R. The choice of grain cleaning-and-drying units in areas with high grain humidity. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2018;48(3):58-64. (In Rus.) <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-3-8>

7. Jia Ch., Wang L., GuoW., Liu Ch. Effect of swing temperature and alternating airflow on drying uniformity in deep-bed wheat drying. *Applied Thermal Engineering*. 2016;106:774-783. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.056>
8. Жолобов Н.В., Чертков Г.Я., Сагайдачный Д.А. Обзор и анализ сушилок зерна // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии-2019». 2019. С. 26-30. EDN: KCDYHD
9. Кирмасов В.Ю., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Болотов Д.Б., Распопов А.С., Кондобарова Е.А., Шарова Ю.А. Обзор конструктивных схем зерносушилок // Сборник трудов Национальной научно-практической конференции «Прикладные вопросы физики (к 120-летию со дня рождения академиков И.В. Курчатова и А.П. Александрова). Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. С. 318-325. EDN: ZJZSZF
10. Кожухов В.А., Ушкалов В.Ю. Рециркуляционная зерносушилка шахтного типа с активным вентилированием и СВЧ-активацией зерна // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития». Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2018. С. 118-121. EDN: YACVAD
11. Gursoy S., Choudhary R., Watson D.G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn. *International journal of agricultural and biological engineering*. 2013;6(1):90-99. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20130601.009>
12. Shivhare U.S., Raghavan G.S.V., Bosisio R.G. Microwave drying of corn. 1. Equilibrium moisture content. *Transactions of the ASAE*. 1992;35(3):947-950. <https://doi.org/10.13031/2013.28683>
13. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Budnikov D.A. Using modeling to select the type of microwave field emitter for dense-layer grain dryers. *Applied Sciences*. 2023;13(16):9070. <https://doi.org/10.3390/app13169070>
14. Vasiliev A.N., Goryachkina V.P., Budnikov D. Research methodology for microwave-convective processing of grain. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)*. 2020;9(2):1-11. <https://doi.org/10.4018/IJEEO.2020040101>
15. Mallanna S.D., Viswanath K. Performance analysis of resonators for microwave applications. International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECOT). Mysuru, India, 2018. Pp. 741-745. <https://doi.org/10.1109/ICEECOT43722.2018.9001448>
16. Кабдин Н.Е., Андреев С.А. Обеспечение равномерности СВЧ-обработки сельскохозяйственных материалов в объемном резонаторе // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 5. С. 42-49. EDN: YUZNUD
17. Nelson S.O. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. Academic Press, 2015. 229 p.
18. Черкашин Д.Е., Хакимов Н.Т. Использование пакета программ CST MICROWAVE STUDIO для расчёта эффективной площади рассеивания различных объектов // Сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в современной науке: новые подходы и актуальные вопросы». Анапа, 2022. С. 62-66. EDN: XYJPKS
19. Васинкина Е.Ю., Тригорный С.В., Кадыкова Ю.А., Калганова С.Г. Моделирование СВЧ-термообработки композиционных материалов в камерах резонаторного типа // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25, № 5. С. 107-110. EDN: EMPHHH
7. Jia Ch., Wang L., GuoW., Liu Ch. Effect of swing temperature and alternating airflow on drying uniformity in deep-bed wheat drying. *Applied Thermal Engineering*. 2016;106:774-783. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.056>
8. Zholobov N.V., Chertkov G.Ya., Sagaidachniy D.A. Review and analysis of grain dryers. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies – 2019"*. 2019;26-30. (In Rus.)
9. Kirmasov V.Yu., Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Bolotov D.B., Raspopov A.S., Kondobarova E.A., Sharova Yu.A. Overview of design schemes of grain dryers. In: *Proceedings of the National Scientific and Practical Conference "Applied issues in physics (to the 120th anniversary of Academicians I.V. Kurchatov and A.P. Aleksandrov)*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 2022;318-325. (In Rus.)
10. Kozhukhov V.A., Ushkalov V.Yu. Recirculating grain dryer of mine type with active ventilation and microwave activation of grain. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education: Experience, Problems, Development Prospects"*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University. 2018;118-121 (In Rus.)
11. Gursoy S., Choudhary R., Watson D.G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn. *International journal of agricultural and biological engineering*. 2013;6(1):90-99. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20130601.009>
12. Shivhare U.S., Raghavan G.S.V., Bosisio R.G. Microwave drying of corn. 1. Equilibrium moisture content. *Transactions of the ASAE*. 1992;35(3):947-950. <https://doi.org/10.13031/2013.28683>
13. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Budnikov D.A. Using modeling to select the type of microwave field emitter for dense-layer grain dryers. *Applied Sciences*. 2023;13(16):9070. <https://doi.org/10.3390/app13169070>
14. Vasiliev A.N., Goryachkina V.P., Budnikov D. Research methodology for microwave-convective processing of grain. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)*. 2020;9(2):1-11. <https://doi.org/10.4018/IJEEO.2020040101>
15. Mallanna S.D., Viswanath K. Performance analysis of resonators for microwave applications. International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECOT). Mysuru, India, 2018. Pp. 741-745. <https://doi.org/10.1109/ICEECOT43722.2018.9001448>
16. Kabdin N.E., Andreev S.A. Ensuring the uniformity of microwave processing of agricultural materials in volumetric resonator. *International Technical and Economic Journal*. 2018;5:42-49. (In Rus.)
17. Nelson S.O. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. Academic Press, 2015. 229 p.
18. Cherkashin D.E., Khakimov N.T. Using the CST MICROWAVE STUDIO software package to calculate the effective dispersion area of various objects. In: *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Integration Processes in Modern Science: New Approaches and Current Issues"*. Anapa, 2022;62-66. (In Rus.)
19. Vasinkina E.Yu., Trigorly S.V., Kadykova Yu.A., Kalganova S.G. Modeling of microwave heat treatment of composite materials in resonator-type chambers. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2022;25(5):107-110. (In Rus.)

