



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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научный журнал

Том 25. № 6 / 2023

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

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
<https://agroengineering.timacad.ru/jour/index>

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

Подписано в печать 29.12.2023 г.
Формат 60 84/8
Тираж 500 экз.

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2023

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 Снежан Иванов, 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>



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

AGRICULTURAL ENGINEERING (MOSCOW)

Scientific Journal

Vol. 25(6)/2023

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
gosudarstvennyy 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

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
<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 29.12.2023
Format – 60 84/8
Circulation – 500 copies.

© Federal State Budgetary Establishment
of Higher Education – Russian State
Agrarian University – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, 2023

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. Storchev, 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

<i>Шевкун Н.А., Игнаткин И.Ю., Кожевникова Н.Г., Шевкун В.А., Драный А.В.</i> Теплоутилизационная установка: повышение энергоэффективности	4
<i>Купреенко А.И., Исаев Х.М., Шкуратов Г.В., Исаев С.Х.</i> Прогнозирование теплотехнических характеристик системы естественной вентиляции коровника	10
<i>Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Жумагулов Ж.Б., Мошонкин А.М.</i> Математическая модель очистки кожного покрова коров для повышения интенсивности теплового обмена при тепловых стрессах	16
<i>Пляка В.И., Большаков А.А., Сергеева Н.А., Смирнов К.А.</i> Оценка равномерности распределения семян экспериментальной сеялкой: сплошной высев газонных трав	24
<i>Широков Ю.А., Платонов В.Н.</i> Технология производства бионутриентов на основе активированных копролитов и оценка их эффективности	31

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

<i>Темасова Г.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Чепурин А.В.</i> Методика оценки брака: процесс контроля коренных шеек коленчатых валов в ремонтном производстве	39
---	----

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

<i>Страхов В.Ю., Вендин С.В., Саенко Ю.В.</i> Предпосевная УФ-обработка семян сои: проращивание на витаминный корм	46
<i>Князева И.В., Вершинина О.В., Гришин А.А.</i> Влияние импульсного и сканирующего светодиодного излучения на биохимический состав и продуктивность капусты японской сорта Мизуна Ред	53
<i>Бакиров С.М., Широбокоева Т.А.</i> Обоснование параметров системы искусственного светодиодного освещения животноводческих помещений	61
<i>Виноградов А.В., Виноградова А.В., Букреев А.В., Лансберг А.А.</i> Анализ загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 6-10 кВ	67
<i>Воронов Е.В., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Просвирыкова М.В., Сторчевой В.Ф.</i> Термообработка слизистых субпродуктов под воздействием электрофизических факторов: разработка установки	76

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

<i>Григорьева М.В., Багнавец Н.Л.</i> Проектное обучение и кейс-технологии: подготовка специалиста-агроинженера на курсе химии	83
<i>Занфирова Л.В., Коваленок Т.П., Шингарева М.В.</i> Интеллектуальное воспитание в процессе подготовки агроинженеров	88

CONTENTS

FARM MACHINERY AND TECHNOLOGIES

<i>Shevkun N.A., Ignatkin I.Yu., Kozhevnikova N.G., Shevkun V.A., Draniy A.V.</i> Heat recovery plant: ways to improve energy efficiency	4
<i>Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Shkuratov G.V., Isaev S.Kh.</i> Forecasting the thermal performance of the natural ventilation system used in a cowshed	10
<i>Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Zhmagulov Zh.B., Moshonkin A.M.</i> Mathematical model of cow skin cleaning used to increase heat exchange intensity under heat stresses	16
<i>Plyaka V.I., Bolshakov A.A., Sergeeva N.A., Smirnov K.A.</i> Evaluating uniformity of seed distribution with an experimental seeder: solid sowing of lawn grasses	24
<i>Shirokov Yu.A., Platonov V.N.</i> Technology of producing bionutrients based on activated coprolites and evaluation of their effectiveness	31

TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

<i>Temasova G.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Chepurin A.V.</i> Methodology of evaluating rejects: inspection of crankshaft main journals in repair production	39
--	----

POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

<i>Strakhov V.Yu., Vendin S.V., Saenko Yu.V.</i> Pre-sowing UV treatment of soybean seeds: sprouting for vitamin feed	46
<i>Knyazeva I.V., Vershinina O.V., Grishin A.A.</i> Effect of pulsed and scanning LED irradiation on physicochemical parameters of Japanese cabbage of the Mizuna Red variety	53
<i>Bakirov S.M., Shirobokova T.A.</i> Justification of the parameters of the artificial intelligence system of LED lighting for livestock premises	61
<i>Vinogradov A.V., Vinogradova A.V., Bukreev A.V., Lansberg A.A.</i> Analysis of the load of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV	67
<i>Voronov E.V., Mikhailova O.V., Novikova G.V., Prosviryakova M.V., V.F., Storchevov</i> Heat treatment of mucous by-products under the influence of electrophysical factors: development of the installation	76

THEORY AND METHODOLOGY OF PROFESSIONAL EDUCATION

<i>Grigoryeva M.V., Bagnavets N.L.</i> Use of project-based learning and case technology in the course of Chemistry for training agricultural engineers	83
<i>Zanfirova L.V., Kovalenok T.P., Shingareva M.V.</i> Intellectual education in the process of training agricultural engineers	88

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 697.921.47

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-4-9>

Теплоутилизационная установка: повышение энергоэффективности

Н.А. Шевкун¹, И.Ю. Игнаткин², Н.Г. Кожевникова³, В.А. Шевкун⁴, А.В. Драный⁵^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ energo-shevkun@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>² ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>³ energo-ngk@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>⁴ vshevkun@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>⁵ energo-dranyu@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>

Аннотация. Рекуперативная теплоутилизационная установка обеспечивает снижение затрат на отопление производственных животноводческих помещений. Однако существующие конструкции отличаются неравномерностью распределения воздушного потока по поверхности теплообменника и не гарантируют полную утилизацию теплоты вытяжного воздуха. С целью решения данной проблемы на примере рекуперативной теплоутилизационной установки УТ-3000 рассмотрена возможность ее дооснащения аэродинамической решеткой. Проведен анализ применимости аэродинамической решетки. В качестве оптимизационного параметра учитывалась величина хорды лопадки. Вычисленные потери давления на участке «Вентилятор-поддон-теплообменник» показали, что аэродинамическая решетка с «нормальным» числом лопаток обеспечивает минимальные потери давления воздушного потока 0,73 Па, что на 58% меньше, чем в исполнении без аэродинамической решетки. Для последующего экспериментального исследования равномерного распределения воздушного потока по поверхности теплообменника и повышения энергоэффективности функционирования теплоутилизационной установки необходимо изготовить теплоутилизатор с аэродинамической решеткой, учитывая рекомендуемый диапазон «нормальных» чисел лопаток от 16 до 21, дугу окружности лопадки 95° и угол установки лопаток к диагонали в пределах 68...82°.

Ключевые слова: повышение энергоэффективности, теплоутилизационная установка, УТ-3000, микроклимат, потери давления, аэродинамическая решетка, число лопаток

Для цитирования: Шевкун Н.А., Игнаткин И.Ю., Кожевникова Н.Г., Шевкун В.А., Драный А.В. Теплоутилизационная установка: повышение энергоэффективности // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 4-9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-4-9>.

ORIGINAL PAPER

Heat recovery plant: ways to improve energy efficiency

N.A. Shevkun¹, I.Yu. Ignatkin², N.G. Kozhevnikova³, V.A. Shevkun⁴, A.V. Draniy⁵^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ energo-shevkun@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>² ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>³ energo-ngk@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>⁴ vshevkun@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>⁵ energo-dranyu@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>

Abstract. One of the ways to reduce the cost of heating production facilities in animal husbandry is the use of regenerative heat recovery plants. However, the existing designs of heat exchangers have a number of design flaws affecting their functionality, in particular, the uneven distribution of the air flow over the surface of a heat exchanger. This, in turn, does not provide for a more complete utilization of exhaust air heat. Using the example of a recuperative heat recovery unit UT-3000, the authors consider the possibility of retrofitting it with an aerodynamic

grid to evenly distribute the exhaust air flow over the heat exchanger surface and reduce energy costs for its operation. To do this, they analyzed the applicability of the aerodynamic grid. The size of a blade chord was taken into account as an optimisation parameter. The pressure losses calculated on the “fan – pallet – heat exchanger” section showed that the use of an aerodynamic grid with a “normal” number of blades would create a minimum airflow pressure loss of 0.73 Pa, which is 58% less than in the version without an aerodynamic grid. Further experimental study of the uniform airflow distribution over the heat exchanger surface aimed at improving the energy efficiency of the heat recovery unit requires a new design of a heat exchanger with an aerodynamic grid, taking into account the recommended range of “normal” number of blades from 16 to 21, the blade circumference arc of 95° and the blade pitch angle ranging between 68 and 82° .

Keywords: energy efficiency improvement, heat recovery plant, UT-3000, indoor climate, pressure loss, aerodynamic grid, number of blades

For citation: Shevkun N.A., Ignatkin I.Yu., Kozhevnikova N.G., Shevkun V.A., Draniy A.V. Heat recovery plant: ways to improve energy efficiency. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):4-9. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-4-9>.

Введение. Снижение энергетических затрат на отопление производственных помещений возможно за счет утилизации теплоты вытяжного воздуха с помощью рекуперативных теплоутилизационных установок [1, 2]. На практике встречаются различные технические решения компоновки теплоутилизационных установок как зарубежных, так и отечественных производителей. Одним из оригинальных технических решений отечественного производства является рекуперативная теплоутилизационная установка УТ-3000 [3].

Функционирование рекуперативной теплоутилизационной установки должно обеспечивать поддержание требуемых параметров микроклимата в животноводческом помещении с минимальными затратами энергии и максимальной утилизацией теплоты удаляемого из помещения воздуха в холодные периоды года.

В ходе функционирования теплоутилизационной установки УТ-3000 удаляемый из помещения воздух вытяжным вентилятором нагнетается в поддон, пройдя через который, направляется в теплообменник, где отдает свою теплоту приточному воздуху, и далее отводится в атмосферу. Особый интерес заслуживает перемещение воздушного потока на участке «Вентилятор-поддон-теплообменник», на котором истекающий с лопаток вентилятора вытяжной воздух образует закрученный турбулентный поток, совершающий при своем перемещении резкий поворот на 90° в сторону теплообменника. При резком повороте воздушный поток дополнительно турбулизуется вследствие возникновения вихревой области у внутренней стенки теплообменника и смещения поля скоростей к его внешней стенке, что вызывает неравномерное распределение воздушного потока по поверхности теплообменника и увеличивает значение потерь давления [4, 5] (рис. 1), которые закладываются в энергетические затраты функционирования установки.

Снижение энергетических затрат и повышение качества утилизации теплоты возможны за счет снижения потерь давления воздушного потока [6] в каналах теплоутилизационной установки и обеспечения его равномерного распределения по поверхности рекуператора.

Цель исследований: разработка технического решения для равномерного распределения воздушного потока по поверхности теплообменника и повышения энергоэффективности функционирования теплоутилизационной установки.

Материалы и методы. Предполагается, что минимизировать потери давления воздушного потока на участке «Вентилятор-поддон-теплообменник», обеспечить равномерность его распределения по теплообменнику можно посредством установки

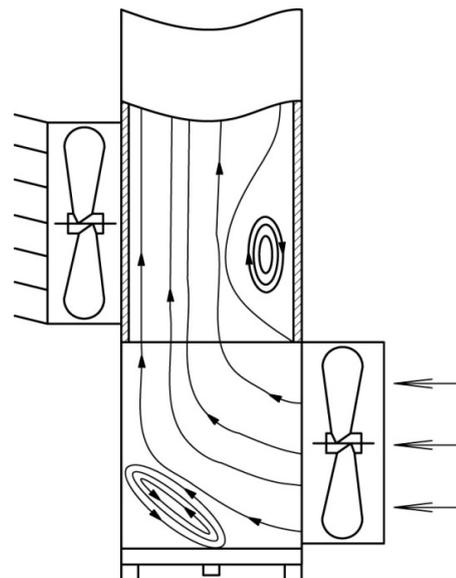


Рис. 1. Схема распределения воздушного потока по поверхности теплообменника

Fig. 1. Diagram of air flow distribution over the heat exchanger surface

аэродинамической решетки, состоящей из направляющих лопаток, установленных в вертикальной плоскости поддона по его диагонали (рис. 2).

Для решения поставленной задачи необходимо определить конструктивные параметры предлагаемой аэродинамической решетки.

Анализ литературы показал, что аэродинамические решетки довольно широко применяются в воздуховодах систем вентиляции. Применяемые в решетках лопатки могут быть профилированными, тонкими, концентрическими и разрезными¹. Наиболее простыми в изготовлении являются тонкие лопатки, поэтому рационально рассмотреть возможность их применения в конструкции аэродинамической решетки теплоутилизационной установки. Количество лопаток, монтируемых в коленах, может быть «нормальным», минимальным или сокращенным. В большинстве практических случаев ограничиваются использованием минимального или сокращенного числа лопаток¹, а для обеспечения равномерного распределения воздушного потока сразу за поворотом рекомендуется применять решетки с «нормальным» числом лопаток.

Для обоснования целесообразности использования аэродинамической решетки и выбора количества лопаток применительно к теплоутилизационной установке УТ-3000 определим потери давления вытяжного воздуха в ее поддоне на различных режимах работы с учетом допущения, что участок «Вентилятор-поддон-теплообменник» представляет собой

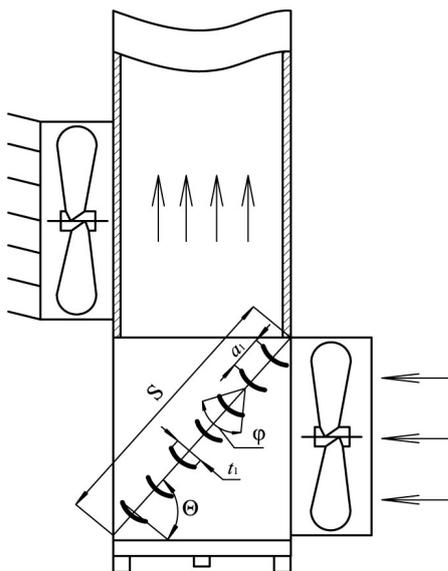


Рис. 2. Схема размещения аэродинамической решетки

Fig. 2. Mounting pattern of an aerodynamic grid

¹ Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

колено с острыми кромками ($\delta = 90^\circ$), являющееся местным сопротивлением.

Применительно к местным сопротивлениям потери давления $\Delta p_{пр}$ определяются зависимостью²:

$$\Delta p_{пр} = \xi_m \frac{\rho w_0^2}{2}, \tag{1}$$

где ξ_m – коэффициент местного сопротивления; ρ – плотность воздуха, кг/м³; w_0 – скорость воздушного потока, м/с.

В соответствии с рекомендациями² при использовании колен с острой кромкой (отсутствуют закругления на повороте), и когда сечение за поворотом больше, чем сечение перед ним, количество лопаток определяется зависимостью:

$$n_{норм} = 2,13S / t_1 - 1,$$

где t_1 – хорда лопатки (рис. 2), м; S – шаг, м.

$$S = \sqrt{b_0^2 + b_1^2},$$

где b_0 – высота канала перед поворотом (входом в поддон), м; b_1 – глубина поддона, м.

Величину хорды лопатки определяют зависимостью:

$$t_1 = (0,15 \dots 0,60b_0). \tag{2}$$

При использовании «нормального» числа лопаток их располагают вдоль линии изгиба с равномерным шагом a_i между их хордами:

$$a_i = \frac{S}{n + 1},$$

где n – число лопаток, шт.

Результаты и их обсуждение. Поскольку в воздуховодах возможно использование «нормального», минимального или сокращенного чисел лопаток, то для определения типа применяемых в составе аэродинамической решетки лопаток и целесообразности их использования выполнен расчет потерь давления потока вытяжного воздуха. Варьирование объемного расхода – от 10 до 100% всей производительности установки, составляющей 3000 м³/ч (табл. 1). Значения коэффициентов местных сопротивлений выбирались в соответствии с рекомендациями И.Е. Идельчик¹.

На основании полученных данных (табл. 1) построена поверхность распределения потерь давления в поддоне в зависимости от отсутствия или наличия аэродинамической решетки и варьирования расхода воздуха от 10 до 100% (рис. 3).

² Кожевникова Н.Г., Тогунова Н.П., Ещин А.В., Шевкун Н.А., Кривчанский В.Ф. Практикум по гидравлике: Учебное пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 248 с.

Таблица 1

Расчеты потерь давления воздуха в поддоне

Table 1

Calculations of air pressure losses in the pan

Показатель Indicator	Без аэродинамической решетки Without an aerodynamic grid	С аэродинамической решеткой, число лопаток With an aerodynamic grid, number of blades		
		минимальное minimum	сокращенное reduced	нормальное normal
Коэффициент местного сопротивления, ξ_m Local resistance coefficient, ξ_m	0,99	0,57	0,42	0,42
Шаг, м, S/ Pitch, m, S	0,50	0,50	0,50	0,50
Скорость воздушного потока, w_p , м/с / Air flow velocity, w_p , m/s	1,7	1,7	1,7	1,7
Потери давления, $\Delta p_{пр}$, Па / Pressure loss Δp_{resist} Pa				
100%	1,72	0,99	0,73	0,73
90%	1,39	0,80	0,59	0,59
80%	1,10	0,63	0,47	0,47
70%	0,84	0,49	0,36	0,36
60%	0,62	0,36	0,26	0,26
50%	0,43	0,25	0,18	0,18
40%	0,28	0,16	0,12	0,12
30%	0,15	0,09	0,07	0,07
20%	0,07	0,04	0,03	0,03
10%	0,02	0,01	0,01	0,01

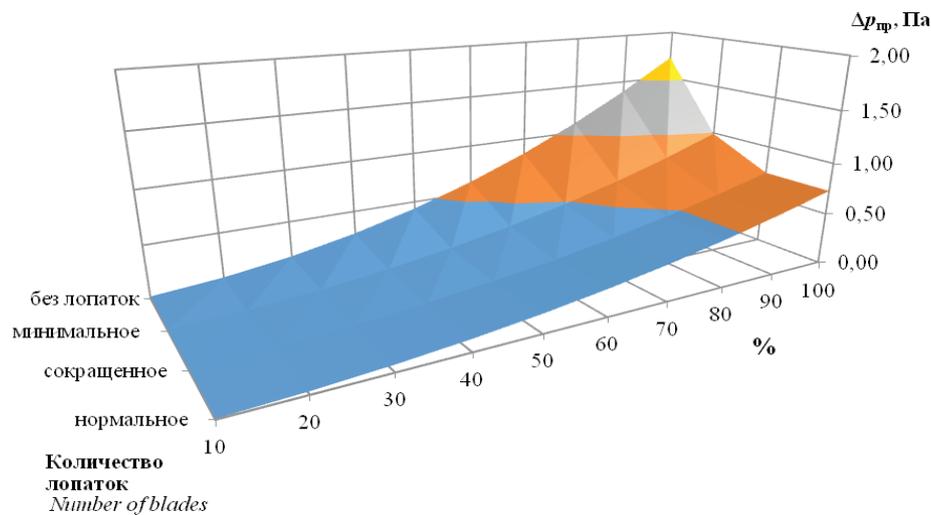


Рис. 3. Поверхность распределения потерь давления на сопротивление рециркуляционного проема

Fig. 3. Surface of pressure loss distribution on the resistance of a recirculation aperture

Анализ данных показывает, что при заданных конструктивных размерах установки и максимальной производительности вентилятора минимальные потери давления воздушного потока 0,73 Па обеспечиваются в случае, когда аэродинамическая решетка имеет сокращенное или нормальное число лопаток.

На основании известных конструктивных размеров поддона теплоутилизационной установки с учетом рекомендаций И.Е. Идельчик¹ определены геометрические параметры лопаток аэродинамической решетки и требуемое их количество (табл. 2).

Полученные результаты показывают, что число лопаток может колебаться в пределах от 5 до 21 шт. Исходя из ограниченных размерных параметров участка «Вентилятор-поддон-теплообменник» наибольший интерес представляет число лопаток в пределах от 16 до 21 шт., так как ключевым параметром оптимизации количества устанавливаемых лопаток в ограниченном пространстве будет являться величина хорды лопатки t_1 при условии получения целочисленного числа лопаток.

Для определения пространственного расположения лопаток по отношению к направлению вектора

Таблица 2

Расчеты конструктивных параметров решетки

Table 2

Calculations of the grid design parameters

Поправочный коэффициент <i>Correction factor</i>	0,15	0,2	0,25	0,30	0,35	0,4	0,5	0,5	0,55	0,60
Высота поддона, b_0 , м / <i>Pan height, b_0, m</i>	0,625									
Глубина поддона, b_1 , м / <i>Pan depth, b_1, m</i>	0,76									
Шаг, S , м / <i>Pitch, S, m</i>	0,984									
Хорда лопатки t_1 , м / <i>Chord of blade t_1, m</i>	0,094	0,125	0,156	0,188	0,219	0,250	0,281	0,313	0,344	0,375
«Нормальное» число лопаток, $n_{\text{норм}}$, шт. <i>“Normal” number of blades, $n_{\text{норм}}$, pcs.</i>	21,4	15,8	12,4	10,2	8,6	7,4	6,5	5,7	5,1	4,6
Шаг лопаток a_p , м / <i>Blade pitch a_p, m</i>	0,044	0,059	0,073	0,088	0,103	0,117	0,132	0,147	0,161	0,176

скорости набегающего воздушного потока следует учитывать, что при повороте на 90° независимо от параметров колена устанавливаются лопатки с углом дуги окружности $\varphi = 95^\circ$, угол установки лопаток к диагонали, согласно справочнику И.Е. Идельчик¹, может варьироваться в пределах $\Theta = 68 \dots 82^\circ$.

Выводы

Расчетным путем установлено, что аэродинамическая решетка с «нормальным» числом лопаток в теплоутилизационной установке УТ-3000

обеспечивает равномерное распределение воздушного потока при повороте. При этом минимальные потери давления составляют 0,73 Па, что на 58% меньше, чем в исполнении без аэродинамической решетки.

Для проведения экспериментальных исследований необходимо изготовить модель теплоутилизационной установки с аэродинамической решеткой, имеющей «нормальное» число лопаток от 16 до 21 шт., с дугой окружности лопатки 95° и углом установки лопаток к диагонали 68...82°.

Список литературы

1. Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В., Кожевникова Н.Г., Скороходов Д.М. Об особенностях организации реверсивного оттаивания в рекуператорах теплоты вытяжного воздуха // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 15-19. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-15-19>
2. Игнаткин И.Ю., Архипцев А.В., Шевкун Н.А., Овсянникова Е.А., Шевкун В.А., Мельников О.М. Рекуперативная установка с системой корректирования направления вектора потока приточного воздуха // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 183. С. 1-11. EDN: GUVWMV.
3. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P., Shevkun N.A., Skorokhodov D.M., Serov N.V., Alipichev A.Yu., Panchenko V.A. Developing and Testing the Air Cooling System of a Combined Climate Control Unit Used in Pig Farming. *Agriculture*. 2023;13(2):334. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020334>
4. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Драный А.В., Цымбал А.А., Трубилин Е.И., Коновалов В.И. Анализ характера распределения основных параметров воздушного потока в воздуховодах // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 161. С. 282-289. EDN: DKFCEV.
5. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Шевкун В.А., Драный А.В. Экспериментальные исследования условий распыла жидкостей посредством воздушного потока // Агроинженерия. 2021. № 6 (106) С. 32-37. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-32-37>
6. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Драный А.В., Цымбал А.А. Анализ характера распределения давления в воздушном потоке по длине воздуховода // Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2020», посвященной 110-летию со дня рождения академика А.В. Лыкова. 2020. С. 282-286. EDN: NBAGMA.

References

1. Ignatkin I.Yu., Shevkun N.A., Arkhptsev A.V., Kozhevnikova N.G., Skorokhodov D.M. On the peculiarities of organizing reverse defrosting in exhaust air heat recuperators. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(6):15-19. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-15-19>
2. Ignatkin I.Yu., Arkhptsev A.V., Shevkun N.A., Ovsyannikova E.A., Shevkun V.A., Melnikov O.M. Recuperative installation with a system for correcting the direction of the supply air flow vector. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2022;183:1-11. (In Rus.)
3. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P., Shevkun N.A., Skorokhodov D.M., Serov N.V., Alipichev A.Yu., Panchenko V.A. Developing and testing the air cooling system of a combined climate control unit used in pig farming. *Agriculture*. 2023;13(2):334. (In Rus.) <https://doi.org/10.3390/agriculture13020334>
4. Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Dranyj A.V., Cymbal A.A., Trubilin E.I., Kononov V.I. Analysis of pattern of the main parameters of the air flow in the air ducts distribution. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2020;161:282-289. (In Rus.)
5. Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Shevkun V.A., Draniy A.V. Experimental study of the conditions of spraying liquids with the air flow. *Agricultural Engineering*. 2021;6(106):32-37. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-32-37>
6. Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Draniy A.V., Tsymbal A.A. Analysing the nature of pressure distribution in the air flow along the duct length. *Sbornik nauchnykh trudov Sedmoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya Akademika A.V. Lykova*. 2020:282-286. (In Rus.)

Информация об авторах

Николай Александрович Шевкун¹, канд. с.-х. наук, доцент,
<https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>;
 Scopus Author ID: 57222576008;
 energo-shevkun@rgau-msha.ru

Иван Юрьевич Игнаткин², д-р техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>;
 Scopus Author ID: 57222543815; ignatkin@rgau-msha.ru

Наталья Георгиевна Кожевникова³, канд. техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>;
 energo-ngk@rgau-msha.ru

Владимир Александрович Шевкун⁴, канд. с.-х. наук;
<https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>;
 vshevkun@rgau-msha.ru

Александр Владимирович Драный⁵, канд. техн. наук;
<https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>;
 energo-dranyy@rgau-msha.ru

^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет –
 МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва,
 ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Н.А. Шевкун – аналитика, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование
 И.Ю. Игнаткин – концептуализация, редактирование окончательной версии рукописи
 Н.Г. Кожевникова – создание черновика рукописи
 В.А. Шевкун – актуальность проблемы
 А.В. Драный – визуализация

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

Information about the authors

Nikolay A. Shevkun¹, CSc (Ag), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>;
 Scopus Author ID: 57222576008;
 energo-shevkun@rgau-msha.ru

Ivan Yu. Ignatkin², DSc (Eng), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>;
 Scopus Author ID: 57222543815; ignatkin@rgau-msha.ru

Natalya G. Kozhevnikova³, PhD (Eng), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>;
 energo-ngk@rgau-msha.ru

Vladimir A. Shevkun⁴, PhD (Ag);
<https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>;
 vshevkun@rgau-msha.ru

Aleksandr V. Draniy⁵, PhD (Eng);
<https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>;
 energo-dranyy@rgau-msha.ru

^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev
 Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow,
 127434, Russia

Author contribution

N.A. Shevkun – analytics, methodology, draft finalizing and editing
 I.Y. Ignatkin – conceptualisation, draft finalizing and editing
 N.G. Kozhevnikova – original draft preparation
 V.A. Shevkun – relevance of the problem
 A.V. Draniy – visualization

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 02.08.2023; revised 12.10.2023; accepted 12.10.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.223.2:697.329

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-10-15>

Прогнозирование теплотехнических характеристик системы естественной вентиляции коровника

А.И. Купреенко¹, Х.М. Исаев², Г.В. Шкуратов³, С.Х. Исаев⁴^{1,2,3,4} Брянский государственный аграрный университет; с. Кокино, Брянская область, Россия¹ kupreenkoai@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>² haf-iz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4912-9908>³ grigorsh696@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-9980-0101>⁴ samir.isaev.94@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6877-3128>

Аннотация. Прогнозирование теплотехнических характеристик воздушного солнечного коллектора, установленного на наружных стенах коровника, осуществлялось с применением математической модели, использующей линейную зависимость изменения температуры тепловоспринимающей поверхности в течение суток с учётом переменных факторов окружающей среды. В настоящих исследованиях предлагается применять квадратичную зависимость температуры окружающей среды от времени суток. Температура окружающей среды и плотность потока солнечной энергии, поступающего на вертикальную поверхность, в зависимости от времени суток отличаются для различных регионов страны, времён года, а также в пределах одного времени года. Целью исследований является установление данных зависимостей для условий Брянской области на основе материалов актинометрических наблюдений метеорологических станций с периодом не менее 5 лет. В рамках исследований измерялась прямая солнечная радиация, поступающая на перпендикулярную к солнечным лучам поверхность коровника. Получили уравнения для условий как ясного неба, так и средней облачности для срединного дня каждого месяца года, предполагая, что зависимости будут характерными для всех дней данного месяца. В результате исследований получены регрессионные зависимости, описывающие суточный ход температуры воздуха и интенсивность солнечной радиации для срединных месяцев времён года (январь, апрель, июль и октябрь). Полученные результаты позволяют повысить точность расчётов температуры тепловоспринимающей поверхности вентиляционно-отопительных панелей с учётом факторов окружающей среды и обеспечить прогнозирование теплотехнических характеристик системы естественной вентиляции коровника.

Ключевые слова: интенсивность солнечной радиации, поверхность коровника, суточный ход температуры, температура окружающей среды, плотность потока солнечной энергии, прогнозирование теплотехнических характеристик

Для цитирования: Купреенко А.И., Исаев Х.М., Шкуратов Г.В., Исаев С.Х. Прогнозирование теплотехнических характеристик системы естественной вентиляции коровника // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 10-15. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-10-15>.

ORIGINAL PAPER

Forecasting the thermal performance of the natural ventilation system used in a cowshed

A.I. Kupreenko¹, Kh.M. Isaev², G.V. Shkuratov³, S.Kh. Isaev⁴^{1,2,3,4} Bryansk State Agrarian University; Kokino village, Vygonichi district, Bryansk Region, Russia¹ kupreenkoai@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>² haf-iz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4912-9908>³ grigorsh696@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-9980-0101>⁴ samir.isaev.94@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6877-3128>

Abstract. To predict the thermal characteristics of an air solar collector mounted on the outer walls of the cowshed, the authors proposed a mathematical model based on the linear dependence of the change in the temperature of the heat-receiving surface during the day, taking into account variable environmental factors. The present study proposes to apply a quadratic dependence of the ambient temperature on the time of day. The ambient temperature and the flux density of solar energy reaching the vertical surface, depending on the time of day, differs for different regions of the country, seasons, as well as within the same season. The study aims to establish these dependences for the conditions of the Bryansk region based on the materials of actinometric observations of meteorological stations with a period of at least 5 years. The study measured direct solar radiation reaching the cowshed surface perpendicular to the sunlight. Equations were

obtained for both clear sky and medium cloudiness conditions for the middle day of each month of the year, assuming that the dependences would be characteristic of all days of a given month. As a result of the research, regression dependences describing the diurnal course of air temperature and solar radiation intensity for the median months of the seasons (January, April, July, and October) were obtained. The obtained results may help increase the accuracy of calculations of the temperature of the heat-receiving surface of ventilation and heating panels taking into account environmental factors and to provide forecasting of the thermal characteristics of the natural ventilation system of the cowshed.

Keywords: natural ventilation, solar radiation, heat-receiving surface of the solar collector, thermal balance

For citation: Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Shkuratov G.V., Isaev S.Kh. Forecasting the thermal performance of the natural ventilation system used in a cowshed. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):10-15. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-10-15>.

Введение. Основой микроклимата в помещениях крупного рогатого скота является естественная вентиляция, обеспечиваемая использованием различного типа штор, вентиляционных жалюзи, сдвигающихся панелей¹. Недостатками системы естественной вентиляции на основе этих устройств являются сложность конструкции, попадание пыли и птиц в помещение и опасность возникновения сквозняков. С целью устранения данных недостатков была предложена система естественной вентиляции коровников на основе вентиляционно-отопительных панелей – ряда вертикальных воздушных солнечных коллекторов, установленных на наружных стенах коровника [1].

Для прогнозирования теплотехнических характеристик воздушного солнечного коллектора была предложена математическая модель изменения температуры его тепловоспринимающей поверхности в течение суток с учётом переменных факторов окружающей среды [2]. Такая зависимость связывает параметры переменных внешних факторов с конструктивно-технологическими параметрами воздушного солнечного коллектора. Аналогичная модель успешно применялась по отношению к анализу теплового баланса комбинированного теплообменника сушилки аэродинамического подогрева [3-5].

Предложенная модель была уточнена в работе [6]. Однако сложность применения на практике математической модели теплового баланса воздушного солнечного коллектора заключается в том, что для расчёта необходимо знать две функциональные зависимости:

$$T_0(t) = a_0 t + b_0; \quad (1)$$

$$q_B(t) = at^2 + bt + c, \quad (2)$$

где $T_0(t)$ – температура окружающей среды в зависимости от времени суток, °C; $q_B(t)$ – плотность потока солнечной энергии, поступающего на вертикальную поверхность, в зависимости от времени суток, Вт/м²; a_0, b_0, a, b, c – эмпирические коэффициенты.

¹ Федоренко И.Я., Садов В.В. Ресурсосберегающие технологии и оборудование в животноводстве: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2012. 304 с.

Зависимости (1) и (2) будут отличаться для различных регионов страны, времён года, а также в пределах одного времени года.

Цель исследований: установление зависимостей температуры окружающей среды и плотности потока солнечной энергии от времени суток для условий Брянской области как при ясном небе, так и при средней облачности для срединного дня (15-е число, для февраля – 14-е) каждого месяца года, при предположении того, что данные зависимости будут характерными для всех дней данного месяца.

Материалы и методы. Для установления зависимостей воспользовались данными по солнечной радиации и суточной температуре^{2,3}. Данные получены на основе материалов актинометрических наблюдений метеорологических станций с периодом не менее 5 лет. В процессе наблюдений на станциях измерялась прямая (поступающая на перпендикулярную к солнечным лучам поверхность) и рассеянная (поступающая на горизонтальную поверхность со всех точек небесного свода после рассеяния в атмосфере) солнечная радиация.

От средних многолетних (при периоде осреднения 30 и более лет) данные по прямой солнечной радиации могут отличаться на 20%. Публикуемые величины по приходящей солнечной радиации практически могут быть распространены на близлежащие окрестности метеорологической станции в радиусе 50...100 км. Актинометрические наблюдения на станциях производились 5 раз в сутки в сроки: 6 ч 30 мин, 9 ч 30 мин, 12 ч 30 мин, 15 ч 30 мин, 18 ч 30 мин по среднему солнечному времени.

По данным прямой солнечной радиации можно рассчитать величину радиации, поступающей на вертикальные поверхности любой ориентации по формуле:

$$q_B = q \cdot \cosh_{\theta} \cos(A_{\theta} - A), \quad (3)$$

где q_B – прямая солнечная радиация, поступающая на вертикальную поверхность, Вт/м²; q – прямая солнечная радиация, поступающая на перпендикулярную

² Справочник по климату СССР. Вып. 28. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 60 с.

³ Справочник по климату СССР. Вып. 28. Ч. 2. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 236 с.

к солнечным лучам поверхность, Вт/м²; h_0 – высота солнца, град.; A_0 – азимут солнца, град.; A – азимут нормали к вертикальной поверхности, град.

Для условий Брянской области данные по прямой солнечной радиации q в условиях средней облачности примем на основании таблицы 3 «Интенсивность радиации, срочные наблюдения (кал/см²·мин)» справочника по климату⁴. Данные по прямой солнечной радиации S при ясном небе примем на основании таблицы 5 «Интенсивность радиации при ясном небе (кал/см²·мин)» этого же источника. В формуле (3) эти данные используем с учётом соотношения 1 кал/(см²·мин) = 698 Вт/м². Высоту солнца h_0 примем на основании таблицы 2 «Высота солнца на 15-е число месяца (град.)»⁴.

Азимут A вертикальной поверхности, ориентированной на юг, равен нулю.

Азимут солнца A_0 изменяется от 0 до 180° и определяется из формулы⁵:

$$\sin A_0 = \operatorname{sech}_0 \cos \delta \sin \omega, \quad (4)$$

где δ – склонение Солнца в данный день года, град.; ω – часовой угол Солнца, град.

Для расчётов склонение Солнца δ примем для среднего дня месяцев года⁴. Склонение Солнца δ имеет знак «+» для лета (от весеннего до осеннего равноденствия) и знак «-» в остальное время года.

Часовой угол Солнца ω в солнечный полдень равен нулю, в полночь – 180°, а 1 час соответствует 15°. При $\omega < 90^\circ$ он имеет знак «+», а при $\omega > 90^\circ$ – знак «-».

Использование выражений (3) и (4) и справочных данных позволит найти зависимость (2) для каждого месяца года как при ясном небе, так и в условиях средней облачности.

Для нахождения зависимости (1) воспользуемся данными таблицы 2 «Суточный ход температуры воздуха»⁶.

Результаты и их обсуждение. Результаты расчёта по формулам (3) и (4) значения величины солнечной радиации q_B , поступающей на вертикальную поверхность южной ориентации для условий Брянской области, представлены в таблице 1. Данные по суточному ходу температуры воздуха для условий Брянской области представлены в таблице 2.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что использование линейной зависимости (1) для построения регрессии будет достаточно грубым приближением. Более точно описывать суточный ход температуры будет полиномиальная зависимость второй степени в виде:

$$T_0(t) = a_0 t^2 + b_0 t + c_0, \quad (5)$$

где a_0, b_0, c_0 – эмпирические коэффициенты.

Тогда на основании [6] и с учётом уравнения (5) математическая модель изменения температуры

Таблица 1

Интенсивность солнечной радиации (Вт/м²) при средней облачности / ясном небе на 15-е число каждого месяца по результатам многолетних наблюдений⁴

Radiation intensity with medium cloudiness / clear sky (in W/m²) on the 15th day of each month based on the results of long-term observations⁴

Время суток	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
6 ч 30 мин	0/0	0/0	0/0	161/ 476	235/ 500	274/ 501	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
9 ч 30 мин	51/ 382	101/ 440	130/ 416	249/ 660	258/ 525	274/ 466	48/ 82	118/ 218	153/ 361	145/ 443	114/ 510	42/ 399
12 ч 30 мин	140/ 653	208/ 700	238/ 680	207/ 574	193/ 470	217/ 413	207/ 464	232/ 511	253/ 632	206/ 702	190/ 746	120/ 633
15 ч 30 мин	26/ 265	88/ 371	137/ 432	191/ 620	201/ 560	250/ 549	132/ 291	149/ 336	151/ 389	94/ 385	51/ 260	11/ 159
18 ч 30 мин	0/0	0/0	0/0	21/ 189	103/ 334	179/ 407	52/ 120	18/ 61	0/0	0/0	0/0	0/0

Таблица 2

Суточный ход температуры воздуха (°C) на 15-е число каждого месяца по результатам многолетних наблюдений⁶

Table 2

Daily variation of air temperature (in °C) on the 15th day of each month according to the results of long-term observations⁶

Время суток	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
6 ч 30 мин	-8,1	-8,6	-4,8	2,8	10,8	14,5	16,0	13,0	8,5	3,5	-1,0	-5,3
9 ч 30 мин	-7,8	-7,6	-3,2	5,9	14,7	18,5	20,5	18,2	13,3	6,0	-0,1	-5,0
12 ч 30 мин	-6,6	-5,8	-1,2	8,1	16,6	20,5	22,5	20,8	16,2	8,5	1,1	-4,3
15 ч 30 мин	-6,5	-5,5	-0,9	8,5	17,0	20,7	23,0	21,0	16,4	8,5	1,1	-4,6
18 ч 30 мин	-7,5	-6,6	-2,6	6,9	15,5	19,4	21,2	18,6	13,3	6,1	0,1	-5,0

⁴ Справочник по климату СССР. Вып. 28. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 60 с.

⁵ Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М.: Энергоатомиздат, 1991. 208 с.

⁶ Справочник по климату СССР. Вып. 28. Ч. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 236 с.

тепловоспринимающей поверхности вентиляционно-отопительной панели в течение суток будет иметь вид:

$$T = T(t) = (T_0 - T_*)e^{-\lambda t} + At^2 + Bt + T_* \quad (6)$$

где
$$T_* = \frac{K_4 - \frac{K_1}{K_5} \left(K_3 - 2K_1 \frac{K_2}{K_5} \right)}{K_5};$$

$$\lambda = \frac{K_5}{K_1}; \quad A = \frac{K_2}{K_5}; \quad B = \left(\frac{K_3}{K_5} - 2K_1 \frac{K_2}{K_5^2} \right).$$

$$K = kF + L_0 (C_c + 10^{-3} x C_0);$$

$$K_1 = MC; \quad K_2 = aF_s \varepsilon + a_0 K;$$

$$K_3 = bF_s \varepsilon + b_0 K; \quad K_4 = cF_s \varepsilon + (c_0 - b_1) K; \quad K_5 = a_1 K, \quad (7)$$

где T_0 – начальная температура тепловоспринимающей поверхности, К; k – коэффициент теплопередачи через ограждения коллектора, Вт/(м²·К); F – площадь ограждений коллектора, м²; L_0 – расход атмосферного воздуха, кг/с; C_c – теплоёмкость сухого воздуха, кДж/(кг·К); x – влагосодержание воздуха, г/кг; C_0 – теплоёмкость пара, кДж/(кг·К); M – масса тепловоспринимающей поверхности коллектора, кг; C – теплоёмкость материала тепловоспринимающей поверхности, кДж/(кг·К); F_s – площадь тепловоспринимающей поверхности коллектора, м²; ε – степень черноты поверхности; a_1, b_1 – эмпирические коэффициенты.