**Информация об авторах**

**Алексей Алексеевич Васильев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Lex.of@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3147-659X>

**Дмитрий Анатольевич Тихомиров**<sup>2</sup>, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; Tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

**Алексей Николаевич Васильев**<sup>3</sup>, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник;

Vasilev-viesh@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7988-2338>

<sup>1, 2, 3</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

**Вклад авторов**

А.А. Васильев – формальный анализ, методология, проведение исследования, создание черновика рукописи

Д.А. Тихомиров – руководство исследованием

А.Н. Васильев – концептуализация, верификация данных

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

**Статья поступила 02.10.2023; после рецензирования и доработки 26.12.2023; принята к публикации 26.12.2023**

**Author information**

**Aleksei A. Vasiliev**<sup>1</sup>, CSc(Eng), Senior Researcher;

Lex.of@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3147-659X>

**Dmitriy A. Tikhomirov**<sup>2</sup>, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Professor, Chief Researcher; Tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

**Aleksei N. Vasiliev**<sup>3</sup>, DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer, Vasilev-viesh@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7988-2338>

<sup>1, 2, 3</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

**Author contribution**

A.A. Vasiliev – formal analysis, methodology, investigation, original draft preparation

D.A. Tikhomirov – research supervision

A.N. Vasiliev – conceptualization, data verification

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

**Received 02.10.2023; revised 26.12.2023; accepted 26.12.2023**

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.311:621.315

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-80-88>

## Определение качества и энергоэффективности передачи электрической энергии низкого напряжения

**В.И. Загинайлов<sup>1✉</sup>, Т.А. Мамедов<sup>2</sup>, О.В. Лештаев<sup>3</sup>, В.Э. Манько<sup>4</sup>**

<sup>1,3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Объединенная электросетевая компания» (ООО «ОЭСК»); г. Москва, Россия

<sup>4</sup> ООО «Энергетическое партнерство»; г. Москва, Россия

<sup>1</sup> [energo-viz@mail.ru](mailto:energo-viz@mail.ru)<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

<sup>2</sup> [mta020593@mail.ru](mailto:mta020593@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>

<sup>3</sup> [oleg-leshtaeв@yandex.ru](mailto:oleg-leshtaeв@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>

<sup>4</sup> [valentin.manko@gmail.com](mailto:valentin.manko@gmail.com)

**Аннотация.** Обеспечение потребителей высококачественной электрической энергией при минимальных потерях на её передачу является одной из проблем передачи электроэнергии по электрическим сетям. Потери электроэнергии увеличиваются, а качество ухудшается с увеличением реактивной мощности электроприемников, оцениваемой по коэффициенту мощности нагрузки. С целью оценки влияния коэффициента мощности нагрузки на передачу активной мощности нагрузки и определения качества и энергоэффективности передачи электроэнергии по ЛЭП авторами проведен анализ изменения параметров одной фазы трёхфазной сети без компенсации и с компенсацией реактивной мощности. Поставленная задача решалась с использованием методов расчёта линейных электрических цепей переменного тока в соответствии с заданными значениями полной или активной мощности нагрузки, её сопротивлений и сопротивлений проводов ЛЭП и моделирования процессов передачи электрической энергии по ЛЭП в электрических сетях переменного тока низкого напряжения в программе Electronics Workbench. В результате показано, что основные изменения параметров электроэнергетической системы, состоящей из электроприёмников потребителей (нагрузки), получающих электропитание по ЛЭП, подключённой к шинам низкого напряжения силового трансформатора, происходят при изменении величины тока системы, определяемого сопротивлениями нагрузки и линии электропередачи. Качество передачи электрической энергии низкого напряжения зависит от потери напряжения в проводах ЛЭП и определяется током нагрузки и её полным сопротивлением. Энергоэффективность передачи электрической энергии зависит от потери мощности в проводах ЛЭП и определяется величиной активной мощности потребляемой нагрузкой и соотношением активных сопротивлений ЛЭП и нагрузки.

**Ключевые слова:** электрическая энергия, однофазная ЛЭП низкого напряжения, качество передачи электрической энергии, энергоэффективность передачи электрической энергии, потери напряжения и мощности электрической энергии

**Для цитирования:** Загинайлов В.И., Мамедов Т.А., Лештаев О.В., Манько В.Э. Определение качества и энергоэффективности передачи электрической энергии низкого напряжения // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 80-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-80-88>

## ORIGINAL ARTICLE

## Identification of quality and energy efficiency of low-voltage power transmission

V.I. Zaginaylov<sup>1✉</sup>, T.A. Mamedov<sup>2</sup>, O.V. Leshtayev<sup>3</sup>, V.E. Manko<sup>4</sup><sup>1,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia<sup>2</sup> United Electric Grid Company LLC<sup>4</sup> LLC “Energeticheskoe Partnerstvo”; Moscow, Russia<sup>1</sup> energo-viz@mail.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X><sup>2</sup> mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149><sup>3</sup> oleg-leshtayev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087><sup>4</sup> valentin.manko@gmail.com

**Abstract.** Providing consumers with high quality electric power with minimum transmission losses is one of the problems of electric power transmission through power grids. Increasing reactive power of electric consumers, estimated by the load power factor, results in an increase in electricity losses and quality deterioration. To evaluate the influence of the load power factor on the transmission of active load power and to determine the quality and energy efficiency of electricity transmission through power lines, the authors analyzed the change in the parameters of one phase of a three-phase network without compensation and with reactive power compensation. The set task was solved using methods of calculation of linear electric circuits of alternating current, according to the given values of total or active load power, its resistance and the resistance of power line wires. Then the processes of power transmission in low-voltage electric networks of alternating current were simulated using the Electronics Workbench software. The authors take a case of the electric power system consisting of consumers' (load) electric receptors receiving power supply through the power line connected to the low-voltage busbars of the power transformer. They prove that its parameters are mainly changed when changing the value of the system current determined by the load and transmission line resistances. The quality of low-voltage electrical energy transmission depends on the voltage loss in the power line wires and is determined by the load current and its full resistance. The energy efficiency of electrical energy transmission depends on the power loss in the power line wires and is determined by the amount of active power consumed by the load and the ratio of the active resistance of the power line and the load.

**Keywords:** electric energy, single-phase low-voltage transmission line, quality of electric power transmission, energy efficiency of electric power transmission, voltage and power losses of electric energy

**For citation:** Zaginaylov V.I., Mamedov T.A., Leshtayev O.V., Manko V.E. Identification of quality and energy efficiency of low-voltage power transmission. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):80-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-80-88>

## Введение

Одной из современных проблем передачи электроэнергии (ЭЭ) по электрическим сетям является обеспечение потребителей ЭЭ высококачественной энергией<sup>1,2</sup>. Важнейшим показателем качества электроэнергии является отклонение напряжения на зажимах электроприемников, возникающее по причине потерь напряжения при передаче ЭЭ по линии электропередачи (ЛЭП), которое приводит к нарушению работы электроприемников, снижению

производительности технологического оборудования и сроков службы электрооборудования [1-3].

Другой не менее важной проблемой передачи ЭЭ по ЛЭП являются потери мощности (энергии), относящиеся к важнейшим технико-экономическим показателям работы территориальных сетевых организаций [4-7]. Потери мощности в ЛЭП и отклонения напряжения на нагрузке возрастают с увеличением реактивной мощности, передаваемой по ЛЭП<sup>3,4,5</sup> [8]. Оценку потери качества ЭЭ осуществляют

<sup>1</sup> Ахметшин А.Р. Методики энергосбережения и повышения качества электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,4-10 кВ на основе глубокой компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения: Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2013. 193 с.

<sup>2</sup> Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

<sup>3</sup> Геворкян М.В. Современные компоненты компенсации реактивной мощности (для низковольтных сетей). М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2003. 64 с.

<sup>4</sup> Кабышев А.В. Компенсации реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 234 с.

<sup>5</sup> Бирюлин В.И. Энергосберегающие технологии: Методические указания по выполнению практических работ; Сост.: В.И. Бирюлин, А.Н. Горлов, А.В. Филонович, И.В. Ворначева / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. 43 с.

согласно ГОСТ Р 54130-2010<sup>6</sup> по отклонению напряжения, то есть по величине, отличной от его номинального или заявленного значения напряжения:

$$\delta U_n = U_n - U_{ном}, \quad (1)$$

где  $U_n$  – действующее фазное напряжение в данной точке системы электроснабжения, или действующее фазное напряжение на нагрузке потребителя ЭЭ в рассматриваемый момент времени;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение на нагрузке – на клеммах электроприёмников потребителя ЭЭ,  $U_{ном} = 220$  В (здесь и далее рассматриваем фазное номинальное напряжение трёхфазной сети с глухим заземлением нейтрали).

С отклонениями напряжения на нагрузке тесно связаны потери напряжения в ЛЭП (разность напряжений в начале и в конце ЛЭП)<sup>1</sup>:

$$\Delta U_n = U_c - U_n, \quad (2)$$

где  $U_c$  – действующее значение фазного напряжения источника ЭЭ – силового трансформатора 10/0,4 кВ (начало ЛЭП) (здесь и далее рассматриваем фазное напряжение на выходе силового трансформатора 10/0,4 кВ трёхфазной сети с глухим заземлением нейтрали,  $U_c = 230$  В).

Оценку энергоэффективности осуществляют согласно ГОСТ 36107-2013 по потере мощности (разности мощностей в начале и в конце ЛЭП)<sup>7</sup>:

$$\Delta P_n = P_c - P_n, \quad (3)$$

где  $P_c$ ,  $P_n$  – соответственно абсолютные значения мощности, выделяемой источником ЭЭ (силовым трансформатором) и потребляемой нагрузкой.

Поделив выражение (3) на мощность источника ЭЭ  $P_c$ , получим потери мощности (энергии) в ЛЭП в относительных единицах:

$$\delta P_n = 1 - \eta_n, \quad (4)$$

где  $\delta P_n$  – относительные потери мощности (энергии)

в ЛЭП,  $\delta P_n = \frac{\Delta P_n}{P_c}$ ;  $\eta_n$  – коэффициент полезного действия

передачи ЭЭ по ЛЭП,  $\eta_n = \frac{P_n}{P_c}$ .

Абсолютные потери мощности в ЛЭП определяются по выражению:

$$\Delta P_n = U_n \cdot I \cdot \cos \varphi_n = I^2 \cdot R_n, \quad (5)$$

где  $I$  – действующее значение тока, протекающего в ЛЭП, А;  $U_n$  – падение напряжения в проводах ЛЭП,  $U_n = I \cdot Z_n$ ;  $Z_n$  – полное сопротивление проводов

ЛЭП, Ом;  $\cos \varphi_n$  – коэффициент мощности проводов ЛЭП,  $\cos \varphi_n = \frac{R_n}{Z_n}$ ;  $R_n$  – активное сопротивление проводов ЛЭП, Ом.

Величина потерь мощности ЭЭ в ЛЭП (3-5) и потерь напряжения (2) зависит от величины тока, протекающего в ЛЭП (нагрузке), которая определяется заданной активной (полной) мощностью нагрузки приемников:

$$P_n = U_n \cdot I \cdot \cos \varphi_n = I^2 \cdot R_n, \quad (6)$$

где  $\cos \varphi_n$  – коэффициент мощности нагрузки,

$\cos \varphi_n = \frac{R_n}{Z_n}$ ;  $R_n$  – активное сопротивление нагрузки ЛЭП, Ом;  $Z_n$  – полное сопротивление нагрузки, Ом.

Используя (6), определяют величину тока в нагрузке, протекающего и в проводах ЛЭП:

$$I = \frac{P_n}{U_n \cdot \cos \varphi_n}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), можно определить потери мощности в ЛЭП:

$$\Delta P_n = \frac{P_n^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_n} \cdot R_n. \quad (8)$$

Принимая неизменными передаваемую мощность нагрузки по ЛЭП ( $P_n$ ), напряжение на нагрузке ( $U_n$ ) и активное сопротивление ЛЭП ( $R_n$ ), определяют величину потерь в ЛЭП как обратно пропорциональную квадрату коэффициента мощности нагрузки [12, 13], то есть  $\Delta P_n = f\left(\frac{\text{const}}{\cos^2 \varphi_n}\right)$ . Однако такой расчёт потерь мощности в ЛЭП (8) вызывает сомнение, так как:

– величина тока нагрузки (7) определяется величиной не только сопротивлений нагрузки (6), но и сопротивлений проводов ЛЭП (5);

– величина действующего напряжения на нагрузке зависит как от потерь напряжения в ЛЭП (3), так и от величины тока нагрузки (7):

$$U_n = I \cdot Z_n \quad (9)$$

– величина выделяемой мощности на нагрузке (6) также зависит и от потерь напряжения в ЛЭП (2), и от величины тока нагрузки (7);

– коэффициент мощности нагрузки можно изменять только при варьировании соотношений величин активного и полного сопротивлений нагрузки (6).

**Цель исследований:** оценка влияния коэффициента мощности нагрузки ( $\cos \varphi_n$ ) на передачу по ЛЭП активной мощности нагрузки; определение качества и энергоэффективности передачи электроэнергии по ЛЭП включая передачу ЭЭ по низковольтной сети с поперечной компенсацией реактивной мощности потребителя ЭЭ.

<sup>6</sup> ГОСТ Р 54130-2010 Национальный стандарт РФ. Качество электрической энергии. Термины и определения. Дата введения: 2012-07-01.

<sup>7</sup> ГОСТ 31607-2012. Межгосударственный стандарт. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. Дата введения: 2015-01-01.

## Материалы и методы

Поставленная цель решена с использованием методов расчета линейных электрических цепей переменного тока в соответствии с заданными значениями полной или активной мощности нагрузки, её сопротивлениями и сопротивлениями проводов ЛЭП и моделирования процессов передачи ЭЭ по ЛЭП в электрических сетях переменного тока низкого напряжения в программе Electronics Workbench.

Определение качества и энергоэффективности передачи электрической энергии по однофазной ЛЭП произведено в трехфазной сети напряжением 380/220 В, с глухо заземленной нейтралью и нагрузкой, размещенной в конце ЛЭП без компенсации (рис. 1а) и с компенсацией (рис. 1б) реактивной мощности.

Нагрузка потребителя электрической энергии (ПЭЭ), состоящая из электроприемников, получает питание от источника ЭЭ (силового трехфазного трансформатора) по воздушной ЛЭП и характеризуется не только активной, но и реактивной составляющей полной мощности ПЭЭ, и определяется её полным комплексным сопротивлением:

$$\underline{Z}_н = R_н + j \cdot X_н,$$

где  $R_н$  и  $X_н$  – соответственно активное и индуктивное сопротивления нагрузки (электроприёмники, подключённые к ЛЭП).