Общий вид модели по сравнению с предыдущей моделью [6] не изменился. Скорректированы только выражения коэффициентов K_2, K_3, K_4 .

На основании данных таблиц 1 и 2 получены регрессионные зависимости (табл. 3, 4). Для средних месяцев времён года: января, апреля, июля и октября – регрессионные зависимости представлены на рисунке.

Таблица 3

Регрессионные зависимости суточного хода температуры воздуха (°С) на 15-е число каждого месяца по результатам многолетних наблюдений⁷

Table 3

Regression dependences of the daily variation of air temperature (in °C) on the 15th day of each month based on the results of long-term observations⁷

Месяц Month	Уравнение регрессии Regression equation	Коэффициент детерминации Coefficient of determination R^2
I	$T_0 = -0,0294t^2 + 0,8175t - 12,401$	0,7781
II	$T_0 = -0,0452t^2 + 1,3343t - 15,616$	0,9143
III	$T_0 = -0,0659t^2 + 1,8702t - 14,439$	0,938
IV	$T_0 = -0,0889t^2 + 2,5822t - 10,349$	0,9938
V	$T_0 = -0,0976t^2 + 2,8305t - 3,4508$	0,9995
VI	$T_0 = -0,0984t^2 + 2,8603t + 0,1144$	0,999
VII	$T_0 = -0,1119t^2 + 3,2276t - 0,2058$	0,9984
VIII	$T_0 = -0,1397t^2 + 3,9587t - 6,8244$	0,9999
IX	$T_0 = -0,1468t^2 + 4,094t - 12,05$	0,9952
X	$T_0 = -0,0976t^2 + 2,6971t - 10,184$	0,9614
XI	$T_0 = -0,0397t^2 + 1,1054t - 6,6628$	0,9333
XII	$T_0 = -0,019t^2 + 0,5095t - 7,89$	0,8357

Таблица 4

Регрессионные зависимости интенсивности радиации (Вт/м²) при средней облачности и ясном небе на 15-е число каждого месяца по результатам многолетних наблюдений⁸

Table 4

Regression dependences of radiation intensity (W/m²) with medium cloudiness and clear sky on the 15th day of each month based on the results of long-term observations⁸

Месяц Month	Уравнение регрессии. Коэффициент детерминации / Regression equation. Coefficient of determination	
	При средней облачности / Under medium cloudiness	При ясном небе / With clear sky
I	$q_B = -2,8333t^2 + 70t - 337,89. R^2 = 0,681$	$q_B = -15,5t^2 + 383,6t - 1834,1. R^2 = 0,899$
II	$q_B = -4,8016t^2 + 119,61t - 579. R^2 = 0,8812$	$q_B = -17,548t^2 + 436,39t - 2095. R^2 = 0,959$
III	$q_B = -5,8968t^2 + 147,65t - 717,15. R^2 = 0,9547$	$q_B = -17,524t^2 + 438,63t - 2123,7. R^2 = 0,9807$
IV	$q_B = -3,8889t^2 + 85,956t - 231,01. R^2 = 0,9448$	$q_B = -8,7143t^2 + 197,39t - 445,12. R^2 = 0,8676$
V	$q_B = -1,3413t^2 + 22,832t + 146,32. R^2 = 0,88$	$q_B = -2,8333t^2 + 60,933t + 209,84. R^2 = 0,5932$
VI	$q_B = -0,4127t^2 + 3,1841t + 270,91. R^2 = 0,7172$	$q_B = -0,1984t^2 + 1,4603t + 483,52. R^2 = 0,0797$
VII	$q_B = -3,8889t^2 + 103,49t - 528,17. R^2 = 0,7736$	$q_B = -8,4206t^2 + 225,48t - 1159,8. R^2 = 0,7291$
VIII	$q_B = -5,5159t^2 + 140,13t - 687,09. R^2 = 0,9494$	$q_B = -11,54t^2 + 296,49t - 1470,2. R^2 = 0,9131$
IX	$q_B = -6,4286t^2 + 160,65t - 776,52. R^2 = 0,9729$	$q_B = -15,984t^2 + 400,54t - 1945,1. R^2 = 0,969$
X	$q_B = -5,1667t^2 + 127,47t - 604,04. R^2 = 0,9339$	$q_B = -17,714t^2 + 440,92t - 2118,8. R^2 = 0,965$
XI	$q_B = -4,3254t^2 + 106,03t - 500,74. R^2 = 0,8158$	$q_B = -17,952t^2 + 440,48t - 2074,5. R^2 = 0,8755$
XII	$q_B = -2,3254t^2 + 57,102t - 273,97. R^2 = 0,6047$	$q_B = -14,476t^2 + 353,9t - 1663,1. R^2 = 0,8074$

⁷ Справочник по климату СССР. Вып. 28. Ч. 2. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 236 с.

⁸ Справочник по климату СССР. Вып. 28. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 60 с.

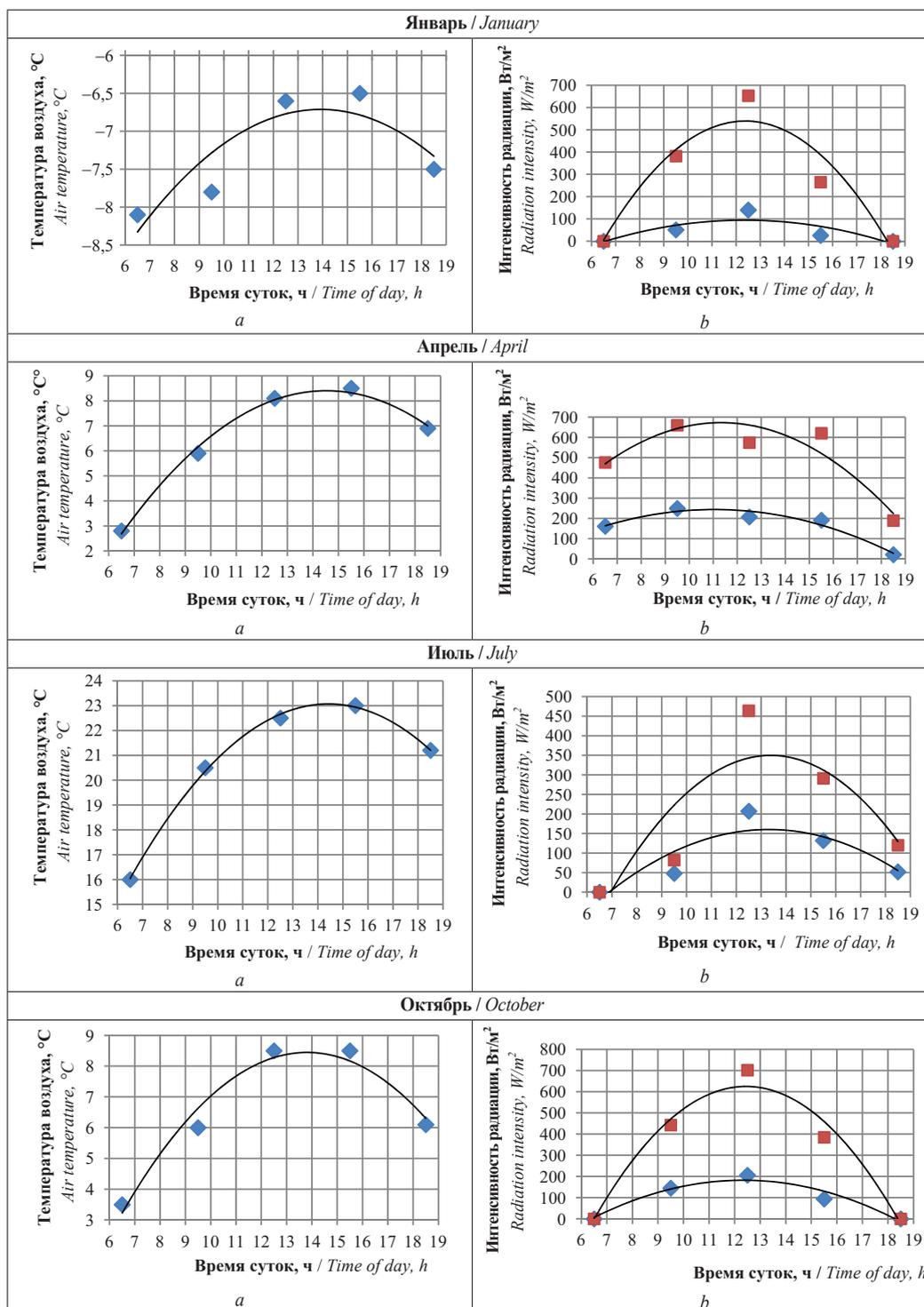


Рис. Суточный ход температуры (a) и интенсивность солнечной радиации (b) при средней облачности (■) и ясном небе (◆) для срединных месяцев

Fig. Daily variation of temperature (a) and solar radiation intensity (b) under medium cloudiness (■) and clear sky (◆) for the middle months

Коэффициент детерминации полиномиальной зависимости 2-й степени имеет достаточно большое значение (табл. 3, 4) (рис.).

По данным таблицы 3 определяются соответствующие коэффициенты a_0, b_0, c_0 зависимости (5). По данным таблицы 4 определяются соответствующие коэффициенты a, b, c зависимости (2).

Выводы

Установленные зависимости суточного хода температуры воздуха и поступления прямой радиации на вертикальную поверхность южной ориентации при средней облачности и ясном небе на 15-е число каждого месяца года позволяют получить необходимую исходную информацию

по параметрам окружающей среды для реализации уточнённой математической модели (6). Выходные теплотехнические характеристики вентиляционно-отопительных панелей системы естественной

вентиляции коровника могут быть определены как для благоприятных условий при ясном небе, так и для усреднённых погодных условий при средней облачности.

Список литературы

1. Исаев Х.М., Купреенко А.И., Исаев С.Х. Плодово-ягодная сушилка с комбинированным теплообменником // Сельский механизатор. 2020. № 1. С. 16-17. EDN: JYVENQ.
2. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Шкуратов Г.В. Тепловой баланс вентиляционно-отопительной панели // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016. № 4 (24). С. 24-26. EDN: WTRMEF.
3. Kupreenko A., Isaev K., Mikhailichenko S., Kuznetsov Y., Kravchenko I., Asonja A., Kalashnikova L. Heat balance of combined heat exchanger aerodynamic heating dryers. *Advanced Engineering Letters*. 2022;1(3):80-87. <https://doi.org/10.46793/adeletters.2022.1.3.2>
4. Комогорцев В.Ф., Купреенко А.И., Исаев Х.М. Определение температуры нагрева тепловоспринимающей поверхности гелиоколлектора // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2017. № 1 (16). С. 262-266. EDN: YNUJMB.
5. Купреенко А.И., Комогорцев В.Ф., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Тепловой баланс комбинированного теплообменника сушилки аэродинамического подогрева // Агроинженерия. 2020. № 6 (100). С. 66-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-6-66-73>
6. Шкуратов Г.В., Михайличенко С.М. Тепловой баланс воздушного солнечного коллектора в системе естественной вентиляции коровника // Инновационная техника и технология. 2022. Т. 9, № 3. С. 98-104. EDN: DILVBR.

Информация об авторах

- Алексей Иванович Купреенко**¹, д-р техн. наук, профессор, директор инженерно-технологического института; <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>; kupreenkoai@mail.ru
- Хафиз Мубариз-оглы Исаев**², канд. экон. наук, доцент, заведующий кафедрой технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств; <https://orcid.org/0000-0003-4912-9908>; haf-iz@mail.ru
- Григорий Вячеславович Шкуратов**³, преподаватель СПО; <https://orcid.org/0009-0000-9980-0101>; grigorsh696@gmail.com
- Самир Хафизович Исаев**⁴, канд. техн. наук, доцент кафедры технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств; <https://orcid.org/0000-0002-6877-3128>; samir.isaev.94@inbox.ru
- ^{1,2,3,4} Брянский государственный аграрный университет; 243365, Россия, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, 2а

Вклад авторов

- А.И. Купреенко – концептуализация, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование
Х.М. Исаев – формальный анализ.
Г.В. Шкуратов – ресурсы.
С.Х. Исаев – формальный анализ, визуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 25.05.2023, после рецензирования и доработки 21.06.2023; принята к публикации 21.06.2023

References

1. Isaev Kh.M., Kupreenko A.I., Isaev S.Kh. Fruit and berry dryer with a combined heat exchanger. *Selskiy Mehanizator*. 2020;1:16-17. (In Rus.)
2. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Shkuratov G.V. The ventilation-and-heating panel's heat balance. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2016;4:24-26. (In Rus.)
3. Kupreenko A., Isaev K., Mikhailichenko S., Kuznetsov Y., Kravchenko I., Asonja A., Kalashnikova L. Heat balance of combined heat exchanger aerodynamic heating dryers. *Advanced Engineering Letters*. 2022;1(3):80-87. <https://doi.org/10.46793/adeletters.2022.1.3.2>
4. Komogortsev V.F., Kupreenko A.I., Isaev Kh.M. Determination of heating temperature of a helium collector's heat receiving surface. *Konstruirovaniye, Ispolzovaniye i Nadezhnost Mashin Selskhozaystvennogo Naznacheniya*. 2017;1:262-266. (In Rus.)
5. Kupreenko A.I., Komogortsev V.F., Isaev Kh.M., Isaev S.Kh. Heat balance of combined heat exchanger used in aerodynamic heating dryers. *Agricultural Engineering*. 2020;6(100):66-73. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-6-66-73>
6. Shkuratov G.V., Mihaylichenko S.M. Thermal balance of the air solar collector in the natural ventilation system of a cowshed. *Innovative Machinery and Technology*. 2022;9(3):98-104. (In Rus.)

Information about the authors

- Aleksei I. Kupreenko**¹, DSc (Eng), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-3781-9592>; kupreenkoai@mail.ru
- Khafiz M. Isaev**², CSc (Econ), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0003-4912-9908>; haf-iz@mail.ru
- Grigoriy V. Shkuratov**³, Lecturer; <https://orcid.org/0009-0000-9980-0101>; grigorsh696@gmail.com
- Samir Kh. Isaev**⁴, CSc (Eng), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0002-6877-3128>; samir.isaev.94@inbox.ru
- ^{1,2,3,4} Bryansk State Agrarian University; 2a, Sovetskaya Str., Kokino village, Vygonichi district, Bryansk Region, 243365, Russia

Contribution of the authors

- A.I. Kupreenko – conceptualisation, draft finalizing and editing
H.M. Isaev – formal analysis
G.V. Shkuratov – resources.
S.H. Isaev – formal analysis, visualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 25.05.2023; revised 21.06.2023; accepted 21.06.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-16-23>

Математическая модель очистки кожного покрова коров для повышения интенсивности теплового обмена при тепловых стрессах

Ю.Г. Иванов¹, Д.А. Понизовкин², Ж.Б. Жумагулов³, А.М. Мошонкин⁴^{1,2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия³ Казахский национальный аграрный исследовательский университет; г. Алматы, Казахстан¹ iy.electro@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>² ponizovkin.d@gmail.com³ zhandos.79@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1813-902X>⁴ a.moshonkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>

Аннотация. Автоматические щёточные устройства, улучшающие санитарно-гигиеническое состояние кожного покрова животных и создающие комфортные условия, получают широкое распространение в современных молочных фермах. С целью проверки разработанной математической модели очистки кожного покрова коров на молочной ферме проведены экспериментальные исследования на 10 животных. На боковой поверхности каждого животного выбирались три зоны площадью 10×10 см²: первый участок не очищался; второй участок очищался «сухим способом» с помощью щётки; третий подвергался «влажной» очистке щёткой с моющим средством (мыльный раствор). Температура участков кожного покрова определялась в течение 15 мин бесконтактным способом с использованием пирометра. Результаты исследований подтвердили влияние очистки кожного покрова на интенсивность теплообмена животных за счёт повышения конвекции и испарения при тепловых стрессах. Установлено, что наиболее эффективна влажная очистка, при которой температура кожного покрова за счёт увеличения теплоотдачи испарением снижается на $4,1^\circ\text{C}$, тогда как после сухой очистки она составляет $0,7^\circ\text{C}$. Разработанная математическая модель очистки кожного покрова коров устанавливает соотношение между параметрами воздействия ворса щётки на загрязнённую поверхность кожи, щёточного устройства и режимов очистки. Полученные зависимости позволяют определить технические требования и рациональные конструктивно-режимные параметры щёточного устройства для создания автоматической станции очистки кожного покрова коров на фермах.

Ключевые слова: математическая модель, тепловой стресс, коровы, автоматическая щётка, интенсивность теплового обмена, температура кожного покрова, очистка кожного покрова коров, влажная очистка, параметры щёточного устройства

Финансирование: Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030» (Соглашение № 075-15-2023-220 от 16.02.2023).

Для цитирования: Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Жумагулов Ж.Б., Мошонкин А.М. Математическая модель очистки кожного покрова коров для повышения интенсивности теплового обмена при тепловых стрессах // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 16-23. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-16-23>.

ORIGINAL PAPER

Mathematical model of cow skin cleaning used to increase heat exchange intensity under heat stresses

Yu.G. Ivanov¹, D.A. Ponizovkin², Zh.B. Zhumagulov³, A.M. Moshonkin⁴^{1,2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ Kazakh National Agrarian Research University; Almaty, Kazakhstan¹ iy.electro@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>² ponizovkin.d@gmail.com³ zhandos.79@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1813-902X>⁴ a.moshonkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>

Abstract. Automatic brushing devices that improve the sanitary-hygienic condition of animal skin and create comfortable conditions are becoming widespread in modern dairy farms. To verify the developed mathematical

model of cow skin cleaning, the authors carried out experimental studies on ten animals on a dairy farm. On the lateral surface of each animal three zones with the area of $10 \times 10 \text{ cm}^2$ were selected: the first area was not cleaned; the second area was cleaned “dry” with a brush; the third area was subjected to “wet” cleaning with a brush and detergent (soap solution). The temperature of the skin areas was determined for 15 minutes by the non-contact method using a pyrometer. The study results confirmed the effect of skin cleaning on the intensity of animal heat exchange due to increased convection and evaporation under heat stress. It was found that wet cleaning is the most effective method, when the skin temperature decreases by 4.1°C due to the increase in heat transfer by evaporation, while after dry cleaning it is 0.7°C . The developed mathematical model of cow skin cleaning establishes the relationship between the parameters of the brush bristle impact on the contaminated skin surface, the brush device and cleaning modes. The received dependences determine technical requirements and rational design and mode parameters of the brushing device to develop an automatic station of cow skin cleaning on farms.

Keywords: mathematical model, heat stress, cows, automatic brushing, heat exchange intensity, skin cover temperature, cleaning of cow skin, wet cleaning, brushing device parameters

Funding: The work was carried out with the funds of the University Development Programme within the framework of the Strategic Academic Leadership Programme “Priority – 2030” (Agreement No. 075-15-2023-220 dated 16.02.2023).

For citation: Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Zhumagulov Zh.B., Moshonkin A.M. Mathematical model of cow skin cleaning used to increase heat exchange intensity under heat stresses. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):16-23. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-16-23>.

Введение. Главной причиной экономических потерь в животноводстве в условиях повышенных температур является снижение адаптивных способностей организма в поддержании температурного баланса тела и толерантности к тепловому стрессу [1-4]. Установлено, что при повышении температуры с 25 до 30°C в коровнике на 400 коров потери молока по причине тепловых стрессов за один летний месяц составляют около 100 т [5].

Улучшить теплообмен животных с окружающей средой и снизить стресс позволяет применение систем местной вентиляции с управлением параметрами потока воздуха, воздействующего на кожный покров, систем мелкодисперсного распыления воды и систем дозированного опрыскивания водой кожного покрова животных [6-9]. При отлаженных режимах работы эти методы и технические средства достаточно эффективны и заслуживают широкого применения [9, 10].

Тенденция роста климатических температур^{1,2} указывает на необходимость совершенствования методов и средств с целью предотвращения тепловых стрессов.

В коровниках наряду с системами вентиляции и распыления воды снижению тепловых стрессов у животных способствует применение автоматических щеток. Массаж и сухая очистка кожного и волосяного покрова положительно влияют на кровообращение и способствуют увеличению надоев. Удаление

из шкуры вшей, клещей и других паразитов улучшает общее состояние здоровья, приводит к снижению расходов на лечение и снижению вынужденных забоев³. По данным компании DeLaval, заболевание клиническим маститом сократилось более чем на 30% среди коров второй и последующих лактаций, содержащихся в коровниках, оснащенных щётками SCB [11].