Сопротивление проводов ЛЭП также характеризуется активной и реактивной составляющими и определяется полным комплексным сопротивлением линии электропередачи:

$$\underline{Z}_л = R_л + j \cdot X_л,$$

где  $R_л$  и  $X_л$  – соответственно активное и индуктивное сопротивления проводов ЛЭП, величины которых

определяются длиной ЛЭП ( $l_л$ , км), удельным активным ( $R_0$ , Ом/км) и индуктивным ( $X_0$ , Ом / км) сопротивлением провода ЛЭП<sup>8,9</sup>.

Полное комплексное сопротивление электроэнергетической системы, состоящей из электроприёмников потребителей (нагрузки), получающих электропитание по ЛЭП, подключённой к шинам низкого напряжения силового трансформатора напряжения, определяется суммой последовательно соединённых комплексных сопротивлений нагрузки и проводов ЛЭП (рис. 1а)

$$\underline{Z}_с = R_н + R_л + j \cdot (X_н + X_л)$$

и состоит из последовательно соединённых активных сопротивлений нагрузки и ЛЭП ( $R_с = R_н + R_л$ ) и индуктивных сопротивлений нагрузки и ЛЭП ( $X_с = X_н + X_л$ ).

Исходя из вышеизложенного параметры энергетической системы без компенсации реактивной мощности (рис. 1а) определяются модулями полного сопротивления и коэффициентами мощности нагрузки ( $Z_н$ ), проводов ЛЭП ( $Z_л$ ) и системы ( $Z_с$ ):

$$Z_н = \sqrt{R_н^2 + X_н^2} \text{ и } \cos \varphi_н = \frac{R_н}{Z_н};$$

$$Z_л = \sqrt{R_л^2 + X_л^2} \text{ и } \cos \varphi_л = \frac{R_л}{Z_л};$$

$$Z_с = \sqrt{(R_н + R_л)^2 + (X_н + X_л)^2} \text{ и } \cos \varphi_с = \frac{R_с}{Z_с}. \quad (10)$$

Параметры энергетической системы с компенсацией реактивной мощности нагрузки (рис. 1б) отличаются от энергетической системы без компенсации реактивной мощности (рис. 1а) тем, что к выводам нагрузки подсоединена конденсаторная батарея с ёмкостью  $C$ , величина которой определяется величиной, компенсируемой реактивной мощностью нагрузки.

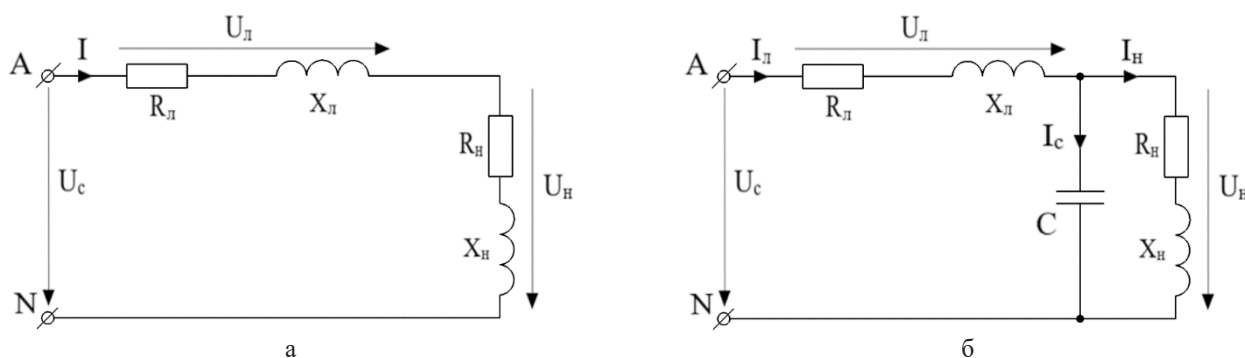


Рис. 1. Схема замещения однофазной ЛЭП:

а – без компенсации реактивной мощности; б – с компенсацией реактивной мощности

Fig. 1. Substitution diagram of a single-phase power transmission line:

a – without reactive power compensation; b – with reactive power compensation

<sup>8</sup> ГОСТ 839-2019. Межгосударственный стандарт. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 40 с.

<sup>9</sup> РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. 149 с.

### Результаты и их обсуждение

Определение параметров качества и энергоэффективности передачи ЭЭ по низковольтной сети осуществим согласно схемам замещения (рис. 1а, 1б). Рассмотрим определение параметров ЛЭП низкого напряжения на примере электроснабжения нагрузки активной мощностью  $P_n = P_{ном} = 10000$  Вт от силового трансформатора с фазным напряжением  $U_c = 230$  В по воздушной однофазной ЛЭП проводом А50 длиной 1 км.

При заданных номинальных параметрах  $P_n = P_{ном} = 10000$  Вт = const,  $U_n = U_{ном} = 220$  В = const и снижении  $\cos \varphi_n$  от 1 до 0,3 согласно (7) определим номинальный ток  $I_{ном}$  и величину активного сопротивления нагрузки (6)  $R_n = \frac{P_n}{I^2}$  в электроэнергетической системе без компенсации реактивной мощности (рис. 1а). Далее находим: полное сопротивление нагрузки  $Z_n = \frac{R_n}{\cos \varphi_n}$ ; индуктивное сопротивление нагрузки  $X_n = Z_n \cdot \sin \varphi_n$ ; индуктивность нагрузки  $L_n = \frac{X_n}{\omega}$ , где  $\omega$  – круговая частота,  $\omega = 314$  с<sup>-1</sup>; полную мощность нагрузки  $S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n}$ .

Результаты расчётов номинальных параметров нагрузки при номинальной мощности и напряжении, проведенных без учёта параметров ЛЭП, представлены в таблице 1.

Параметры ЛЭП (активное сопротивление ЛЭП  $R_l = 0,22$  Ом, индуктивное сопротивление ЛЭП  $X_l = 0,123$  Ом, индуктивность проводов  $L = 0,392$  мГн) определены исходя из потери напряжения в ЛЭП (2) при  $U_c = 230$  В;  $U_n = U_{ном} = 220$  В,  $P_n = P_{ном} = 10000$  Вт,  $\cos \varphi_n = 1$  и в удельных сопротив-

лениях ЛЭП: активном  $R_0 = 0,578$  Ом/км и индуктивном  $X_0 = 0,325$  Ом/км.

В соответствии с результатами расчётов (табл. 1) проводим моделирование однофазной ЛЭП и её нагрузки в электронной программе Electronics Workbench (рис. 2) при снижении  $\cos \varphi_n$  от 1 до 0,3 и сводим результаты моделирования в таблицу 1.

В таблице 1 приняты следующие обозначения:

$I_n = I_l = I = \frac{U_c}{Z_c}$  – ток нагрузки, равный току ЛЭП

и току системы;

$U_c$  – напряжение на выходе из источника системы;

$U_l = I \cdot Z_l$ ,  $U_n = I \cdot Z_n$  – падение напряжения в проводах ЛЭП и на нагрузке;

$P_c = I^2 \cdot R_c = I^2 \cdot (R_n + R_l)$  – активная мощность источника ЭЭ;

$\Delta P_l = I^2 \cdot R_l = P_c - P_n = P_n \cdot \frac{R_l}{R_n}$  – активная мощность, теряемая в проводах ЛЭП;

$P_n^2 = I^2 \cdot R_n$  – потребляемая нагрузка;

$\Delta U_l = U_c - U_n$  – потери напряжения в проводах ЛЭП;

$\delta U_n = U_n - U_{ном}$  – отклонение напряжения на нагрузке;

$\delta P_l = \frac{R_l}{R_n + R_l}$  – относительные потери мощности в ЛЭП ( $\delta P_l = 1 - \eta_l$  (4));

$\eta_l = \frac{P_n}{P_c} = \frac{U_n \cdot I \cdot \cos \varphi_n}{U_c \cdot I \cdot \cos \varphi_l} = \frac{R_n}{R_n + R_l}$  – коэффициент полезного действия передачи ЭЭ по ЛЭП.

Анализируя таблицу 1, можно заключить, что:

– величина коэффициента мощности нагрузки изменяется при изменении активного, индуктивного и полного сопротивлений нагрузки;

Таблица 1

Определение параметров однофазной ЛЭП без компенсации реактивной мощности

Table 1

Identification of single-phase power transmission line parameters, without compensation reactive power

| №                                             | $\cos \varphi_n$ | $R_n$ , Ом | $X_n$ , Ом | $L_n$ , мГн | $Z_n$ , Ом | $S_n$ , ВА | $I_{ном}$ , А                                  | $I_n$ , А | $U_c$ , А | $U_l$ , А | $U_n$ , А | $P_c$ , Вт | $\Delta P_l$ , Вт | $P_n$ , Вт | $\Delta U_l$ , В | $\delta U_n$ , В | $\delta P_l$ | $\eta_l$ |
|-----------------------------------------------|------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------------|------------|------------------|------------------|--------------|----------|
| Расчётные параметры<br>Calculation parameters |                  |            |            |             |            |            | Результаты моделирования<br>Simulation results |           |           |           |           |            |                   |            |                  |                  |              |          |
| 1                                             | 1,0              | 4,84       | 0,00       | 0,00        | 4,84       | 10000      | 45,45                                          | 45,43     | 230       | 11,49     | 219,9     | 10440      | 453,9             | 9990       | 10,1             | -0,1             | 0,043        | 0,957    |
| 2                                             | 0,9              | 3,92       | 1,90       | 6,05        | 4,36       | 11111      | 50,5                                           | 49,77     | 229,9     | 12,59     | 217,4     | 10260      | 545               | 9712       | 12,5             | -2,5             | 0,053        | 0,947    |
| 3                                             | 0,8              | 3,10       | 2,32       | 7,39        | 3,87       | 12500      | 56,8                                           | 55,52     | 229,9     | 14,04     | 216,0     | 10230      | 678               | 9556       | 13,9             | -3,9             | 0,066        | 0,934    |
| 4                                             | 0,7              | 2,37       | 2,42       | 7,71        | 3,39       | 14286      | 64,9                                           | 62,92     | 229,9     | 15,91     | 214,6     | 10260      | 870,9             | 9386       | 15,3             | -5,3             | 0,086        | 0,914    |
| 5                                             | 0,6              | 1,74       | 2,32       | 7,39        | 2,90       | 16666      | 75,75                                          | 72,81     | 229,9     | 18,41     | 213,0     | 10390      | 1166              | 9229       | 16,9             | -6,9             | 0,112        | 0,888    |
| 6                                             | 0,5              | 1,21       | 2,10       | 6,67        | 2,42       | 20000      | 90,9                                           | 86,32     | 229,9     | 21,38     | 210,9     | 10660      | 1639              | 9024       | 19,0             | -9,0             | 0,154        | 0,846    |
| 7                                             | 0,4              | 0,775      | 1,77       | 5,65        | 1,937      | 25000      | 113,6                                          | 106,2     | 229,9     | 26,86     | 208,0     | 11240      | 2482              | 8758       | 22,0             | -12,0            | 0,221        | 0,779    |
| 8                                             | 0,3              | 0,436      | 1,38       | 4,41        | 1,45       | 33333      | 151,5                                          | 138,2     | 229,9     | 34,97     | 203,2     | 12560      | 4205              | 8360       | 26,7             | -16,7            | 0,335        | 0,665    |

– снижение коэффициента мощности нагрузки приводит к уменьшению падения напряжения и мощности нагрузки, а также к увеличению тока нагрузки, определяемого сопротивлениями нагрузки и проводов ЛЭП (10):

$$I_n = I_{\text{л}} = I = \frac{U_{\text{с}}}{Z_{\text{с}}};$$

– абсолютные потери энергии в ЛЭП увеличиваются и определяются величиной активной мощности нагрузки и отношением активного сопротивления проводов ЛЭП к активному сопротивлению нагрузки:

$$\Delta P_{\text{л}} = I^2 R_{\text{л}} = P_{\text{н}} \cdot \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{н}}}. \quad (11)$$

Поделив потери мощности в ЛЭП (11) на  $P_{\text{с}}$  с учётом (4) определяются относительные потери мощности в ЛЭП, которые равны отношению активного

сопротивления ЛЭП к общему активному сопротивлению системы:

$$\delta P_{\text{л}} = \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{л}}}. \quad (12)$$

Отклонение напряжения на нагрузке при снижении коэффициента мощности нагрузки уменьшается и с учётом (1) определяются величиной тока и полного сопротивления нагрузки:

$$\delta U_{\text{н}} = I Z_{\text{н}} - U_{\text{ном}}. \quad (13)$$

Определение параметров электроэнергетической системы с компенсацией реактивной мощности (рис. 1б) произведем на примере моделирования однофазной ЛЭП и её нагрузки с помощью программы Electronics Workbench (рис. 3) при изменении коэффициента мощности системы  $\cos \varphi_{\text{с}}$  за счёт ёмкости конденсаторной батареи, подключённой к выводам нагрузки.