Установлено положительное влияние очистки кожного покрова на повышение теплообмена коровы с окружающей средой [5]. Учитывая, что интенсивность теплообмена является функцией площади поверхности тела животного, целесообразно очистку кожного покрова проводить на большей части поверхности тела животного. Представляет интерес организация на фермах специальной процедуры очистки кожного покрова коров на основе создания автоматической станции с применением щёточного устройства.

Цель исследований: разработка математической модели очистки кожного покрова коров щёточным устройством для автоматических станций, обеспечивающих повышение интенсивности теплоотдачи и снижение тепловых стрессов животных на фермах.

Материалы и методы. Разработка математической модели очистки кожного покрова коров позволит определить технические требования и рациональные конструктивно-режимные параметры щёточного устройства.

Экспериментальные исследования проведены на молочной ферме РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

³ Трухачев В.И., Капустин И.В., Атанов И.В. Техника и технологии в животноводстве: учебник. СПб.: Лань, 2022. 440 с.

¹ Обобщающий доклад МГЭИК по изменению климата 2023. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/press/IPCC_AR6_SYR_PressRelease_ru.pdf (дата обращения: 30.08.2023).

² Росгидромет сообщил, что в РФ климат теплеет в 2,5 раза быстрее, чем на Земле в целом. URL: <https://www.interfax.ru/russia/867184> (дата обращения: 30.08.2023).

Рассмотрим математическую модель очистки кожного покрова коров устройством, представляющим собой автоматическую щётку с приводом от электродвигателя, с контролем частоты вращения.

Эффективность ($K_э$) очистки кожного покрова от загрязнений можно представить функцией четырех групп переменных: параметров кожного покрова ($M_{кп}$); параметров щёточного устройства ($M_{щч}$); режимов очистки ($M_{ро}$); параметров загрязнения ($M_з$):

$$K_э = \{M_{кп}, M_{щч}, M_{ро}, M_з\}. \tag{1}$$

При этом

$$M_{кп} = \{F_{пов}, L_{вп}, d_{вп}, S_{вп}, E_c, K_{сф}, K_{сн}\}, \tag{2}$$

где $F_{пов}$ – площадь очищаемой поверхности кожного покрова, m^2 ; $L_{вп}$ – длина волоса, mm ; $d_{вп}$ – диаметр волоса, mm ; $S_{вп}$ – расстояние между волосами, mm ; E_c – модуль упругости кожного покрова, $кгс/mm^2$; $K_{сф}$ – коэффициент, учитывающий форму кожного покрова; $K_{сн}$ – коэффициент, учитывающий шероховатость и неровности (складки) на поверхности кожного покрова.

$$M_{щч} = \{D_{щ}, l_b, d_b, n_n, B_b, N_{пр}, \omega\}, \tag{3}$$

где $D_{щ}$ – диаметр щётки, mm ; l_b – длина ворса, mm ; d_b – диаметр ворса щётки, mm ; n_n – количество ворсинок в пучке; B_b – модуль относительной жёсткости пучка ворсинок, $кгс \cdot см$; $N_{пр}$ – мощность привода щёточного устройства, $Вт$; ω – угловая скорость вращения щётки, $рад/с$.

$$M_{ро} = \{t_c, P_{оу}, t_{со}, v_{щч}, K_{щч}, K_{пб}\}, \tag{4}$$

где t_c – продолжительность очистки поверхности кожного покрова, $с$; $P_{оу}$ – окружное усилие, $Н$; $t_{со}$ – продолжительность очистки основания кожного покрова, $с$; $v_{щч}$ – линейная скорость щётки, $см/с$; $K_{щч}$ – коэффициент интенсивности механических воздействий пучков ворса на единицу длины кожного покрова; $K_{пб}$ – коэффициент, учитывающий расположение пучков ворса на барабане щётки.

$$M_з = \{m_з, K_{зп}, K_{за}, K_{зп}\}, \tag{5}$$

где $m_з$ – масса загрязнения, $г$; $K_{зп}$, $K_{за}$, $K_{зп}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно физико-механические свойства материала загрязнения, агрегатное состояние материала загрязнения и площадь загрязнения кожного покрова.

В общем виде процесс очистки кожного покрова коров можно описать множеством параметров:

$$K_э = \{F_{пов}, L_{вп}, d_{вп}, S_{вп}, E_{вп}, K_{сф}, K_{сн}, D_{щ}, l_b, d_b, n_n, B_b, N_{пр}, \omega, t_c, P_{оу}, t_{со}, v_{щч}, K_{щч}, K_{пб}, m_з, K_{зп}, K_{за}, K_{зп}\}. \tag{6}$$

Схема воздействия щёточного устройства на кожный покров животного представлена на рисунке 1.

Очистка кожного покрова от загрязнений происходит под воздействием пучка ворса жёсткостью B_n , связанной с жёсткостью отдельной ворсинки выражением:

$$B_n = \frac{K_n \cdot E \cdot J \cdot n_n}{\lambda_n}, \tag{7}$$

где K_n – поправочный коэффициент, определённый экспериментальным путем ($K_n = 0,92...0,98$ для пучков с числом ворсинок от 10 до 20; $K_n = 0,80...0,90$ для пучков с числом ворсинок от 20 до 40; $K_n = 0,50...0,70$ для плотных пучков с числом ворсинок от 100 и больше); E – модуль упругости материала ворса, $Мпа$; J – момент инерции поперечного сечения ворса, $см^4$; n_n – число ворсинок в пучке; λ_n – гибкость отдельной ворсинки.

$$\lambda = \frac{\mu \cdot L}{r_{min}}, \tag{8}$$

где λ – гибкость стержня; L – длина стержня, $м$; r_{min} – минимальный радиус инерции стержня, $м$; μ – коэффициент, учитывающий способ заделки стержня.

Если в зоне контакта ворса с кожей находится несколько пучков N_n , то их жёсткость B_{nn} суммируется:

$$B_{nn} = \frac{K_n \cdot E \cdot J \cdot n_n \cdot N_n}{\lambda_n}. \tag{9}$$

Воздействие ворса щёток на кожный покров коровы может быть как положительным, то есть достаточным для удаления загрязнений, так и отрицательным,

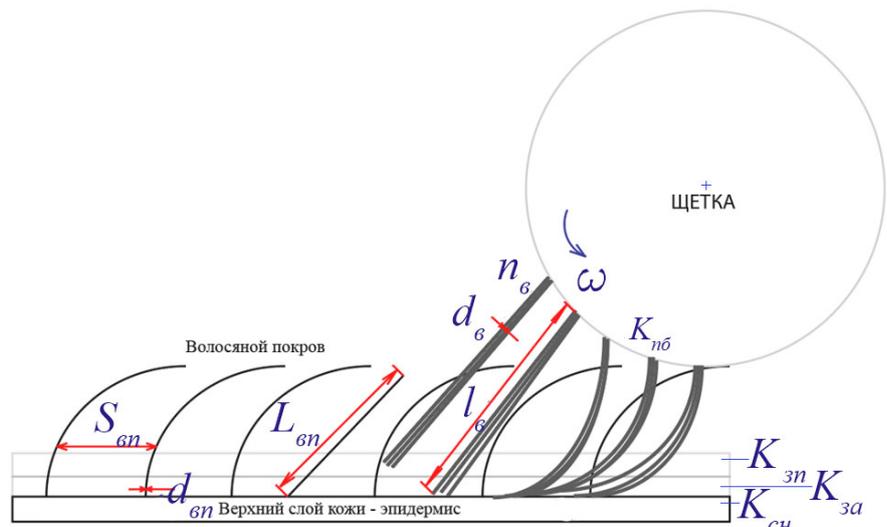


Рис. 1. Воздействие щёточного устройства на кожный покров
Fig. 1. Impact of the brushing device on the skin

вызывающим повреждение поверхности кожи и болевые ощущения.

Степень воздействия щёток на кожный покров зависит от интенсивности механических воздействий пучков ворса щётки на поверхность кожи.

Интенсивность воздействий щёток на кожный покров зависит от окружной скорости щётки (v_k), линейной скорости (v_m) перемещения щёточного устройства вдоль кожного покрова, частоты вращения щёток ($n_{щ}$), количества пучков ворса по окружности щёток (Z_0) и направления его движения.

Интенсивность механических воздействий щёток $K_{щн}$ на кожный покров можно представить как отношение окружной скорости щётки (v_k) к линейной скорости (v_m) перемещения щёточного устройства вдоль кожного покрова. С учётом того, что движение щёток вдоль тела животного может совпадать с направлением вращения пучков ворса и быть противоположным такому движению, выражение будет иметь вид:

$$K_{щн} = \frac{v_k \pm v_m}{v_m}. \quad (10)$$

С учётом параметров устройства и режимов очистки

$$K_{щн} = \frac{\left[\frac{\pi n}{30} \left(\frac{d_6}{2} + l_b \right) t_c + L_{пов} \right]}{L_{пов}}, \quad (11)$$

где d_6 – диаметр вала щётки, м; l_b – длина ворса, м; $L_{пов}$ – длина очищаемой поверхности кожного покрова, м.

Поскольку линейная скорость (v_m) щётки значительно меньше окружной скорости (v_k) и составляет 1,5...4,0%, в приближенных расчётах абсолютную скорость допустимо принимать равной окружной скорости.

За один оборот щётка столько раз воздействует на кожный покров, сколько пучков ворса размещено на ее окружности. Их количество зависит от шага пучков ($a_{щ}$), который равен расстоянию (мм) между осями кончиков двух смежных пучков ворса. За время одного оборота щётка переместится на расстояние ($\Delta L_{пов}$, мм), которое является подачей на один оборот:

$$\Delta L_{пов} = 1000 \cdot v_m \cdot t_{об} = 1000 \cdot v_m \cdot \frac{60}{n_{щ}}, \frac{\text{мм}}{\text{об}}. \quad (12)$$

где $t_{об}$ – время одного оборота щётки, мин; $n_{щ}$ – частота вращения щётки, мин.

Поскольку длина окружности щётки равна $\pi D_{щ}$, при шаге $a_{щ}$ число пучков ворса можно определить из выражения:

$$Z_0 = 2\pi \frac{\left(\frac{d_6}{2} + l_b \right)}{a_{щ}}. \quad (13)$$

Важным параметром интенсивности воздействия щётки на кожный покров животного является подача на один пучок ворса $\Delta L_{п}$, соответствующая повороту щётки на один угловой шаг пучков ворса. Подача на один пучок $\Delta L_{п}$ показывает величину перемещения центра щётки (манипулятора) за время её поворота на угол, соответствующий одному шагу $a_{щ}$. Кроме того, подача на один пучок ворса показывает, через какое расстояние (шаг) будет наноситься очередной удар пучком ворса по поверхности кожи.

Подача на пучок ворса $\Delta L_{п}$ показывает, через какое расстояние (шаг) будет наноситься очередной удар пучком ворса по эпидермису кожи:

$$\Delta L_{п} = \frac{\Delta L_{пов}}{Z_0} = \frac{6000 \cdot v_m}{a_{щ} \cdot Z_0}, \text{ мм}. \quad (14)$$

Эмпирически установлено, что для применяемой жёсткости пучков ворса $\Delta L_{п}$ должен находиться в пределах 2,0...3,0 уд/мм.

По причине воздействий соседних пучков на участке $\Delta L_{п}/2$ частота дискретизации будет увеличена в два раза.

Щёточное устройство, воздействуя на загрязнения кожи, не должно оставлять пропусков, повреждать кожный покров и забиваться загрязнениями. Пучок ворса может смачиваться жидкостью, поданной на него через форсунку. При этом нужно учитывать последующую необходимость захвата, накопления и переноса воды пучком ворса.

Шаг пучков ($b_{п}$, мм) ворса по длине барабана можно представить как

$$b_{п} = d_{п} + 2\Delta b = d_{п} + 2l_b \cdot \text{tg}\gamma. \quad (15)$$

Очевидно, что жёсткость пучка по сечению не является одинаковой. В центре плотность ворсинок и, следовательно, жёсткость, выше, а к периферии она снижается. Поэтому с целью более равномерного воздействия щётки на поверхность кожи целесообразно расстановку пучков на барабане по рядам сделать со сдвигом на полшага – так, как показано на рисунке 3.

Шаг пучков по окружности развертки барабана a_6 определяется из условия:

$$\frac{\pi D_{щ}}{a_{щ}} = \frac{\pi d_6}{a_6},$$

где $D_{щ}$ – диаметр щётки, мм. Отсюда $a_6 = \frac{a_{щ} d_6}{D_{щ}}$, мм.

Подставляя $a_{щ}$ из выражения (12), шаг пучков ворса через параметры щётки можно выразить следующим образом:

$$a_6 = 2\pi \left(\frac{d_6}{2} + l_b \right) \cdot \frac{d_6}{Z_0 D_{щ}}, \text{ мм} \quad (16)$$

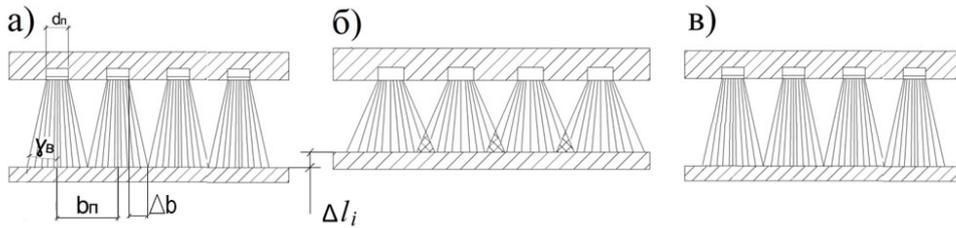


Рис. 2. Размещение пучков ворса на барабане при ударе ворса о кожу (а), движении по коже (б), отбрасывании загрязнений (в):

\$b_n\$ – шаг пучков; \$\gamma_b\$ – угол отклонения ворса; \$d_n\$ – диаметр пучка в месте крепления; \$\Delta b\$ – расстояние расхождения пучка; \$\Delta l_i\$ – изменение длины пучка при движении по коже

Fig. 2. Placement of bristle bundles on the drum when the lint strikes the skin (a), moves along the skin (b), throws off contaminants (c):

\$b_n\$ – bundle pitch; \$\gamma_b\$ – angle of bristle deflection; \$d_n\$ – bundle diameter at the attachment point; \$\Delta b\$ – distance of bundle divergence; \$\Delta l_i\$ – change of bundle length during its movement along the skin

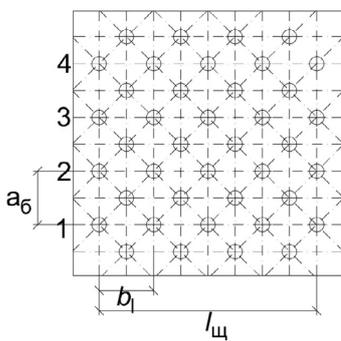


Рис. 3. Поле пучков ворса щётки
Fig. 3. Field of brush bristle bundles

При изготовлении барабана щётки отверстия для размещения пучков ворса следует высверливать по его окружности через угол \$\varphi_{щ}\$, равный

$$\varphi_{щ} = \frac{360^0}{Z_0}, \text{ град.}$$

Конвективный теплообмен между коровой и окружающей средой коровника зависит от коэффициента теплоотдачи, который в свою очередь зависит от степени загрязнения кожного покрова жиром-потовыми отложениями и загрязнениями волосяного покрова, создающими теплоизоляцию. Учитывая особенности теплообмена между животным и окружающей средой, рассмотрим Закон Ньютона-Рихмана с учётом модели теплообмена чистой кожи с окружающей средой через разделяющую сплошную стенку загрязнений, то есть

$$q = k \cdot (t_{п.к.} - t_{oc}) F_{кп}, \text{ Вт}, \tag{17}$$

где \$q\$ – тепловой поток, Вт; \$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{загр}}{\lambda_{загр}}}\$ или

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R_{загр}} \text{ – коэффициент теплопередачи, Вт/м}^2 \cdot \text{К;}$$

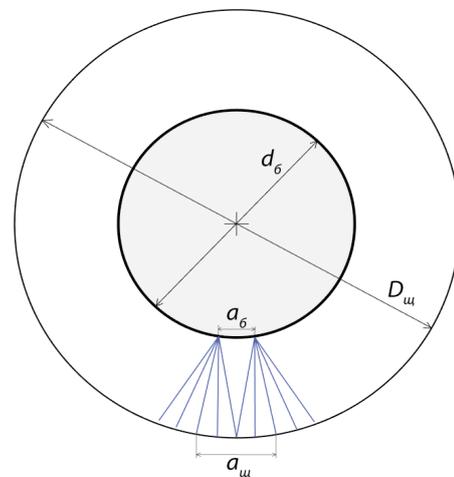


Рис. 4. Поперечный разрез щётки
Fig. 4. Cross section of the brush

\$\alpha\$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности коровы, Вт/м²·К; \$\delta_{загр}\$ – толщина слоя загрязнения, м; \$\lambda_{загр}\$ – теплопроводность слоя загрязнения, Вт/м·К; \$R_{загр}\$ – коэффициент сопротивления теплопередаче, м²·К/Вт; \$t_{п.к.}\$ – температура поверхности кожи, °С; \$t_{oc}\$ – температура окружающей среды, °С; \$F_{кп}\$ – площадь поверхности кожного покрова животного, м².

В предлагаемой модели сопротивление теплопередаче слоя загрязнения \$R_{загр}\$ выделяется в отдельный фактор.

Учитывая отсутствие или проведение очистки кожного покрова коров, а также способ очистки, можно говорить, что при тепловом обмене между коровой и окружающей средой коэффициент теплоотдачи будет различным:

$$q_{бо} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R_{загр.бо}} \cdot (t_{п.к.} - t_{oc}); \tag{18}$$

$$q_{со} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R_{загр.со}} \cdot (t_{п.к.} - t_{oc}) F_{кп}; \tag{19}$$

$$q_{\text{во}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R_{\text{загр.во}}} \cdot (t_{\text{п.к.}} - t_{\text{ос}}) F_{\text{кп}}, \quad (20)$$

где $q_{\text{бо}}, q_{\text{со}}, q_{\text{во}}$ – тепловой поток, соответственно, с неочищенной поверхности кожи, после сухой и влажной очистки, Вт; $R_{\text{загр.бо}}, R_{\text{загр.со}}, R_{\text{загр.во}}$ – коэффициент сопротивления теплопередаче, соответственно, с неочищенной поверхности кожи, после сухой и влажной очистки, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Экспериментальные данные показали, что при различных способах очистки между коэффициентами теплопередачи имеется зависимость:

$$k_{\text{во}} > k_{\text{со}} > k_{\text{бо}}. \quad (21)$$

Рассматривая процесс испарения, необходимо учитывать испарение влаги с поверхности кожи, а также испарение влаги при дыхании.

Количество теплоты, которое расходуется на нагревание выдыхаемого воздуха, можно определить как

$$Q_{\text{дых}} = V_{\text{лв}} \rho_{\text{вд}} C_p (t_{\text{выдох}} - t_{\text{вдох}}), \quad (22)$$

где $V_{\text{лв}}$ – лёгочная вентиляция, $\text{м}^3/\text{с}$; $\rho_{\text{вд}}$ – плотность выдыхаемого влажного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p – удельная теплоёмкость выдыхаемого воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$; $t_{\text{выдох}}$ – температура выдыхаемого воздуха, °C ; $t_{\text{вдох}}$ – температура вдыхаемого воздуха, °C .

Количество теплоты, которое отдаётся животным в окружающую среду при испарении влаги, находящейся на поверхности кожи, определяется как

$$Q_{\text{исп}} = G_{\text{п}} r_{\text{п}} + G_{\text{ж}} r_{\text{ж}}, \quad (23)$$

где $G_{\text{п}}$ и $G_{\text{ж}}$ – количество жидкости при потоотделении и внешнем попадании жидкости на кожу животного, $\text{кг}/\text{с}$; $r_{\text{п}}$ и $r_{\text{ж}}$ – удельная теплота парообразования пота и жидкости, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Интенсивность испарения зависит от типа жидкости, её температуры, площади поверхности, с которой испаряется жидкость, скорости потока воздуха.

Можно утверждать, что теплообмен через испарение является функцией нескольких переменных:

$$q_{\text{исп}} = (G_{\text{п}}, r_{\text{п}}, t_{\text{п}}, G_{\text{ж}}, r_{\text{ж}}, t_{\text{ж}}, R_{\text{загр}}, F'_{\text{кп}}, v_{\text{в}}), \quad (24)$$

где $t_{\text{п}}$ – температура пота, выделяемого коровой, °C ; $t_{\text{ж}}$ – температура жидкости, которая попадает при внешним воздействию, °C ; $R_{\text{загр}}$ – термическое сопротивление загрязнения на поверхности кожного покрова, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $F'_{\text{кп}}$ – площадь поверхности кожи, участвующая в процессе испарения, м^2 ; $v_{\text{в}}$ – скорость воздушного потока, воздействующего на площадь испарения, $\text{м}/\text{с}$.

Очистка кожного покрова коров, особенно влажная, создаёт дополнительные возможности для терморегуляции организма за счёт более интенсивного охлаждения подкожной периферийной кровеносной системы

и способствуют повышению теплоотдачи конвекцией. Вместе с тем при очистке кожного покрова освобождаются протоки потовых желез, повышается потовыделение и соответственно увеличивается испарение пота, интенсивнее охлаждается кожный покров и повышается интенсивность теплообмена животного испарением.

Повышение эффективности теплоотдачи испарением с очищенного кожного покрова коровы можно выразить математически.

Результаты и их обсуждение. Экспериментальные исследования показали, что температура кожного покрова зависит от способа его очистки.

Исследование проведено на 10 животных. На боковой поверхности каждого животного выбрано три зоны площадью $10 \times 10 \text{ см}^2$. Критерием выбора участков кожного покрова является отсутствие значительных колебаний (не более 2% – $0,7 \text{°C}$) температуры кожного покрова. Температура каждого участка кожного покрова наблюдалась в течение 15 мин и определялась бесконтактным способом с использованием пирометра. Промежуток в 15 мин позволяет избежать влияния водоиспарительного охлаждения с поверхности кожи при влажной очистке. До очистки кожного покрова температура на трёх участках не различалась.

Далее в трёх зонах определялась температура кожного покрова коровы при различных способах очистки: зона 1 – не очищалась; зона 2 – очищалась сухим способом с помощью щётки; зона 3 – влажная очистка щёткой с моющим средством (мыльный раствор) (рис. 5).

Исследования проводились при температуре воздуха окружающей среды $23,2 \text{°C}$, атмосферном давлении 746 мм. рт.ст., относительной влажности воздуха 58,4%, скорости воздуха $0,25 \text{ м}/\text{с}$.

Можно сделать вывод о том, что для улучшения теплообмена наиболее эффективной является влажная очистка кожного покрова. Зона 3 имеет

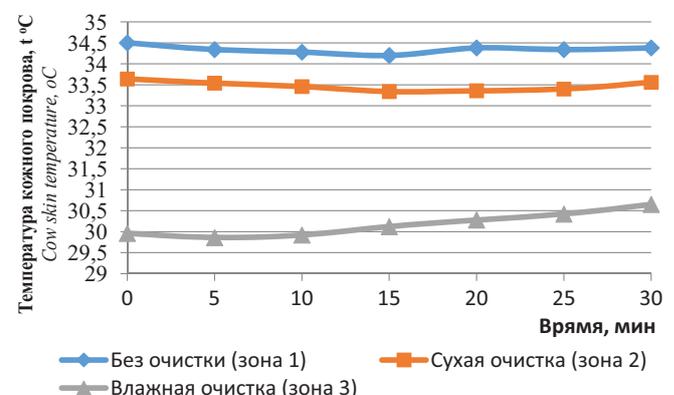


Рис. 5. Изменение температуры кожного покрова коровы при различных способах очистки

Fig. 5. Change in cow skin temperature with different cleaning methods

температуру в среднем на 4,1^oC меньше, тогда как после сухой очистки разница составила 0,71^oC, что подтверждает увеличение теплоотдачи испарением после влажной очистки поверхности кожи и, соответственно, пор потовых желез.

Выводы

1. Наиболее эффективной является влажная очистка кожного покрова коров. Ввиду увеличения

теплоотдачи испарением при очистке пор потовой железы температура кожного покрова снижается на 4,1^oC. После сухой очистки температура снижается на 0,7^oC.

2. Разработанная математическая модель очистки кожного покрова коров устанавливает зависимость между способом очистки кожного покрова коров щётчным устройством и интенсивностью теплового обмена животного с окружающей средой.

Список литературы

1. Буряков Н.П., Бурякова М.А., Алешин Д.Е. Тепловой стресс и особенности кормления молочного скота // Российский ветеринарный журнал. Сельскохозяйственные животные. 2016. № 3. С. 5-13. EDN: WITNHF.
2. Armstrong D.V. Heat stress interaction with shade and cooling. *Journal of Dairy Science*. 1994;77(7):2044-2050. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77149-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6)
3. Zimbelman R.B., Collier R. Feeding strategies for high-producing dairy cows during periods of elevated heat and humidity. *Proc. 20th Annual Tri-State Dairy Nutrition Conference*. Fort Wayne, USA. 2011. April 19 and 20. Pp. 111-126.
4. St-Pierre N.R., Cobanov B., Schnitkey G. Economic losses from heat stress by US Zivestock Industires. *Journal of Dairy Science*. 2003;86: Supplement: E52-E77. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74040-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5)
5. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Борулько В.Г. Методы и технические средства снижения тепловых стрессов коров в теплый период года // *British Journal of Innovation in Science and Technology*. 2017. Т. 2, № 2. С. 41-52. EDN: ZBARKB.
6. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А. Энергосберегающая система принудительной вентиляции коровника для летнего периода времени // Труды Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». 2014. Т. 3. С. 104-105. EDN: SNLZZH.
7. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А. Обоснование параметров принудительной вентиляции на молочной ферме для летнего периода времени // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2013. № 3 (11). С. 173-175. EDN: RCKAMD.
8. Борулько В.Г., Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Шлычкова Н.А., Костомакхин Н.М. Математическое моделирование процессов теплообмена в коровнике для теплого периода // Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. 2021. № 4 (338). С. 37-42. EDN: FPOSVQ.
9. Ivanov Yu.G., Baimukanov D.A., Borulko V.G., Ponzovkin D.A., Dzhanabekova G.K. Influence of cow skin cleaning on physiological parameters under heat stresses in warm season. *Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2020;4(386):100-108. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1467.109>
10. Хлопко Ю.А., Нигматов Л.Г. Обоснование механической обработки кожного покрова крупного рогатого скота // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. № 3 (41). С. 99-103 EDN: QJCGKB.
11. Schukken Y.H., Young G.D. Cow comfort effects on milk production and mastitis: a field study. *International Dairy Topics*. 2009;9(1):23. <http://www.positiveaction.info/pdfs/articles/dt9.1p23.pdf>

References

1. Buryakov N.P., Buryakova M.A., Aleshin D.E. Heat stress and feeding features of the dairy cattle. *Rossiyskiy Veterinarniy Zhurnal. Selskokhozyaystvennye Zhivotnye*. 2016;3:5-13. (In Rus.)
2. Armstrong D.V. Heat stress interaction with shade and cooling. *Journal of Dairy Science*. 1994;77(7):2044-2050. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77149-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6)
3. Zimbelman R.B., Collier R. Feeding strategies for high-producing dairy cows during periods of elevated heat and humidity. *Proc. 20th Annual Tri-State Dairy Nutrition Conference*, Fort Wayne, USA, April 19 and 20, 2011. P. 111-126.
4. St-Pierre N.R., Cobanov B., Schnitkey G. Economic losses from heat stress by US Zivestock Industires. *Journal of Dairy Science*. 2003;86: Supplement: E52-E77. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74040-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5)
5. Ivanov Yu.G., Ponzovkin D.A., Borulko V.G. Methods and technical means aimed at the decrease of the heat stress of cows during the warm period. *British Journal of Innovation in Science and Technology*. 2017;2(2):41-52. (In Rus.)
6. Ivanov Yu.G., Ponzovkin D.A. Energy-saving system of forced ventilation of a cowshed for the summer period. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Energoobespechenie i Energoberezhenie v Selskom Khozyaystve"*. 2014;3:104-105. (In Rus.)
7. Ivanov Yu.G., Ponzovkin D.A. Justification of the parameters of forcedventilation on a dairy farm for the summer time. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2013;3:173-175. (In Rus.)
8. Borulko V.G., Ivanov Yu.G., Ponzovkin D.A., Shlychkova N.A., Kostomakhin N.M. Mathematical modeling of heat exchange processes in a cowshed for the warm period. *Reports of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2021;4:37-42. (In Rus.)
9. Ivanov Yu.G., Baimukanov D.A., Borulko V.G., Ponzovkin D.A., Dzhanabekova G.K. Influence of cow skin cleaning on physiological parameters under heat stresses in warm season. *Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2020;4(386):100-108. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1467.109>
10. Khlopko Yu.A., Nigmatov L.G. Substantiation of mechanical treatment of cattle epidermis. *Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2013;3:99-103. (In Rus.)
11. Schukken Y.H., Young G.D. Cow comfort effects on milk production and mastitis: a field study. *International Dairy Topics*. 2009;9(1):23. <http://www.positiveaction.info/pdfs/articles/dt9.1p23.pdf>

Информация об авторах

Юрий Григорьевич Иванов¹, д-р техн. наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>; iy.electro@rgau-msha.ru

Дмитрий Андреевич Понизовкин², канд. техн. наук, доцент; ponizovkin.d@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8936-7164>

Жандос Боранбаевич Жумагулов³, канд. техн. наук, ассоциированный профессор; <https://orcid.org/0000-0003-1813-902X>; Scopus AuthorID: 56242293400; zhandos.79@mail.ru

Александр Михайлович Мошонкин⁴, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>; AuthorID:858451; a.moshonkin@rgau-msha.ru

^{1,2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

³ Казахский национальный аграрный исследовательский университет; 050010, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Абая, 8

Вклад авторов

Ю.Г. Иванов – концептуализация, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

Д.А. Понизовкин – проведение исследования, создание черновика рукописи, обзор литературных источников

Ж.Б. Жумагулов – аналитика, ресурсы

А.М. Мошонкин – визуализация

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

Information about the authors

Yuriy G. Ivanov¹, DSc (Eng), Professor; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>; iy.electro@rgau-msha.ru

Dmitriy A Ponizovkin², CSc (Eng), Associate Professor; ponizovkin.d@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8936-7164>

Zhandos B. Zhumagulov³, CSc (Eng), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0003-1813-902X>; Scopus AuthorID: 56242293400; zhandos.79@mail.ru

Aleksandr M. Moshonkin⁴, CSc (Eng), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>; AuthorID:858451; a.moshonkin@rgau-msha.ru

^{1,2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

³ Kazakh National Agrarian Research University, 8, Abay Ave., Almaty, 050010; the Republic of Kazakhstan

Contribution of the authors

Yu.G. Ivanov – conceptualization, methodology, draft finalizing and editing

D.A. Ponizovkin – research, original draft preparation, literature review

Zh.B. Zhumagulov – analytics, resources

A.M. Moshonkin – visualization

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 02.08.2023; revised 12.10.2023; accepted 12.10.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.331

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-24-30>

Оценка равномерности распределения семян экспериментальной сеялкой: сплошной высев газонных трав

В.И. Пляка¹, А.А. Большаков², Н.А. Сергеева³, К.А. Смирнов⁴^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ plyaka@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9353-177X>² bolshakov-a@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1394-3927>³ sergeeva_nat@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>⁴ kirieshka14072004@gmail.com

Аннотация. Сплошной высев должен обеспечивать равномерное распределение семян на засеваемой площади. Разработанная и усовершенствованная авторами экспериментальная сеялка СВ-0,9, оснащённая высевающим аппаратом катушечного типа, способна обеспечивать различное поступление семян от каждой пары катушек высевающего аппарата и производить равномерный высев при прямолинейном и криволинейном движении. Заявленный сплошной высев требует подтверждения равномерности распределения семян на засеваемой площади. С этой целью предложено применять два показателя: коэффициент равномерности посева и среднюю площадь питания одного растения. Испытания экспериментальной сеялки по выявлению показателей равномерности распределения семян проводились на газонной смеси «Газон Быстрый» в лабораторных условиях. При проведении опыта семена засыпали в семенной ящик сеялки и устанавливали норму посева 3,5 кг/100 м². Бумажное полотно размечали на квадраты 10х10 см и далее разделяли на сантиметровые ячейки. Подготовленное полотно смазывали клеем. При движении сеялки происходил посев семян на липкое полотно. Равномерность распределения семян по площади оценивалась подсчётом семян в ячейках квадратов. По результатам испытаний установлено, что коэффициент равномерности посева находился в пределах 0,92...0,96, что соответствует показателям ГОСТ 31345-2017, а средняя площадь питания одного растения составила 0,48...0,56 см². Результаты лабораторных исследований доказывают возможность сплошного посева семян сеялкой СВ-0,9 при норме посева 3,5 кг/100 м².

Ключевые слова: равномерность распределения семян, сеялка для сплошного посева, высевающий аппарат, сплошной посев газонных трав, показатель равномерности распределения семян, коэффициент равномерности посева, средняя площадь питания одного растения

Для цитирования: Пляка В.И., Большаков А.А., Сергеева Н.А., Смирнов К.А. Оценка равномерности распределения семян экспериментальной сеялкой: сплошной высев газонных трав // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 24-30. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-24-30>.

ORIGINAL PAPER

Evaluating uniformity of seed distribution with an experimental seeder: solid sowing of lawn grasses

V.I. Plyaka¹, A.A. Bolshakov², N.A. Sergeeva³, K.A. Smirnov⁴^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ plyaka@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9353-177X>² bolshakov-a@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1394-3927>³ sergeeva_nat@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>⁴ kirieshka14072004@gmail.com

Abstract. Solid seeding should ensure uniform distribution of seeds over the cultivated area. The experimental seeder SV-0.9, developed and improved by the authors, is equipped with a coil type seed-feeding device. It provides variable seed supply from each pair of coils of the seed-feeding device and ensures uniform seeding when following a straight path and a curved path. For solid sowing, it is necessary to provide uniform seed distribution over the cultivated area. For this purpose, two indicators can be used: the seeding uniformity factor and the average feeding area of a plant. The Gazon Bystryi lawn grass mixture was used to test the experimental seeder for determining the indicators of seed distribution

uniformity. The tests were carried out under laboratory conditions. During the experiment, seeds were fed into the seed box and the seeding rate was set at 3.5 kg/100 m². Paper tape was marked into 10x10 cm squares and further divided into centimetre cells. The prepared tape was covered with glue. The seeds were sown on the sticky tape while the seeder was moving. The uniformity of seed distribution over the area was evaluated by counting the seeds in the square cells. According to the experiment results, it was found that the seeding uniformity factor ranged between 0.92 and 0.96, which corresponds to the indicators of GOST 31345-2017, and the average feeding area per plant was 0.48 to 0.56 cm². The laboratory results prove the possibility of solid sowing by the SV-0.9 seeder at a seeding rate of 3.5 kg/100 m².

Keywords: uniformity of seed distribution, seeder for solid sowing, seeding unit, solid sowing of lawn grasses, seed distribution uniformity index, seeding uniformity factor, average alimentation area per plant

For citation: Plyaka V.I., Bolshakov A.A., Sergeeva N.A., Smirnov K.A. Evaluating uniformity of seed distribution with an experimental seeder: solid sowing of lawn grasses. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):24-30. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-24-30>.

Введение. Сплошной высев трав имеет преимущества перед посевом вручную или перекрёстным способом. Производительность сеялки сплошного высева в два раза превышает производительность сеялки, высевающей перекрёстным способом. Ручной способ уступает механическому способу по производительности и качеству посева. При сплошном высеве должны соблюдаться основные агротехнические показатели согласно ГОСТ 31345-2017¹.

Подготовка почвы, внесение удобрений, равномерное распределение семян на засеваемой площади в значительной степени влияют на факторы, в свою очередь влияющие на жизнь каждого растения: свет, питание и влагу, и в дальнейшем – на качество газона.

Предлагаемая авторами экспериментальная сеялка может производить равномерный посев трав, двигаясь не только по прямолинейной траектории, но и по различным радиусам, позволяющим огибать возможные препятствия (альпийские горки, цветники, колодцы, водоёмы, бассейн), с сохранением качественных показателей посева [1-3]. Стендовые испытания экспериментальной сеялки прошли достаточно успешно. Но заявленный сплошной посев требует подтверждения равномерности распределения семян на засеваемой площади как при прямолинейном, так и при криволинейном движении [4-6].

Цель исследований: оценить равномерность распределения семян экспериментальной сеялкой при её прямолинейном и криволинейном движении.

Материалы и методы. В конструкцию экспериментальной сеялки сплошного высева СВ-0,9 (рис. 1, 2) в сравнении с предыдущим вариантом [2] внесены следующие изменения:

– колёсный привод сеялки обеспечивает встречное вращение валов высевающего аппарата (рис. 1);

¹ ГОСТ 31345-2017. Техника сельскохозяйственная. Сеялки тракторные. Методы испытаний. ГОСТ 31345-2017. Межгосударственный стандарт. Техника сельскохозяйственная. Сеялки тракторные Методы испытаний. Agricultural machinery. Tractor seeders. Test methods.

- объём семенного ящика увеличен с 0,01 до 0,04 м³ (табл. 1);
- расстояние от высевающего аппарата до поверхности поля уменьшено до 0,1 м (табл. 1);
- сеялка располагает перемешивающим устройством (рис. 1).

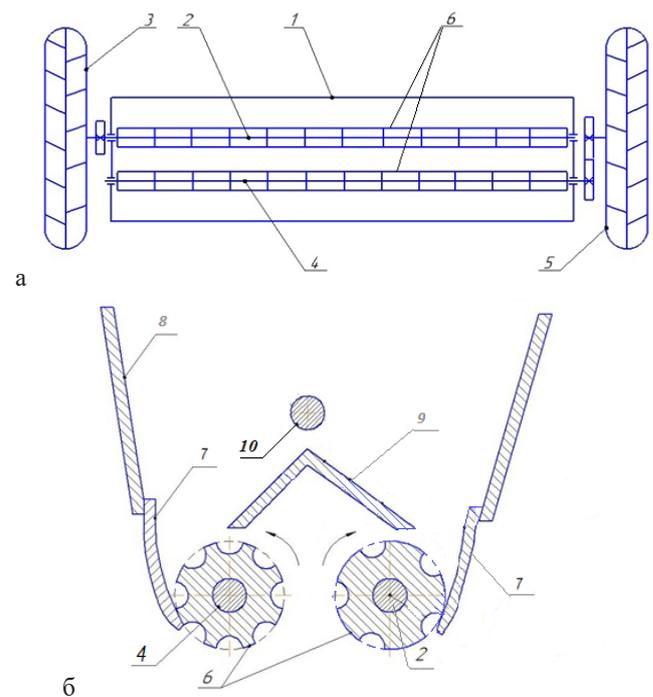


Рис. 1. Высевающий аппарат сеялки для сплошного высева.

Схема. Вид сверху (а), сбоку (б):

- 1 – рама; 2, 4 – первый и второй валы высевающего аппарата;
- 3, 5 – левое и правое опорно-приводное колесо;
- 6 – пара катушек высевающего аппарата;
- 7 – эластичный элемент; 8 – семенной ящик;
- 9 – рассекатель; 10 – вал перемешивающего устройства

Fig. 1. Seeding unit of a seeder for solid sowing. Schematic diagram. Top view (a), schematic side view (b):

- 1 – frame; 2, 4 – first and second shafts of the seeding unit;
- 3, 5 – left and right support-drive wheels;
- 6 – pair of coils of the seeding unit;
- 7 – elastic element; 8 – seed box; 9 – distributor;
- 10 – shaft of the mixing device

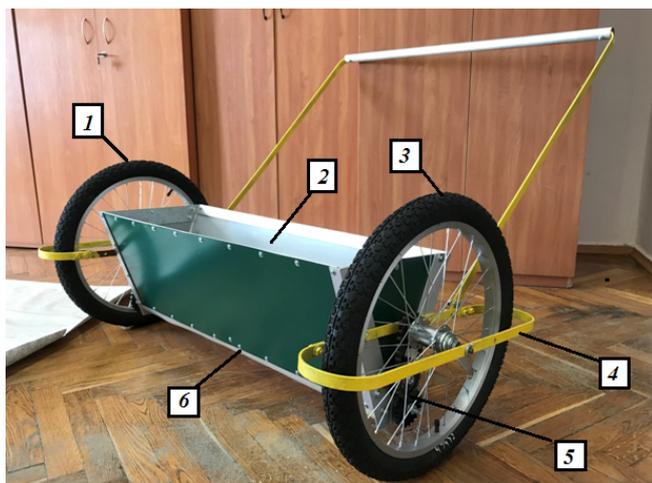


Рис. 2. Экспериментальная сеялка СВ-0,9:

- 1, 3 – правое и левое опорно-приводное колесо;
- 2 – бункер; 4 – рама; 5 – механизм привода;
- 6 – высеваящий аппарат

Fig. 2. Experimental seeder SV-0.9:

- 1, 3 – right and left support-drive wheels; 2 – seed box;
- 4 – frame; 5 – drive mechanism; 6 – seeding unit

Таблица 1

Характеристика экспериментальной сеялки СВ-0,9

Table 1

Characteristics of the experimental seeder SV-0.9

Наименование <i>Name</i>	Параметры <i>Parameters</i>
Ширина захвата, м / <i>Working width, m</i>	0,9
Клиренс сеялки, м / <i>Seeder clearance, m</i>	0,1
Объём семенного ящика, м ³ / <i>Seed box volume, m³</i>	0,04
Диаметр опорно-приводного колеса, м <i>Diameter of support wheel, m</i>	0,5
Оптимальная (рекомендуемая) норма высева, кг/100 м ² <i>Optimum (recommended) seeding rate, kg/100 m²</i>	3...5
Длина катушки, мм / <i>Coil length, mm</i>	75
Диаметр катушки, мм / <i>Coil diameter, mm</i>	34
Количество валов высеваящего аппарата, шт. <i>Number of seeding shafts, pcs.</i>	2
Количество катушек на одном валу, шт. <i>Number of coils on one shaft, pcs.</i>	12
Наименьшее число желобков на катушке, шт. <i>Minimum number of grooves per coil, pcs.</i>	1
Наибольшее число желобков на катушке, шт. <i>Maximum number of grooves per coil, pcs.</i>	12
Материал для изготовления катушек <i>Material for coil manufacturing</i>	Пластик АБС <i>ABS plastic</i>

В настоящее время разрабатывается редуктор для изменения нормы высева экспериментальной сеялкой.