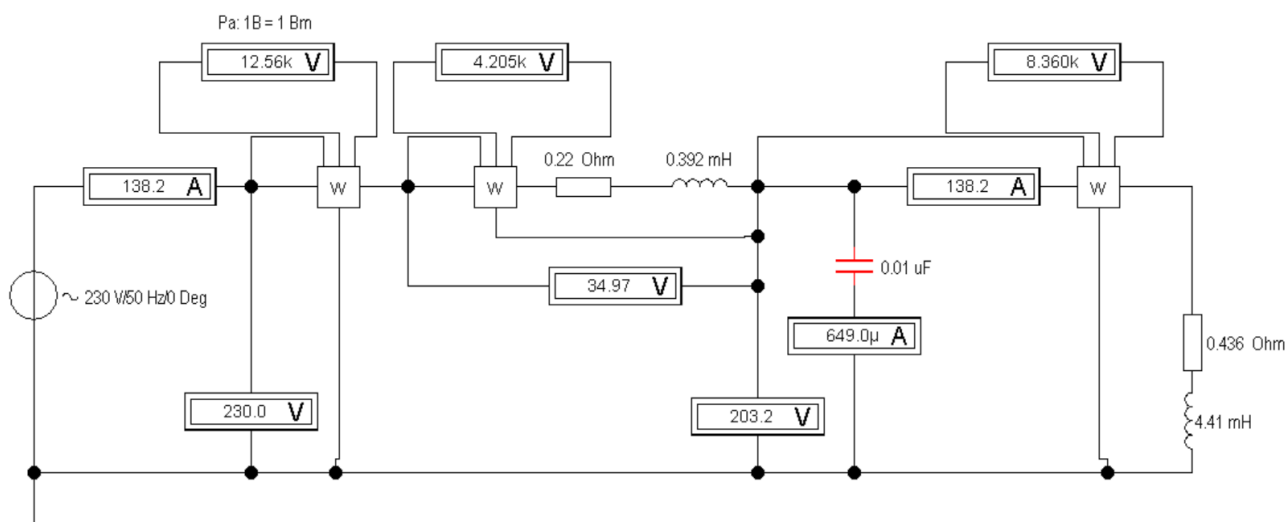


Рис. 2. Схема моделирования однофазной ЛЭП без компенсации реактивной мощности

Fig. 2. Simulation scheme of a single-phase power transmission line, without reactive power compensation

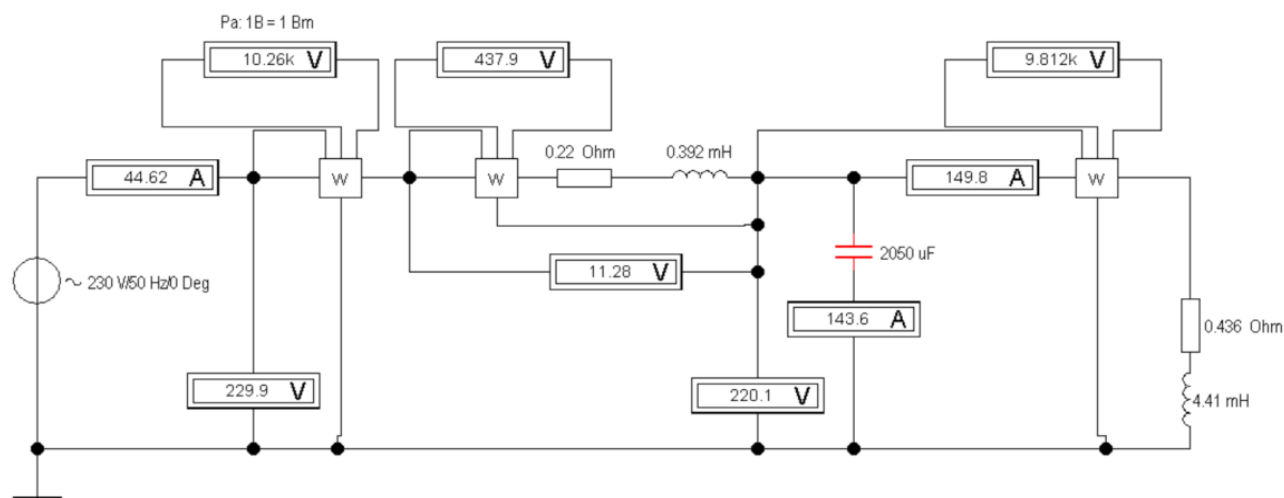
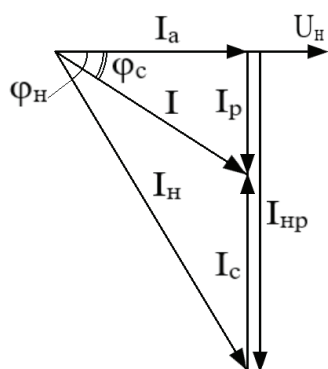


Рис. 3. Схема моделирования однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности

Fig. 3. Simulation scheme of a single-phase power transmission line with reactive power compensation

Принцип действия электроэнергетической системы с компенсацией реактивной мощности основан на явлении резонанса токов и компенсации реактивного (индуктивного) тока нагрузки  $I_n$  ёмкостным током конденсаторной батареи  $I_c$  (рис. 4). В соответствии с векторной диаграммой ток нагрузки отстаёт от напряжения нагрузки  $U_n$  на угол  $\varphi_n$ . При включении конденсаторной батареи на напряжение нагрузки (рис. 1б) её ток опережает напряжения нагрузки на 90 град. При суммировании токов нагрузки и конденсаторной батареи суммарный ток ЛЭП  $I_\Sigma$ , равный току электроэнергетической системы  $I$ , отстаёт от напряжения нагрузки  $U_n$  на угол электроэнергетической системы  $\varphi_\Sigma$ .

Сравнивая реактивные токи нагрузки  $I_{\text{нр}}$  конденсаторной батареи  $I_c$  и электроэнергетической системы  $I_p$ , определим величину ёмкости конденсаторной



**Рис. 4. Векторная диаграмма однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности**

**Fig. 4. Vector diagram of single-phase power transmission line with reactive power compensation**

батареи, необходимой для компенсации реактивной мощности нагрузки:

$$C = \frac{P_H \cdot (\operatorname{tg} \varphi_H - \operatorname{tg} \varphi_c)}{\omega \cdot U_H^2}, \quad (14)$$

где  $P_n$  – активная мощность нагрузки при напряжении  $U_n$  и коэффициенте мощности нагрузки  $\cos \varphi_n$ ;  $\operatorname{tg} \varphi_n$  – коэффициент реактивной мощности нагрузки;  $\operatorname{tg} \varphi_c$  – коэффициент реактивной мощности энергетической системы, определяемый требованиями к компенсации реактивной мощности нагрузки;  $\omega$  – круговая частота,  $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ .

Определяя ёмкость конденсаторной батареи (14) для компенсации реактивной мощности, полученной при заданных  $P_H = P_{ном} = 10000$  Вт и  $\cos \varphi_H = 0,3$  (табл. 1, строка 8), для требуемых коэффициентов мощности электроэнергетической системы  $\cos \varphi_c$  ( $\operatorname{tg} \varphi_c$ ) проводим моделирование однофазной ЛЭП с компенсацией её реактивной мощности (рис. 16) в электронной программе Electronics Workbench (рис. 2) при повышении  $\cos \varphi_c$  от 0,3 до 1.