При движении сеялки по полю вращение от опорно-приводных колес 3 и 5 передается на валы 2 и 4 высеваящего аппарата. Желобковые катушки 6

закреплены на валах, плотно прилегают друг к другу и размещены в порядке возрастания числа желобков. Чтобы семена не высыпались из семенного ящика при движении назад и при остановке сеялки, на высеваящем аппарате установлен эластичный элемент 7, прилегающий к катушкам 6. При вращении валов катушки 6 захватывают желобками семена и высевают их в нижней точке эластичного элемента 7. Катушки, установленные на первом и втором валах, составляют пары. Каждая пара имеет равное количество желобков.

При прямолинейном движении колеса сеялки (соответственно валы и катушки) вращаются с одинаковой угловой скоростью. Суммарный высев каждой пары катушек 6 является одинаковым по всей ширине захвата сеялки.

При движении сеялки по дуге колёса и валы высеваящих аппаратов вращаются с разными угловыми скоростями, поэтому каждая пара катушек 6 высевает разное количество семян в единицу времени. Пары катушек, расположенные ближе к опорно-приводному колесу, двигающемуся по меньшему радиусу, имеют минимальный высев. Пары катушек, расположенные ближе к опорно-приводному колесу, которое движется по наибольшему радиусу, имеют максимальный высев, а высевы остальных пар изменяются по линейной зависимости от минимального до максимального значений. На единицу пройденного пути высевается равное количество семян.

Таким образом, последовательное расположение катушек, плотно собранных на каждом валу в порядке возрастания числа желобков, обеспечивает равномерный сплошной высев семян как при прямолинейном, так и при криволинейном движении сеялки.

Испытания экспериментальной сеялки (рис. 2) проводились на газонной смеси «Газон Быстрый» (табл. 2).

Провели экспериментальные исследования по определению показателей равномерности распределения семян.

При широкополосном посеве Ю.К. Брандт предлагает оценивать равномерность распределения растений по площади в продольном и поперечном направлениях по квадратам². Широкополосный посев близок к сплошному способу посева, и такая оценка является приемлемой для наших исследований.

Для оценки равномерности размещения растений по площади питания принято использовать коэффициент равномерности, представляющий собой отношение фактического среднего расстояния между растениями к среднему расстоянию между растениями

² Брандт Ю.К. Оценка равномерности распределения растений по площади // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1977. № 3. С. 42-43.

Характеристика газонной травосмеси «Газон Быстрый»

Characteristics of the Gazon Bystryi lawn grass mixture

Наименование показателя / Parameter name	Параметры / Parameters
Состав газонной травосмеси, % <i>Composition of lawn grass mixture, %</i>	Райграс многолетний – 35 Райграс однолетний – 25 Фестулолиум – 25 Тимофеевка луговая – 15 <i>Perennial ryegrass – 35 Annual ryegrass – 25 Festulolium – 25 Common timothy – 15</i>
Чистота семян, % / <i>Seed purity, %</i>	95
Влажность семян, % / <i>Seed moisture, %</i>	12
Масса 1000 семян, г <i>Weight of 1000 seeds, g</i>	Райграс многолетний – 2,0 Райграс однолетний – 2,0...2,5 Фестулолиум – 2,7 Тимофеевка луговая – 0,7 <i>Perennial ryegrass – 2.0 Annual ryegrass – 2.0...2.5 Festulolium – 2.7 Common timothy – 0.7</i>
Всхожесть семян, % / <i>Seed germination, %</i>	87
Норма высева, кг/100 м ² / <i>Seeding rate, kg/100 m²</i>	3...4

при их идеальном размещении [7-9]. В нашем случае подсчёт расстояний между семенами является трудновыполнимым и влечет за собой изменение положения семян на липкой ленте. Наиболее подходящим является способ оценки равномерности, при котором показатели равномерности оцениваются по количеству семян, попавших в определенные элементарные площадки².

При проведении опыта семена засыпали в семенной ящик сеялки и устанавливали необходимую норму высева. На полу в лаборатории стелили бумажные полотна, на которых размечались ширина захвата сеялки, её радиус поворота и наносились квадраты площадью 10×10 см (рис. 3). Каждый квадрат разделялся на сантиметровые ячейки, примерно равные площади питания одного растения. Перед каждым проходом сеялки по заданной траектории на полотна наносили слой клея.

При движении сеялки происходил высев семян на полотна. Показатели равномерности распределения семян по площади оценивались попаданием семян в сантиметровые квадратные ячейки. Показатели определялись подсчётом семян в ячейках квадратов (рис. 4).

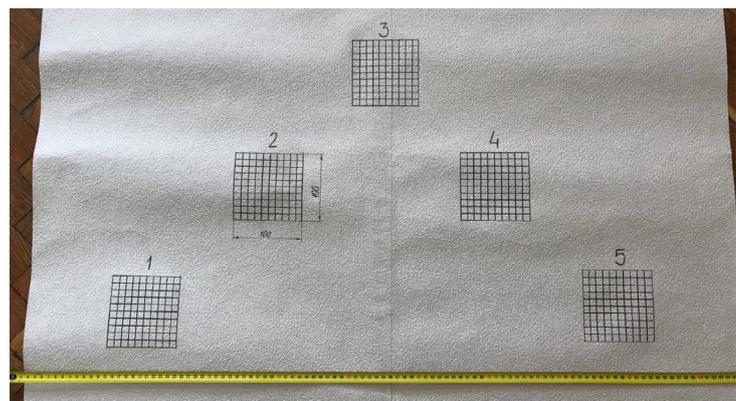


Рис. 3. Квадраты с ячейками

Fig. 3. Squares with cells



Рис. 4. Распределение семян на липкой ленте с квадратами и ячейками

Fig. 4. Seed distribution on the sticky tape with squares and cells

При движении сеялки по криволинейной траектории указывался радиус R (расстояние между центром окружности и кинематическим центром сеялки, который совпадает с её средней частью, движущейся по этой окружности³) поворота сеялки (рис. 5).

Равномерность распределения семян по засеваемой площади предлагается оценивать следующими показателями [9-12]:

– коэффициент равномерности высева K_b , показывающий равномерное распределение семян по площади

$$K_b = b / a,$$

где a – количество элементарных площадок-ячеек (1×1 см) в квадрате со сторонами 10 см; b – количество элементарных площадок-ячеек, содержащих семена;

– средняя площадь питания одного растения S_{π} (см²), показывающая площадь поверхности участка, занятая одним растением:

$$S_{\pi} = S_3 b / Z,$$

где S_3 – площадь элементарной площадки-ячейки, 1 см²; Z – число семян на площади квадрата 10×10 см.

Результаты и их обсуждение. Результаты испытаний экспериментальной сеялки по определению равномерности распределения семян газонной смеси «Газон Быстрый» на липкой ленте представлены в таблице 3.

По результатам экспериментальных испытаний сеялки показатель равномерности высева газонной смеси «Газон Быстрый» находился в пределах от 0,92 до 0,96. Известно, что обратным показателем равномерности высева

является показатель неравномерности. Поскольку неравномерность высева 8% соответствует требованиям ГОСТ 31345-2017, то и показатель равномерности остаётся легитимным. Повышение показателя равномерности высева экспериментальной сеялкой при прямолинейном движении и движении по радиусу 5 м в сравнении с движением по малым радиусам можно объяснить снижением порционности высева при работе двух валов высевающего аппарата одновременно. Этим же объясняется некоторое снижение показателя равномерности высева при уменьшении радиуса поворота при преобладании высева одного вала высевающего аппарата над другим. Так,

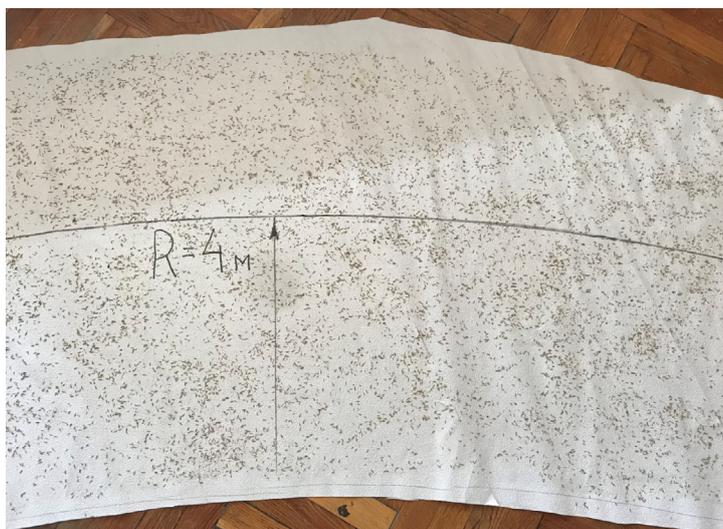


Рис. 5. Распределение семян на липкой ленте при движении сеялки по криволинейной траектории

Fig. 5. Seed distribution on the sticky tape when the seeder follows a curved path

Таблица 3

Статистические характеристики определения равномерности распределения семян экспериментальной сеялкой при норме высева 3,5 кг/100 м²

Table 3

Statistical characteristics of determining the uniformity of seed distribution by the experimental seeder at a seeding rate of 3.5 kg/100 m²

Траектория движения <i>Trajectory of travel</i>	Коэффициент равномерности высева, K_b <i>Seeding uniformity factor, K_b</i>	Средняя площадь питания одного растения, S_{π} , см ² <i>Average feeding area per plant, S_{π}, cm²</i>
Прямолинейное / <i>Straight</i>	0,95	0,53
Криволинейное с радиусом R , м / <i>Curvilinear trajectory with radius R, m</i>		
5	0,96	0,55
4	0,93	0,51
3	0,94	0,49
2	0,94	0,51
1	0,94	0,48
0,5	0,92	0,56

³ Алдошин Н.В., Мехедов М.А., Пляка В.И., Гаспарян И.Н. Механизация растениеводства (термины и определения): Учебное пособие. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2021. 260 с.

при движении сеялки по радиусу 0,5 м высеv производится одним валом высеvающего аппарата, так как поворот сеялки выполняется относительно неподвижного колеса. Показатель площади питания одного растения, как следует из данных таблицы 4, практически не зависит от траектории движения сеялки. При норме высева 3,5 кг/100 м² средняя площадь питания одного растения соответствовала 0,48...0,56 см².

Список литературы

1. Устройство для высева семян: Патент RU № 210275 U1, МПК А01С 7/12. / В.И. Пляка, С.М. Каткова. № 2021132823, заяв. 11.11.2021; опубл. 05.04.2022. Бюл. № 10. 7 с. EDN: TEQJDO.
2. Пляка В.И., Каткова С.М., Сергеева Н.А. Стендовые испытания экспериментальной сеялки для посева газонных трав // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 5. С. 24-29. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-24-29>
3. Высеvающая система сеялки: А.с. SU № 1299533 А1, МКИ А01С 7/16 / В.И. Пляка, Ю.А. Виноградов. № 3556012, заяв. 31.07.1985, опубл. 30.03.1987.
4. Plyaka V.I., Sergeeva N.A., Panov A.I., Yakovleva N.A. Seed drill used on complex configuration fields // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;941:012041. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/941/1/012041/pdf>.
5. Голубев В.В., Никифоров М.В., Фирсов А.С., Тюрин И.Ю., Левченко Г.В. Модификация сеялки для посева мелкосеменных культур // *Аграрный научный журнал*. 2019. № 6. С. 79-81. EDN: KMMTVZ.
6. Иманов А.Н., Галиев А.Ж., Биболов К.Е., Баянбаева Б. Анализ экономической эффективности зерновой сеялки, оснащенной микропроцессорным управлением и контролем высева // *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2019. № 9-1 (53). С. 77-80. EDN: EXBIIZ.
7. Габаев А.Х. Равномерность высева катушечных высеvающих аппаратов зерновых сеялок // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2021. № 56. С. 8-12. EDN: SGBQBY.
8. Kamgar S., Noei-Khodabadi F., Shafaei S.M. Design, development and field assessment of a controlled seed metering unit to be used in grain drills for direct seeding of wheat. *Information Processing in Agriculture*. 2015;2(3-4):169-76. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.08.001>
9. Титов В.А. Критерии оценки равномерности распределения растений по площади питания // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2003. № 1 (9). С. 21-23. EDN: PEOEEX.
10. Дерюшев И.А., Галицын Д.А., Савельева М.А. Ломаев, А.А. Сошниковая секция с дисковым рассеивателем семян // *АгроЭкоИнфо*. 2022. № 4 (52). С. 33. <https://doi.org/10.51419/202124411>
11. Беспамятнова Н.М., Реутин В.В. Повышение эффективности посева сильносыпучих семян // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2011. № 8. С. 20-21. EDN: RLOYFN.
12. Соколов В.В. К вопросу об оценке разброса семян при посеве // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2002. № 2. С. 65-68. EDN: ZWEWTH.

Выводы

Результаты лабораторных исследований доказывают возможность сплошного высева семян сеялкой СВ-0,9 при норме высева 3,5 кг/100 м².

Высеvающий аппарат сеялки СВ-0,9 обеспечивает равномерное распределение семян трав (0,92...0,96) и стабильную среднюю площадь питания одного растения (0,48...0,56) как при прямолинейном, так и криволинейном движении сеялки по различным радиусам.

References

1. Device for sowing seeds: patent RU210275 U1, МПК А01С 7/12. No. 2021132823 / V.I. Plyaka, S.M. Katkova, 2022. (In Rus.)
2. Plyaka V.I., Katkova S.M., Sergeeva N.A. Bench tests of experimental seeder for sowing lawn grasses. *Agricultural Engineering*. 2022;24;5:24-29. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-24-29>
3. Seeding system of a seeder: SU No.1299533 A1, МКИ А01С 7/16. No. 3556012 / V.I. Plyaka Yu.A. Vinogradov, 1987. (In Rus.)
4. Plyaka V.I., Sergeeva N.A., Panov A.I., Yakovleva N.A. Seed drill used on complex configuration fields. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;941:012041. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/941/1/012041/pdf>
5. Golubev V.V., Nikiforov M.V., Firsov A.S., Tyurin I.Yu., Levchenko G.V. Modification of the seeder for sowing small-seeded crops. *The Agrarian Scientific Journal*. 2019;6:79-81. (In Rus.)
6. Imanov A.N., Galiev A.Zh., Bibolov K.E., Bayanbaeva B. Analysis of economic efficiency of a seeder equipped with microprocessor control and seeding control. *Aktualnye Nauchnye Issledovaniya v Sovremennom Mire*. 2019;9-1(53):77-80. (In Rus.)
7. Gabaev A.Kh. Seeding uniformity of coil seeding devices of grain seeders. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2021;56:8-12. (In Rus.)
8. Kamgar S., Noei-Khodabadi F., Shafaei S.M. Design, development and field assessment of a controlled seed metering unit to be used in grain drills for direct seeding of wheat. *Information Processing in Agriculture*. 2015;2(3-4):169-76. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.08.001>
9. Titov V.A. Criteria for assessing the uniformity of plant distribution over the feeding area. *Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2003;1(9):21-23. (In Rus.)
10. Deryushev I.A., Galitsyn D.A., Savelyeva M.A. Lomaev, A.A. Coulter section with a disc seed scatterer. *AgroEcoInfo*. 2022;4(52):33. (In Rus.) <https://doi.org/10.51419/202124411>
11. Bepamyatnova N.M., Reutin V.V. Increase of efficiency of sowing of strongly loose seeds. *Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Selskogo Khozyaystva*. 2011;8:20-21. (In Rus.)
12. Sokolov V.V. On the evaluation of seed dispersal at sowing. *Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2002;2:65-68. (In Rus.)

Информация об авторах

Валерий Иванович Пляка¹, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-9353-177X>; plyaka@rgau-msha.ru

Александр Алексеевич Большаков², старший преподаватель;
<https://orcid.org/0000-0002-1394-3927>;
bolshakov-a@rgau-msha.ru

Наталья Анатольевна Сергеева³, старший преподаватель кафедры иностранных языков;
<https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>;
sergeeva_nat@rgau-msha.ru

Кирилл Алексеевич Смирнов⁴, студент;
kirieshka14072004@gmail.com

^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

В.И. Пляка – концептуализация, сборка сеялки, проведение опытов, написание статьи.

А.А. Большаков – изготовление оригинальных деталей сеялки.

К.А. Смирнов – проведение опытов, обработка результатов.

Н.А. Сергеева – оформление статьи, перевод на английский язык

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 18.08.2023, после рецензирования и доработки 10.11.2023; принята к публикации 12.10.2023

Information about the authors

Valery I. Plyaka¹, CSc (Eng); Associate Professor, Associate Professor of the Department of Agricultural Machinery;
<https://orcid.org/0000-0002-9353-177X>;
plyaka@rgau-msha.ru

Alexander A. Bolshakov², Senior Lecturer;
<https://orcid.org/0000-0002-1394-3927>;
bolshakov_a@rgau-msha.ru

Natalya A. Sergeeva³, Senior Lecturer of the Department of Russian and Foreign Languages;
<https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>;
sergeeva_nat@rgau-msha.ru

Kirill A. Smirnov⁴, student; kirieshka14072004@gmail.com

^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Contribution of the authors

V.I. Plyaka – conceptualisation, assembling the seeder, carrying out the experiments, original draft preparation.

A.A. Bolshakov – manufacturing the original parts of the seeder

K.A. Smirnov – carrying out the experiments, processing experimental results.

N.A. Sergeeva – original draft preparation and editing, translation into English.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 18.08.2023; revised 10.11.2023; accepted 12.10.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-31-38>

Технология производства бионутриентов на основе активированных копролитов и оценка их эффективности

*Ю.А. Широков¹, В.Н. Платонов²*¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия² ООО НПЦ «Новые технологии»; г. Москва, Россия¹ shirokov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5196-7447>² npctech@yandex.ru

Аннотация. Производство бионутриентов в условиях промышленного производства и сельскохозяйственных предприятий требует разработки технологии и технологической линии для стабильного качественного их производства без применения химических реагентов. С этой целью авторами разработаны технология и технологическая линия производства бионутриентов на основе переработки отходов животноводства в копролиты и применения кавитации для повышения их биологической эффективности. Представлены методика и технологическая схема производства бионутриентов. Апробация технологии и полученного бионутриента АБТ-Плант проводилась в Белгородской области на сахарной свёкле ЛМС-94 согласно схеме опыта. В контрольном образце семена смачивались водой. В 4 вариантах осуществлялась обработка бионутриентом АБТ-Плант: в первом варианте – обработка семян; во втором – опрыскивание вегетирующих растений сахарной свёклы в фазу 6-8 настоящих листьев (20 г/т); в третьем – опрыскивание вегетирующих растений (15 г/га) перед смыканием листьев в междурядьях сахарной свёклы; в четвертом – обработка семян (20 г/т) и опрыскивание вегетирующих растений (15 г/га) перед смыканием листьев в междурядьях свёклы. Установлено положительное влияние бионутриента АБТ-Плант на продуктивность сахарной свёклы. Наилучшие результаты достигнуты при двукратном использовании препарата АБТ-Плант при обработке семян (20 г/т), и период вегетации растений в фазу смыкания листьев свёклы в междурядьях (15 г/га) обеспечил прибавку урожайности корнеплодов сахарной свёклы на 3,5 т/га. Сахаристость корнеплодов сахарной свёклы увеличилась по сравнению с контролем на 5,5-6%, сбор сахара – на 0,85 т/га, или на 11,2%.

Ключевые слова: производство бионутриентов, переработка отходов животноводства, копролиты, технологическая линия производства бионутриентов, кавитация, эффективность бионутриентов, бионутриент АБТ-Плант

Для цитирования: Широков Ю.А., Платонов В.Н. Технология производства бионутриентов на основе активированных копролитов и оценка их эффективности // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 31-38. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-31-38>.

ORIGINAL PAPER

Technology of producing bionutrients based on activated coprolites and evaluation of their effectiveness

*Yu.A. Shirokov¹, V.N. Platonov²*¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia² LLC NPC “New Technologies”; Moscow, Russia¹ shirokov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5196-7447>² npctech@yandex.ru

Abstract. The production of bionutrients in the conditions of industrial production and agricultural enterprises requires the development of technology and a production line for the production of bionutrients of stable quality without the use of chemical reagents. To this end, the authors have developed a technology and a technological line for the production of bionutrients based on the processing of animal waste into coprolites and the use of cavitation to increase their biological efficiency. The article presents the methodology and technological scheme of the production of bionutrients. The technology and the obtained bionutrient ABT-Plant were tested in the Belgorod

region on sugar beet LMS-94. In the control sample, the seeds were moistened with water. In four variants, ABT-Plant bionutrient was treated: in the first – seeds; in the second – spraying of vegetative sugar beet plants in the phase of 6-8 real leaves ($20 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$); in the third – spraying of vegetative plants ($15 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$) before closing the leaves in the row spacing of sugar beet; in the fourth – seed treatment ($20 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$) and spraying of vegetative plants ($15 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$) before closing the leaves in the row spacing of sugar beet. The positive effect of the bionutrient ABT-Plant on the productivity of sugar beet has been established. The best results were achieved when the ABT-Plant preparation was used twice during seed treatment ($20 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$) and the vegetation period of plants in the phase of closing beet leaves in row spacing ($15 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$) provided an increase in the yield of sugar beet of $3.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. The sugar content of sugar beet increased by 5.5-6% compared to the control, the sugar harvest by 0.85 t/ha or by 11.2%.

Keywords: bionutrient production, animal waste processing, coprolites, bionutrient production line, cavitation, bionutrient efficiency, ABT-Plant bionutrient.

For citation: Shirokov Yu.A., Platonov V.N. Technology of producing bionutrients based on activated coprolites and evaluation of their effectiveness. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):31-38. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-31-38>.

Введение. Бионутриенты, применяемые в сельском хозяйстве многих стран [1], активизируют обменные процессы растений [2], повышают их иммунный статус [3] и улучшают усвоение питательных веществ [1, 3]. Бионутриенты способствуют снижению потребности в химических пестицидах и минеральных удобрениях при росте устойчивости к климатическим стрессам [4].

Среди бионутриентов выделяются копролиты (биогу́мус) – продукты жизнедеятельности красных калифорнийских червей *Eisenia Foetida* [4, 5], содержащие фитогормоны, ферменты, витамины, а также биогенный кальций. Лабораторными и полевыми опытами установлено стимулирующее и адаптогенное действие на клеточном и субклеточном уровнях гуминовых веществ копролитов [6].

Некоторыми учёными [7] отмечается снижение эффективности действия биогу́муса копролитов в сухом климате и при повышенных температурах, что обусловлено особым строением гумусовых веществ копролитов, а также характером их связи с минеральной частью [8, 9]. Молекулы гуминовых веществ способны образовывать стохастические соединения молекул размером до $500 \dots 1500 \text{ нм}$. При размере пор клеточной стенки корней и листьев растений $3,5 \dots 5,2 \text{ нм}$ перенос в клеточных стенках фульвокислот (длина молекул $5,3 \dots 6,4 \text{ нм}$) и гуминовых кислот ($9,4 \dots 10,7 \text{ нм}$) сильно затруднен, а тем более – длинных конгломератов их молекул (рис. 1) [10, 11].

Проблема снижения размера молекул гуминовых веществ частично решается путём совмещения химического и физического воздействия на продукты, содержащие гуминовые вещества (каменный уголь, торф, сапропель) [8] и стабилизацией свойств гуминовых веществ за счёт получения биогу́муса в процессе переработки органических отходов животноводства кольчатыми червями

в копролиты (биогу́мус) [10]. Дробление конгломератов молекул гуминовых веществ биогу́муса на низкомолекулярные части возможно при воздействии ультразвуковых колебаний или пульсирующего сверхвысокого давления в гидродинамическом кавитаторе [11, 12]. В результате формируется коллоидная суспензия раздробленных гуматов (активированные частицы – радикалы, ионы, ионно-радикальные образования) [13, 14].

Производство бионутриентов в условиях промышленности и сельскохозяйственных предприятий требует разработки технологии и технологической линии для бионутриентов стабильного качества без применения химических реагентов.

Цель исследований: разработать технологию и технологическую линию производства бионутриентов на основе переработки отходов животноводства в копролиты и применения кавитации для повышения их биологической эффективности; выявить влияние полученного бионутриента на продуктивность растений на примере сахарной свёклы.

Материалы и методы. Компост как основа для жизнедеятельности дождевых червей готовится

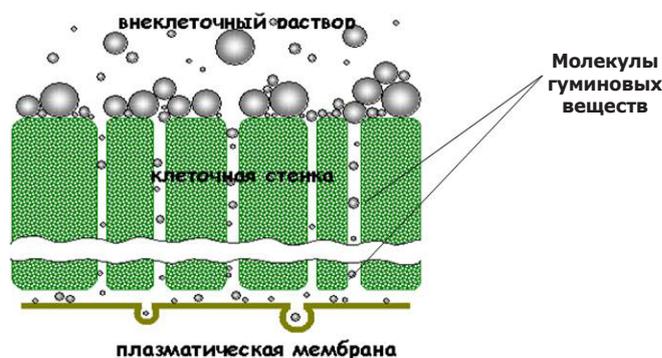


Рис. 1. Прохождение молекул гуминовых веществ через поры стенок клеток растений

Fig.1. Diagram of the passage of humic substances through the pores in the walls of plant cells

путем ускоренной биотехнологической переработки навоза животных и других органических материалов. Черви, перерабатывая органические и минеральные вещества, формируют копролиты (почвенный матричный гумус, закреплённый на поверхности почвенных частиц), который используется как основа для производства бионутриентов.

Для обеспечения гарантированного прохождения гуминовых веществ через мембрану клетки предложен метод получения бионутриентов путем дробления конгломератов молекул гуминовых веществ биогумуса на низкомолекулярные части под воздействием гидродинамического насоса-кавитатора типа УКГ 14-35. Он оказывает гидродинамическое и акустическое воздействие на водный раствор биогумуса, обеспечивает турбулентность, пульсацию давления и скорости потока жидкости, интенсивную кавитацию, ударные волны и вторичные нелинейные акустические эффекты [15].

Для выявления влияния полученного бионутриента АБТ-Плант на продуктивность растений исследовался его состав. Определялись: рН бионутриента по ГОСТ 27979-88; сухой остаток согласно ГОСТ 26713-85; азот общий – ГОСТ 26715-85; фосфор общий – ГОСТ 26717-85; калий общий – ГОСТ 26718-85; органическое вещество – ГОСТ 27980-88. Содержание общего углерода, гуминовых кислот, углерода гуминовых кислот определялось по ГОСТ 26213-91. Состав гумуса определялся по методу М.М. Кононовой и Н.П. Бельчиковой. Химический состав бионутриента АБТ-Плант определялся согласно методическим указаниям¹.

Полевые испытания полученного бионутриента АБТ-Плант в качестве биорегулятора роста и развития растений и антистрессового препарата на посевах сахарной свёклы проводились в Белгородской области на опытных участках Белгородского государственного аграрного университета. Опыты проводились на посевах гибрида сахарной свёклы ЛМС-94. Посев осуществлялся с нормой 140 тыс. семян на 1 га.

Почва опытного участка – типичный среднemocный выщелоченный чернозём, тяжелосуглинистый на лёссовидном суглинке. Содержание гумуса составляет 5,0%, P_2O_5 -25 мг, K_2O – 18 мг на 100 г сухой почвы, рН = 5,8, гидролитическая кислотность – 3,01 мг-экв. на 100 г почвы, сумма поглощённых оснований – 42,4 мг-экв. на 100 г почвы. Предшественник сахарной свёклы – озимая пшеница.

¹ Методические указания по определению тяжёлых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293771/4293771886.htm>.

Обработка семян и растений сахарной свёклы бионутриентом АБТ-Плант проводилась по следующей схеме:

1. Контроль (без обработки).
2. АБТ-Плант: обработка семян из расчёта 20 г препарата на 1 т семян.
3. АБТ-Плант: опрыскивание вегетирующих растений сахарной свёклы в фазу 6...8 настоящих листьев из расчёта 15 г препарата на 1 га (расход рабочей жидкости – 260 л/га).
4. АБТ-Плант: опрыскивание вегетирующих растений перед смыканием листьев в междурядьях сахарной свёклы из расчёта 15 г препарата на 1 га.
5. АБТ-Плант: обработка семян из расчёта 20 г препарата на 1 т семян, опрыскивание вегетирующих растений перед смыканием листьев в междурядьях свёклы из расчёта 15 г препарата на 1 га.

Обработка участков культур препаратом АБТ-Плант проводилась с помощью ранцевого опрыскивателя СР-15 (Lurmark). Делянки сахарной свёклы размещались в четырёхкратной повторности.

Учёт урожайности сахарной свёклы производили вручную. На всей площади учётной делянки площадью 25 м² выкапывались растения сахарной свёклы с последующей обрезкой ботвы и взвешиванием корнеплодов.

Учёты, наблюдения и оценка биологической и хозяйственной эффективности проводились по общепринятым методикам и в соответствии с методическими рекомендациями ВИЗР. Математическая обработка урожайности проведена по Б.А. Доспехову.

Результаты и их обсуждение. Для практической реализации возможностей бионутриентов нового поколения разработаны технология и проект экспериментальной технологической линии для их производства в промышленных объёмах.

Технологический процесс начинается с ферментирования свежего навоза, для чего навоз предварительно укладывают в ферментатор или бурты. Субстрат готовят из смеси ферментированного навоза, почвы, соломенной резки, при необходимости добавляя небольшое количество известковой муки для обеспечения кислотности среды в пределах рН 6,5...7,5. Ленты конвейера заполняются субстратом, который периодически увлажняют водой через форсунки до оптимальной влажности 70...80% и температуру которого поддерживают в пределах 20...25°C. Далее субстрат заселяют червями с плотностью около 3...5 тыс. особей на 1 м² и укрывают плотным воздухопроницаемым материалом.

На следующем этапе биомасса копролитов направляется в производственный цех. Технологическая схема цеха и экспериментальный цех для производства бионутриентов представлены на рисунках 2, 3.

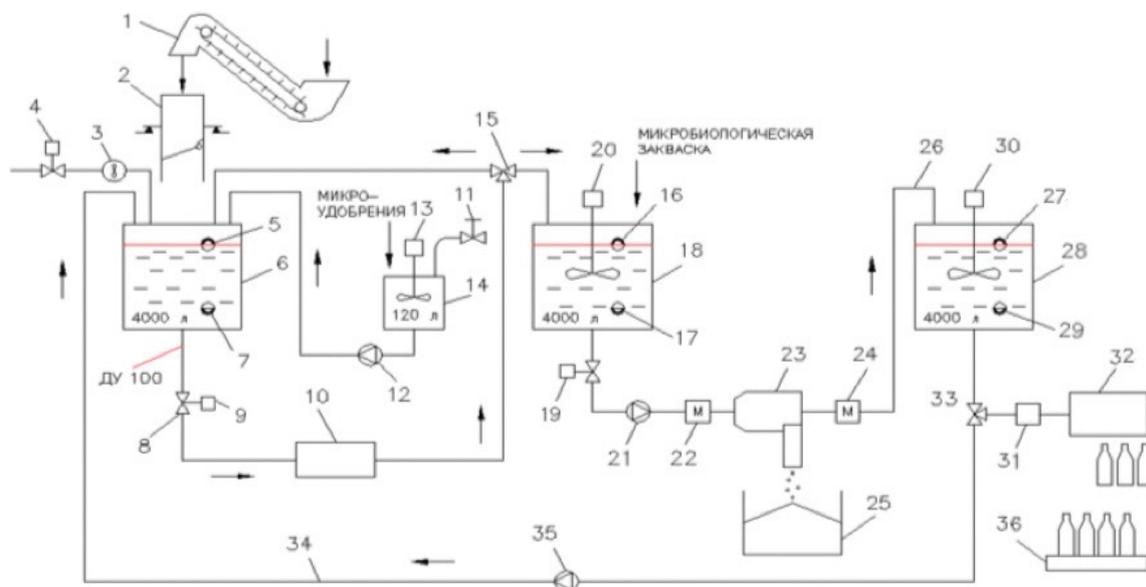


Рис. 2. Технологическая схема цеха для производства бионутриентов нового поколения:

- 1 – ленточный конвейер с приемным бункером; 2 – весовой дозатор на 120 кг; 3 – расходомер воды;
- 4, 8, 19, 33 – клапан электромагнитный; 5, 16, 27 – датчик верхнего уровня; 6 – ёмкость смешивательная на 4000 л;
- 7, 17, 29 – датчик нижнего уровня; 9, 31 – расходомеры; 10 – насос-кавитатор; 11 – ручной кран воды;
- 12, 21, 24 – насос; 13, 20, 30 – мешалка; 14 – ёмкость на 120 л; 15, 33 – электрический магнитный клапан-тройник;
- 18 – ёмкость смеси на 4000 л; 22 – насос грязевой; 23 – центрифуга; 25 – накопительная ёмкость твёрдой фракции;
- 26 – трубопровод жидкой фракции; 28 – ёмкость на 4000 л; 32 – фасовщик-дозатор;
- 34 – трубопровод возврата промывочной воды; 35 – насос возврата промывочной воды; 36 – стол упаковочный

Fig. 2. Technological layout of the workshop for the production of a new generation of bionutrients:

- 1 – conveyor belt with a receiving hopper; 2 – weight dispenser for 120 kg; 3 – water flow meter; 4, 8, 33 – electromagnetic valve;
- 5, 16, 27 – upper level sensor; 6 – mixing tank for 4000 liters; 7, 17, 29 – lower level sensor; 9, 19, 31 – flow meters;
- 10 – cavitator pump; 11 – manual water tap; 12, 21, 24 – pump; 13, 20, 30 – agitator; 14-120 l capacity tank;
- 15, 33 – electric magnetic tee valve; 18-4000 l mixture capacity tank; 22 – mud pump; 23 – centrifuge;
- 25 – solid fraction storage tank; 26 – liquid fraction pipeline; 28-4000 l capacity tank; 32 – filling dispenser;
- 34 – flushing water return pipeline; 36 – packing table



Рис. 3. Экспериментальный цех для производства бионутриентов

Fig. 3. Experimental workshop for the production of organomineral bionutrients

Приём биомассы копролитов (биогумуса) производится из автотранспорта в открытую накопительную площадку (под навесом), а оттуда в летнее

время фронтальным погрузчиком биомасса загружается в приёмный бункер 1 с дозатором 2. В холодное время биогумус загружается на накопительную площадку, обогреваемую инфракрасными излучателями, и в нагретом состоянии перегружается подборщиком-выгрузчиком в приёмный бункер 1. Дозатор 2 подаёт дозированное количество биогумуса (0,5 т) в сепаратор биогумуса для отделения механических примесей, которые транспортёром выводятся в накопитель и вывозятся на поля в качестве мелиоранта почвы.

Очищенный биогумус подаётся в смешивательную ёмкость 6, заполненную заблаговременно водой, подаваемой через расходомер 3 при открытии клапана 4. Перед загрузкой биогумуса включается насос-кавитатор 10, в котором при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний и пульсирующего сверхвысокого давления происходит дробление молекул гуминовых веществ.

На последней стадии коллоидная суспензия гуматов смешивается с микроэлементами и природными биологически активными веществами или их

синтетическими аналогами: например, природными ауксинами и гибберлинами или их органоминеральными аналогами (1-хлорметилсилатран, мивал), а также эссенциальными микроэлементами, которые являются ключевыми для данной культуры.

Обработанная кавитацией масса подаётся по трубопроводу под давлением обратно в ёмкость 6 для более активного перемешивания компонентов. Одновременно в ёмкость 6 из ёмкости приготовления маточного раствора 18 заливают насосом 12 водный раствор солей микроэлементов, биологически активных и поверхностно активных веществ в соответствии с рецептурой. Далее включается электромагнитный клапан 19, и приготовленная суспензия поступает без разделения на фракции по трубопроводу через грязевой насос 21 и расходомер 22 в фасовщик-дозатор 23 для заполнения цистерн тракторных опрыскивателей. Приготовленная суспензия может направляться через центрифугу 23, после которой твёрдая фракция (используется как мелиорант почвы) поступает в накопительную ёмкость 25 и собирается в контейнеры (биг-беги) для вывоза на поля, а жидкая фракция поступает в накопительную ёмкость 28, и далее – на фасовщик-дозатор 32 или возвращается по трубопроводу 34 в ёмкость 6 для коррекции качества продукта.

Применение насоса-кавитатора позволило обеспечить высокую производительность и эффективность процесса: более 40% гуминовых веществ соответствовали размеру менее 3 нм и стали доступными для прохождения через мембраны клетки (рис. 4).

Результатом взаимодействия гуминовых удобрений и живых клеток является как стимулирование компетентных генов, отвечающих за ростовые процессы, так и высвобождение энергии, которая вместо того, чтобы расходоваться на компенсацию неблагоприятных воздействий внешней среды, может быть затрачена клеткой на рост и размножение, что в итоге приводит к усилению конкурентоспособности данного организма [12].

Для выявления влияния полученного бионутриента АБТ-Плант на продуктивность растений исследовался его состав (табл. 1).

Полевые испытания бионутриента АБТ-Плант в качестве биорегулятора роста и развития растений и антистрессового препарата проводились на гибриде сахарной свёклы ЛМС-94.

После уборки предшествующей культуры озимой пшеницы поле два раза рыхлили противозерононным культиватором КПЭ-3,8 на глубину 14...16 см. В середине октября под сахарную свёклу проведена вспашка плугом ПН-5-35 на глубину 27...30 см с последующим выравниванием почвы

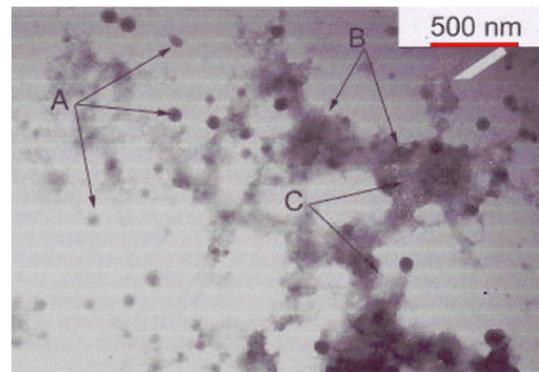


Рис. 4. Гуматы после дробления

Fig. 4. Humates after crushing

Таблица 1

Состав бионутриента АБТ-Плант

Table 1

Composition of the AB-Plant bionutrient

Наименование показателя, ед. изм. <i>Indicator, unit of measurement</i>	Значение <i>Value</i>
Физико-химические показатели / Physico-chemical parameters	
pH, ед. pH	8,50
Сухой остаток, г/л / <i>Dry residue, g/l</i>	19,17
Азот общий, г/л / <i>Total nitrogen, g/l</i>	0,77
Фосфор общий, мг/л / <i>Total phosphorus, mg/l</i>	387,00
Калий общий, мг/л / <i>Total potassium, mg/l</i>	4624,00
Органическое вещество, г/л <i>Organic matter, g/l</i>	10,29
Общий углерод, г/л / <i>Total carbon, g/l</i>	4,72
Углерод гуминовых кислот, г/л <i>Carbon of humic acids, g/l</i>	0,87
Гуминовые кислоты, г/л / <i>Humic acids, g/l</i>	1,63
Углерод фульвокислот, г/л <i>Carbon of fulvic acids, g/l</i>	3,85
Фульвокислоты, г/л / <i>Fulvic acids, g/l</i>	8,67
Сумма гуминовых и фульвокислот, г/л <i>Sum of humic and fulvic acids, g/l</i>	10,29
Содержание химических элементов, мг/л <i>Content of chemical elements</i>	
Cu	0,51
Zn	289,00
Co	52,84
Mn	540,70
Cr	0,96
Mg	278,50
Mo	668,90
Fe	153,70
B	1,02

культиватором КПС-4. Весной, после созревания почвы, проведено боронование поля с одновременным выравниванием сцепкой из борон ВНИС-Р и шлейф-борон. Непосредственно перед посевом проводилась обработка почвы на глубину заделки семян под свёклу боронами ВНИС-Р. Сахарная свёкла выращивалась на фоне минерального питания $N_{120}P_{120}K_{120}$, кг д.в., на 1 га. Посев сахарной свёклы производился 29 апреля с междурядьями 45 см сеялками ССТ.