Параметры однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности обозначены в таблице 2:  $I$ ,  $I_{\text{д}}$ ,  $I_{\text{н}}$  – ток системы, ЛЭП и нагрузки;  $U_{\text{с}}$  – напряжение на выходе из источника системы;  $U_{\text{д}}$ ,  $U_{\text{н}}$  – падение напряжения в проводах ЛЭП и на нагрузке;  $P_{\text{с}}$ ,  $\Delta P_{\text{д}}$ ,  $P_{\text{н}}$  – активная мощность источника ЭЭ, теряемая в проводах ЛЭП и потребляемая нагрузкой.

В таблице 2 представлены также результаты произведённого моделирования однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности и её нагрузки:  $\Delta U_{\text{л}}$  – потери напряжения в проводах ЛЭП;  $\delta U_{\text{н}}$  – отклонение напряжения на нагрузке;

Таблица 2

## Определение параметров однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности

Table 2

### Identification of single-phase power transmission line parameters, with compensation reactive power

| №  | $\cos\varphi_c$                              | $tg\varphi_c$ | $C, \text{ мкФ}$ | $I, A$ | $I_c, A$ | $I_H, A$ | $U_c, A$ | $U_{\text{д}}, A$                             | $U_H, A$ | $P_c, \text{ Вт}$ | $\Delta P_{\text{д}}, \text{ Вт}$ | $P_H, \text{ Вт}$ | $\Delta U_{\text{д}}, \text{ В}$ | $\delta U_H, \text{ В}$ | $\delta P_{\text{д}}, \text{ Вт}$ | $\eta_{\text{д}}, \%$ |
|----|----------------------------------------------|---------------|------------------|--------|----------|----------|----------|-----------------------------------------------|----------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
|    | Расчётные параметры / Calculation parameters |               |                  |        |          |          |          | Результаты моделирования / Simulation results |          |                   |                                   |                   |                                  |                         |                                   |                       |
| 1  | 0,8                                          | +0,75         | 2534             | 57,44  | 180,6    | 152,4    | 230      | 14,53                                         | 224,0    | 10900             | 725,7                             | 10160             | 6,0                              | −4,0                    | 0,068                             | 0,932                 |
| 2  | 0,9                                          | +0,48         | 2360             | 50,48  | 167,2    | 151,4    | 230      | 12,77                                         | 222,6    | 10610             | 560,2                             | 10030             | 7,4                              | −2,6                    | 0,055                             | 0,945                 |
| 3  | 1,0                                          | 0,0           | 2050             | 44,62  | 143,6    | 149,8    | 229,9    | 11,28                                         | 220,1    | 10260             | 437,9                             | 9812              | 9,8                              | −0,2                    | 0,044                             | 0,956                 |
| 4  | 0,9                                          | −0,48         | 1741             | 48,76  | 120,6    | 148,1    | 229,9    | 12,32                                         | 217,7    | 10120             | 522,6                             | 9542              | 12,2                             | +2,2                    | 0,058                             | 0,942                 |
| 5  | 0,8                                          | −0,75         | 1567             | 51,61  | 107,8    | 147,1    | 230      | 13,81                                         | 216,3    | 10130             | 656                               | 9469              | 13,7                             | +3,7                    | 0,065                             | 0,935                 |
| 6  | 0,7                                          | −1,02         | 1333             | 62,09  | 95,24    | 146,2    | 230      | 15,70                                         | 214,8    | 10190             | 848                               | 9344              | 15,2                             | +5,2                    | 0,083                             | 0,917                 |
| 7  | 0,6                                          | −1,33         | 1193             | 71,92  | 80,94    | 145,0    | 230      | 18,19                                         | 213,2    | 10340             | 1138                              | 9202              | 16,8                             | +6,8                    | 0,110                             | 0,890                 |
| 8  | 0,5                                          | −1,73         | 935              | 85,68  | 62,80    | 143,6    | 230      | 21,67                                         | 211,0    | 10630             | 1615                              | 9018              | 19,0                             | +9,0                    | 0,151                             | 0,848                 |
| 9  | 0,4                                          | −2,29         | 574              | 105,9  | 38,00    | 141,5    | 230      | 26,77                                         | 208,0    | 11220             | 2465                              | 8759              | 22,0                             | +12,0                   | 0,219                             | 0,780                 |
| 10 | 0,3                                          | −3,18         | 0,01             | 138,2  | 0        | 138,2    | 230      | 34,97                                         | 203,2    | 12560             | 4205                              | 8360              | 26,8                             | +16,8                   | 0,334                             | 0,666                 |

$\eta_{\text{л}}$  – коэффициент полезного действия передачи ЭЭ по ЛЭП;  $\delta P_{\text{л}}$  – относительные потери ЭЭ в ЛЭП.

Анализ полученных результатов (табл. 2) показывает, что увеличение коэффициента мощности системы от 0,3 до 1 при неизменном коэффициенте мощности нагрузки (в данном примере  $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,3$ ) приводит к изменению ряда параметров:

- варьируется величина коэффициента мощности системы  $\cos \varphi_{\text{с}}$  за счёт изменения ёмкости конденсаторной батареи;

- ток нагрузки стремится к номинальному току нагрузки  $I_{\text{ном}}$  (табл. 1, строка 8), а ток в ЛЭП  $I_{\text{л}}$ , равный току электроэнергетической системы  $I$ , снижается до минимального;

- падение напряжения и мощности нагрузки увеличиваются и стремятся к номинальным параметрам нагрузки  $U_{\text{н}} = U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ , и  $P_{\text{н}} = P_{\text{ном}} = 10000 \text{ Вт}$ ;

- абсолютные потери мощности (энергии) в ЛЭП снижаются до минимальных при полной компенсации реактивной мощности и определяются по уравнению (12), то есть не зависят от изменения  $\cos \varphi_{\text{н}}$ , а определяются величиной, передаваемой активной мощности нагрузки и отношением активных сопротивлений проводов ЛЭП к нагрузке;

- коэффициент полезного действия передачи ЭЭ по ЛЭП определяется по выражению  $\eta_{\text{л}} = \frac{I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}}}{I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}} + I^2 R_{\text{л}}}$ ,

а потери мощности равны  $\Delta P_{\text{л}} = \frac{I^2 R_{\text{л}}}{I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}} + I^2 R_{\text{л}}}$ .

### Список литературы

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Оценка величины потерь электроэнергии в электрических сетях до 1000 В // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 1-2. С. 108-117. EDN: RACCWL
2. Полянский И.А. Оценка влияния отклонения напряжения на рабочие характеристики асинхронного электродвигателя // Fundamental Science Innovation and Technology: Сборник научных статей по материалам II Международной научно-практической конференции. Уфа: ООО Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. Ч. 1. С. 223-235. EDN: CAZNRP
3. Загинайлов В.И., Овсянникова Е.А., Попов А.И. Оценка энергоэффективности работы энергоустановок и сельскохозяйственных технологий // Доклады ТСХА. 2021. Т. 293. Ч. III. С. 23-26. EDN: BMAXRF
4. Воротницкий В.Э. Снижение потерь электроэнергии – важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // Энергосбережение. 2014. № 4. С. 52-58. EDN: SGHVAN
5. Воротницкий В.Э., Жежеленко И.В., Трофимов Г.Г. Повышение энергетической эффективности электрических сетей // Региональная энергетика и энергосбережение. 2017. № 4. С. 50-52. EDN: ПНQKG
6. Загинайлов В.И., Мамедов Т.А., Стушкина Н.А., Лештаев О.В. Оценка эффективности работы электроэнергетической системы с распределенной генерацией // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 4. С. 147-159. EDN: KBEEAV

### Выводы

При передаче электрической энергии по однофазной ЛЭП в трёхфазной сети напряжением 380/220 В с глухо заземлённой нейтралью и нагрузкой, размещённой в конце ЛЭП без компенсации и с компенсацией реактивной мощности, установлено, что:

- изменение параметров в этих системах, в том числе параметров качества и энергоэффективности передачи электрической энергии, зависит от величины тока системы, определяемого полными сопротивлениями нагрузки и линии электропередачи;

- качество электрической энергии, передаваемой по ЛЭП и определяемое через отклонение напряжения на нагрузке или через потери напряжения в проводах ЛЭП, зависит от величины тока системы и полного сопротивления нагрузки;

- энергоэффективность передачи энергии по ЛЭП без компенсации реактивной мощности, определяемая абсолютной потерей мощности (энергии) в ЛЭП, зависит от величины тока в проводах ЛЭП в квадрате и соотношения активных сопротивлений нагрузки и ЛЭП, а относительные потери мощности (энергии) в ЛЭП равны отношению активного сопротивления ЛЭП к общему активному сопротивлению электроэнергетической системы;

- энергоэффективность передачи энергии по ЛЭП с компенсацией реактивной мощности определяется величинами токов и активными сопротивлениями ЛЭП и нагрузки.

### References

1. Gracheva E.I., Naumov O.V. Estimation of the magnitude of losses in electrical networks up to 1000V. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki*. 2003;1-2:108-119. (In Rus.)
2. Polyanskiy I.A. Assessment of the effect of voltage deviation on the performance characteristics of an asynchronous electric motor. In: *Fundamental science Innovation and Technology. Proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference*. Ufa, 2023:223-235. (In Rus.)
3. Zaginailov V.I., Ovsyannikova E.A., Popov A.I. Assessment of energy efficiency of power plants and agricultural technologies. *Doklady TSKhA*. 2021;293: III:23-26. (In Rus.)
4. Vorotnitskiy V.E. Reduction of electricity losses as the most important way of energy saving in electric networks. *Energoberezhenie*. 2014;4:45-50. (In Rus.)
5. Vorotnitskiy V.E., Zhezhelchenko I.V., Trofimov G.G. Improving the energy efficiency of electric networks. *Regionalnaya Energetika i Energoberezhenie*. 2017;4:50-52. (In Rus.)
6. Zaginailov V.I., Mammadov T.A., Stushkina N.A., Lesh-taev O.V. Evaluation of the efficiency of an electric power system with distributed generation. *International Technical and Economic Journal*. 2022;4:147-159. (In Rus.) <https://doi.org/10.34286/1995-464>
7. Leshtayev O.V., Rtishcheva N.E., Rtishchev K.P. Analysis of power supply options for a stable from a solar power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 3, Mining, Production, Transmission, Processing*

7. Leshtayev O.V., Rtishcheva N.E., Rtishchev K.P. Analysis of power supply options for a stable from a solar power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;808:012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012013>

8. Воронин В., Гаджиев М., Шамонов Р. Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС // Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. № 2 (11). С. 40-47. EDN: OYMKIB

#### Информация об авторах

**Владимир Ильич Загинайлов<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, профессор; [energo-viz@mail.ru](mailto:energo-viz@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

**Тимур Азерович Мамедов<sup>2</sup>**, советник генерального директора; [mta020593@mail.ru](mailto:mta020593@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>

**Олег Валерьевич Лештаев<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, доцент; [oleg-leshtayev@yandex.ru](mailto:oleg-leshtayev@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>

**Валентин Эдуардович Манько<sup>4</sup>**, [valentin.manko@gmail.com](mailto:valentin.manko@gmail.com)  
<sup>1,3</sup> Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

<sup>2</sup> ООО «Объединенная электросетевая компания» (ООО «ОЭСК»); 115114, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Дербеневский переулок, 5

<sup>4</sup> ООО «Энергетическое партнерство»; 107076, Российская Федерация, г. Москва, пер. Колодезный, 14

#### Вклад авторов

В.И. Загинайлов – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, формулирование выводов  
Т.А. Мамедов – анализ литературы, формулирование направлений исследования, обработка результатов исследования  
О.В. Лештаев – подготовка рукописи, обработка результатов исследования

В.Э. Манько – обработка результатов исследования, формулирование выводов

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; поступила после рецензирования и доработки 23.01.2024; принята к публикации 23.01.2024

and Environmental Protection, Moscow, 2021. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012013>

8. Voronin V., Gadzhiev M., Shamonov R. Development trends of the voltage and reactive power regulation system in the UNES. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2012;2:40-48. (In Rus.)

#### Author Information

**Vladimir I. Zaginailov<sup>1</sup>**, DSc (Eng), Professor; [energo-viz@mail.ru](mailto:energo-viz@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

**Timur A. Mamedov<sup>2</sup>**, Adviser to Director General; [mta020593@mail.ru](mailto:mta020593@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>

**Oleg V. Leshtayev<sup>3</sup>**, CSc (Eng), Associate Professor; [oleg-leshtayev@yandex.ru](mailto:oleg-leshtayev@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>

**Valentin E. Manko<sup>4</sup>**, [valentin.manko@gmail.com](mailto:valentin.manko@gmail.com)

<sup>1,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

<sup>2</sup> ООО “Obyedinennaya ElektroSetevaya Kompaniya (United Electric Grid Company)” (ООО “ОЭСК”); 115114 1-iy Dербenevskiy Pereulok Str., 5, Moscow, Russia

<sup>4</sup> LLC “Energeticheskoe Partnerstvo”; 107076, Kolodeznyi Side-Str. 14, Moscow, Russia

#### Author contribution

V.I. Zaginaylov – research supervision, research administration, general conclusions

T.A. Mamedov – literature review, data curation and formal analysis

O.V. Leshtayev – data curation and formal analysis, draft preparation

V.E. Manko – processing of research results, general conclusions

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 08.11.2023; revised 23.01.2024; accepted 23.01.2024