Дополнительные мероприятия по уходу за опытными деланками (снегозадержание, подкормка минеральными удобрениями, борьба с болезнями и насекомыми) не проводились. При массовом появлении всходов сорняков (23 мая) на посевах сахарной свёклы проводилась гербицидная обработка баковой смесью препаратов Бицепс Гарант (1,1 л/га) с Миурой (0,6 л/га). По второй волне сорняков (6 июня) применялась баковая смесь в составе: Бетанес (1,5 л/га) + Карибу (30 г/га) + Лонтрел-300 (0,5 л/га) + Зеллек-супер (0,5 л/га).

После посева сахарной свёклы 29 апреля её проростки появились на поверхности почвы 10 мая,

полные всходы зафиксировали 19 мая. Уборка проводилась 19 сентября.

Семена сахарной свёклы обрабатывались препаратом АБТ-Плант непосредственно перед посевом. Одновременно для контрольного варианта семена были обработаны водой в объёме, соответствующем объёму препарата АБТ-Плант. Обработка растений сахарной свёклы препаратом АБТ-Плант проводилась 20 июня (в фазу 6-8 листьев) и 5 июля (перед фазой смыкания в междурядьях).

Исследованиями установлено, что всхожесть сахарной свёклы не зависела от обработки семян и находилась на уровне 6,2...6,5 шт. на 1 пог. м (табл. 2).

Густота растений перед уборкой была несколько выше в вариантах с применением препарата АБТ-Плант (табл. 3). Так, на контрольном варианте густота растений составила 91 тыс. шт/га, а в вариантах с использованием АБТ-Плант колебалась в пределах от 94 до 98 тыс. шт/га.

Установлено, что в вариантах, где применялся препарат, развитие корневых гнилей было несколько ниже. В то же время средний вес одного корня на контрольном варианте составлял 570 г. В трёх вариантах,

Таблица 2

Всхожесть сахарной свёклы, шт/пог. м

Table 2

Sugar beet germination, pcs./ m of run

Вариант опыта <i>Experiment variant</i>	Повторения / <i>Replications</i>				Среднее / <i>Average</i>
	1	2	3	4	
Контроль (вода) / <i>Control (water)</i>	6,0	7,0	7,0	6,0	6,5
Семена, обработанные препаратом АБТ-Плант <i>Seeds treated with ABT-Plant preparation</i>	6,0	6,0	6,0	7,0	6,2

Таблица 3

Густота растений и вес корнеплодов сахарной свёклы в период уборки

Table 3

Plant density and weight of sugar beets during the harvesting period

Вариант опыта <i>Experiment variant</i>	Густота растений, тыс. шт/га <i>Plant density, thousand plants/ha</i>	Вес одного корнеплода, г <i>Weight of one root crop, g</i>
1. Контроль (вода) / <i>1. Control (water)</i>	91	570
2. АБТ-Плант: обработка семян из расчёта 20 г на 1 т <i>2. ABT-Plant: seed treatment at a rate of 20 grams per ton</i>	95	560
3. АБТ-Плант: опрыскивание растений в фазе 6-8 листьев <i>3. ABT-Plant: spraying of plants in the phase of 6-8 leaves</i>	94	550
4. АБТ-Плант: опрыскивание растений перед смыканием листьев в междурядьях <i>4. ABT-Plant: spraying of plants before the leaves close together in the row spacing</i>	96	580
5. АБТ-Плант: обработка семян + опрыскивание растений перед смыканием листьев в междурядьях <i>5. ABT-Plant: seed treatment + spraying of plants before the leaves close together in the row spacing</i>	98	560

где использовался препарат, средний вес корнеплода был несколько ниже 550...560 г, в варианте с опрыскиванием препаратом растений перед смыканием листьев в междурядьях средний вес корнеплода был максимальным – 580 г.

Результаты исследований показывают, что достоверную прибавку урожайности сахарной свёклы по сравнению с контролем обеспечил вариант с двукратным использованием препарата АБТ-Плант: при обработке семян (20 г/т) в период вегетации растений в фазу смыкания листьев свёклы в междурядьях (15 г/га) (табл. 4). Прибавка урожайности корнеплодов сахарной свёклы составила 3,5 т/га, НСР₀₅ для данного опыта – 2,5 т/га, что свидетельствует о достоверном увеличении урожая. По остальным

вариантам (2, 3, 4) прибавка 0,6...2,2 т/га не превысила уровня наименьшей существенной разницы, но выявила положительный эффект от применения препарата.

Препарат АБТ-Плант оказал положительное влияние также на сахаристость корнеплодов сахарной свёклы. Так, в контрольном варианте сахаристость составила 15,05%, в то время как на вариантах с применением препарата она колебалась от 15,66 до 15,97%.

Одним из главных показателей продуктивности культуры является выход сахара. В нашем опыте наибольший показатель был получен в пятом варианте (8,41 т/га), в то время как на контрольном варианте он был самым низким (7,56 т/га). В остальных вариантах выход сахара колебался от 8,11 до 8,16 т/га.

Таблица 4

Продуктивность сахарной свёклы

Table 4

Sugar beet yield

Вариант опыта <i>Experiment variant</i>	Урожайность, т/га <i>Yield, tons/ha</i>	+/- к контролю <i>+/- to contro</i>	Сахаристость, % <i>Sugar content, %</i>	Выход сахара, т/га <i>Sugar yield, tons/ha</i>
1. Контроль (вода) / 1. Control (water)	50,2	-	15,05	7,56
2. АБТ-Плант: обработка семян из расчёта 20 г на 1 т <i>2. ABT-Plant: seed treatment at a rate of 20 grams per ton</i>	52,4	+2,2	15,57	8,16
3. АБТ-Плант: опрыскивание растений в фазе 6-8 листьев <i>3. ABT-Plant: spraying of plants in the phase of 6-8 leaves</i>	50,8	+0,6	15,97	8,11
4. АБТ-Плант: опрыскивание растений перед смыканием листьев в междурядьях <i>4. ABT-Plant: spraying of plants before the leaves close together in the row spacing</i>	51,6	+1,4	15,78	8,14
5. АБТ-Плант: обработка семян + опрыскивание растений перед смыканием листьев в междурядьях <i>5. ABT-Plant: seed treatment + spraying of plants before the leaves close together in the row spacing</i>	53,7	+3,5	15,66	8,41
НСР ₀₅	2,5			

Выводы

Разработанная технология производства бионутриентов на основе переработки отходов животноводства в копролиты позволила получить бионутриент АБТ-Плант, положительно влияющий на продуктивность сахарной свёклы:

– двукратное использование препарата АБТ-Плант при обработке семян (20 г/т)

и период вегетации растений в фазу смыкания листьев свёклы в междурядьях (15 г/га) обеспечили прибавку урожайности корнеплодов сахарной свёклы на 3,5 т/га;

– сахаристость корнеплодов сахарной свёклы увеличилась по сравнению с контролем на 5,5...6%, выход сахара – на 0,85 т/га, или на 11,2%.

Список литературы / References

1. Nardi S., Pizzeghello D., Schiavon M., Ertani A. Plant biostimulants: Physiological responses induced by protein hydrolyzed-based products and humic substances in plant metabolism. *Scientia Agricola*. 2016;73(1):18-23. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0006>
2. Nardi S., Muscolo A., Vaccaro S., Baiano S., Spaccini R., Piccolo A. Relationship between molecular characteristics of soil humic fractions and glycolytic pathway and Krebs cycle in maize seedlings. *Soil Biology and Biochemistry*. 2007;39(12):3138-3146. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.07.006>
3. Mao J., Chen N., Cao X. Characterization of humic substances by advanced solid state NMR spectroscopy: Demonstration of a systematic approach. *Organic Geochemistry*. 2011;42(8):891-902. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.03.023>
4. Широков Ю.А. Дехимизация растениеводства за счёт кремнийорганических соединений // Аграрная Россия. 2008. № 2. С. 33-36. EDN: TNHEGF.
5. Широков Ю.А. Дехимизация растениеводства за счёт кремнийорганических соединений // Аграрная Россия. 2008;2:33-36. (In Rus.)
6. Canellas L.P., Olivares F.L. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2014;1:3. <https://doi.org/10.1186/2196-5641-1-3>
7. Katsumi N., Yonebayashi K., Okazaki M., Nishiyama Sh., Nishi T., Hosaka A., Watanabe Ch. Characterization of soil organic matter with different degrees of humification using evolved gas analysis-mass spectrometry. *Talanta*. 2016;155:28-37. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.04.007>
8. Кутюкова О.В. Характеристика гумусовых веществ агродерново-подзолистой почвы и копролитов дождевых червей // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2012. № 69. С. 46-59. EDN: OYNGTX.
9. Кутюкова О.В. Characteristics of humus and coprolites of earthworms in soddy podzolic farm soils. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2012;69:46-59 (In Rus.)
10. Прусак А.В., Смагин А.В., Костина Н.В., Умаров М.М., Богданова Т.В. Гидрофизические свойства и биологическая активность копролитов дождевых червей разных эколого-трофических групп // Фундаментальные исследования. 2008. № 2. С. 50-51. EDN: HNSSLJ.
11. Prusak A.V., Smagin A.V., Kostina N.V., Umarov M.M., Bogdanova T.V. Hydrophysical properties and biological activity of earthworm coprolites of different ecological and trophic groups. *Fundamentalnye Issledovaniya*. 2008;2:50-51. (In Rus.)
12. Демин В.В., Тихонов В.В., Вызов Б.А. Модификация дождевыми червями структуры и биологической активности гуминовых кислот // Труды V Всероссийской конференции «Гуминовые вещества в биосфере». СПб.: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета. 2010. Т. 1. С. 19-25. EDN: SKGFHN.
13. Demin V.V., Tikhonov V.V., Vyzov B.A. Modification by earthworms of the structure and biological activity of humic acids. *Trudy V Vserossiyskoy konferentsii "Guminovye Veshchestva v Biosphere"*. Part 1. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University. 2010:19-25. (In Rus.)
14. Datta S., Singh J., Singh S., Singh S.J. Earthworms, pesticides and sustainable agriculture: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:8227-8243. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6375-0>
15. Широков Ю.А., Тихоненко В.Г., Ивакина Е.Г., Имамзаде А.И. Результаты исследования эффективности гуминовых удобрений, активированных гидродинамическими и акустическими эффектами. *Lecture Notes in Networks and Systems*. this link is disabled. 2023. 575 LNNS. Pp. 1601-1608. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_178
16. Широков Ю.А., Тихоненко В.Г., Ивакина Е.Г., Имамзаде А.И. Технология активирования гуминовых удобрений гидродинамическим и акустическим воздействием и оценка их эффективности // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: Юбилейный сборник научных трудов XV Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2022. С. 205-210. EDN: ZKLCVN.
17. Широков Ю.А., Тихоненко В.Г., Ивакина Е.Г., Имамзаде А.И. Технология активирования гуминовых удобрений гидродинамическими и акустическими эффектами и оценка их эффективности. In: *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa. Yubileyniy sbornik nauchnykh trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Rostov-on-Don. 2022:205-210. (In Rus.)
18. Fujisawa N., Fujita Y., Yanagisawa K., Fujisawa K., Yamagata T. Simultaneous observation of cavitation collapse and shock wave formation in cavitating jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018;94:159-167. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusc.2018.02.012>
19. Stanley C., Barber T., Rosengarten G. Re-entrant jet mechanism for periodic cavitation shedding in a cylindrical orifice. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2014;50:169-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.07.004>
20. Watanabe R., Yanagisawa K., Yamagata T., Fujisawa N. Simultaneous shadowgraph imaging and acceleration pulse measurement of cavitating jet. *Wear*. 2016;358-359:72-79. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.036>

Информация об авторах

Юрий Александрович Широков, д-р техн. наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; <https://orcid.org/0000-0001-5196-7447>; shirokov@rgau-msha.ru

Владимир Николаевич Платонов, генеральный директор, ООО НПЦ «Новые технологии»; 115054, Россия, г. Москва, пер. 5-й Монетчиковский, 20, стр. 3; npctech@yandex.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 15.08.2023, после рецензирования и доработки 02.11.2023; принята к публикации 03.11.2023

Information about the authors

Yuri A. Shirokov, DSc (Eng), Professor; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia; <http://orcid.org/0000-0001-5196-7447>; shirokov@rgau-msha.ru

Vladimir N. Platonov, General Director; LLC NPC “New Technologies”; 115054, PAGE3, 20, 5th Monetchikovskiy Lane, Moscow, Russia; npctech@yandex.ru

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 15.08.2023; revised 02.11.2023; accepted 03.11.2023

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.815

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-39-45>



Методика оценки брака: процесс контроля коренных шеек коленчатых валов в ремонтном производстве

Г.Н. Темасова¹, О.А. Леонов², Н.Ж. Шкаруба³, Ю.Г. Вергазова⁴✉, А.В. Чепурин⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>

² oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

³ shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>

⁴ vergazova@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>

⁵ av.tchepurin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0865-3263>

Аннотация. Действительный размер детали и погрешность измерения оказывают влияние на результаты допускового контроля в ремонтном производстве. Разработана математическая модель оценки брака по вероятностным характеристикам сортировки деталей, с учётом специфики ремонтного производства и смещения центра распределения относительно поля допуска. Проведена апробация математической модели оценки брака при обработке под ремонтный размер коренных шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-238. При неправильном забраковании и неправильном принятии коренных шеек характер потерь от брака будет различным. Неправильно забракованные коленчатые валы с шейками, имеющими неисправимый брак, будут направлены на утилизацию. Вместо них их будут приобретены новые валы, появятся потери от неправильного забракования слева от зоны рассеяния. Неправильно забракованные коленчатые валы с шейками, имеющими исправимый брак, отправляются на переделку. В этом случае потери на один коленчатый вал определяются себестоимостью переделки (это потери справа от зоны рассеяния). Неправильно принятые коленчатые валы с шейками, имеющими брак как слева, так и справа от зоны рассеяния, отправляются на сборку. В случае превышения границы наибольшего размера возможно проворачивание вкладышей, и тогда требуется переборка двигателя, что значительно увеличивает потери. При нарушении границы по нижнему размеру снизится ресурс вала, и потери возникнут только у потребителя. В отличие от существующей методики расчёта параметров сортировки, где зона рассеяния совпадает с серединой поля допуска, разработанная методика оценки брака при смещении зоны рассеяния относительно допуска позволила сформировать более дифференцированный и уточнённый методологический подход к оценке потерь при забраковке деталей при выполнении операций механической обработки деталей в ремонтном производстве.

Ключевые слова: методика оценки брака, потери, процесс контроля коленчатых валов, ремонтное производство, допусковый контроль, действительный размер детали, погрешность измерения, закон нормального распределения

Для цитирования: Темасова Г.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Чепурин А.В. Методика оценки брака: процесс контроля коленчатых валов в ремонтном производстве // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 6. С. 39-45. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-39-45>

ORIGINAL PAPER

Methodology of evaluating rejects: inspection of crankshaft main journals in repair production**G.N. Temasova¹, O.A. Leonov², N.Zh. Shkaruba³, Yu.G. Vergazova⁴✉, A.V. Chepurin⁵**^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya; Moscow, Russia¹ temasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>² oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>³ shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>⁴ vergazova@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>⁵ av.tchepurin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0865-3263>

Abstract. Both the actual size of the part and measurement errors influence the results of tolerance control in repair production. For this purpose, the authors developed the mathematical model of reject estimation by probabilistic characteristics of parts sorting, taking into account the specifics of repair production and the shift of the distribution centre relative to the tolerance field. They tested and evaluated the mathematical model of rejects estimation at machining for repair size of crankshaft main journals of the YaMZ-238 engines. In case of incorrect rejection and incorrect acceptance of main bearing journals, the character of reject losses will be different. Incorrectly rejected crankshafts with journals having irreparable rejects will be sent for recycling. New crankshafts will be purchased to replace them, and there will be reject losses to the left of the scatter zone. Incorrectly rejected crankshafts with journals that have reparable rejects will be sent for remanufacturing. In this case, the loss per crankshaft is determined by the cost of rework, which is the loss to the right of the scatter zone. Incorrect crankshafts with journals having defects to the left and right of the scatter zone will be sent for reassembly. If the largest size limit is exceeded, the liners may rotate and the engine must be rebuilt, which increases losses significantly. In case of violation of the lower size limit, the shaft life will be reduced and losses will occur only for the consumer. In contrast to the existing methodology for calculating the sorting parameters, where the scatter zone coincides with the middle of the tolerance field, the developed methodology for assessing rejects when the scatter zone is displaced relative to the tolerance allowed to form a more differentiated and refined methodological approach to the assessment of losses in disassembly of parts when performing machining operations in repair production.

Keywords: tolerance control, actual size, upper and lower limit dimensions, good part, reparable and irreparable reject, incorrectly accepted parts, incorrectly rejected parts, losses resulting from rejects.

For citation: Temasova G.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Chepurin A.V. Methodology of evaluating rejects: inspection of crankshaft main journals in repair production. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):39-45. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-39-45>

Введение. В ремонтном производстве при допусковом контроле определяют действительный размер детали [1] и при сопоставлении полученного результата измерений с заданными предельными размерами (верхним и нижним) считают деталь годной или бракуют ее [2]. Брак бывает исправимым и неисправимым [3, 4]. Если размер, полученный в результате измерений, меньше нижнего предельного размера, то это неисправимый брак; если размер больше верхнего предельного размера – это исправимый брак.

При допусковом контроле рассеяние погрешности конкретного средства измерений накладывается на рассеяние действительных размеров [3, 5] и оказывает влияние на принятие или выбраковку деталей [6], действительные размеры которых расположены близко к границам интервала допуска [7] как справа, так и слева от них.

Рассеяние действительных размеров контролируемых поверхностей деталей практически определяется

с помощью гистограмм и полигонов опытного распределения [8, 9], а теоретически рассеяние описывается определенным законом распределения. Погрешности средств измерений в большинстве случаев описываются законом нормального распределения [10, 11]. Сочетание рассеяний действительных размеров деталей и погрешности средства измерений является случайным событием, и определить вероятности неправильного забракования или неправильного принятия можно только вероятностным путем.

Цель исследований: разработать методику оценки брака по вероятностным характеристикам сортировки деталей с учётом специфики ремонтного производства.

Материалы и методы. При контроле любого вида принимаемые на основании измерений решения обусловлены набором случайных событий:

$P_{ГТ}$ – вероятность того, деталь годна и будет признана годной;

$P_{\text{ДД}}$ – вероятность того, что деталь является браком и будет признана браком в результате контроля;

$P_{\text{ГД}}$ – вероятность того, что деталь годна, но будет принята как дефектная;

$P_{\text{ДГ}}$ – вероятность того, что деталь является браком, но будет принята как годная¹.

Представим указанные вероятности в виде математических выражений:

$$P_{\text{ГГ}} = \int_{X_{\text{Н}}}^{X_{\text{В}}} f(x) \int_{X_{\text{Н}}-X}^{X_{\text{В}}-X} \varphi(\gamma) d\gamma dx; \quad (1)$$

$$P_{\text{ДГ}} = \int_{-\infty}^{X_{\text{В}}} f(x) \int_{X_{\text{Н}}-X}^{X_{\text{В}}-X} \varphi(\gamma) d\gamma dx + \int_{X_{\text{В}}}^{+\infty} f(x) \int_{X_{\text{Н}}-X}^{X_{\text{В}}-X} \varphi(\gamma) d\gamma dx; \quad (2)$$

$$P_{\text{ГД}} = \int_{X_{\text{Н}}}^{X_{\text{В}}} f(x) \left(\int_{-\infty}^{X_{\text{Н}}-X} \varphi(\gamma) d\gamma + \int_{X_{\text{В}}-X}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma \right) dx; \quad (3)$$

$$P_{\text{ДД}} = \int_{-\infty}^{X_{\text{Н}}} f(x) \left(\int_{-\infty}^{X_{\text{Н}}-X} \varphi(\gamma) d\gamma + \int_{X_{\text{В}}-X}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma \right) dx + \int_{X_{\text{В}}}^{+\infty} f(x) \left(\int_{-\infty}^{X_{\text{Н}}-X} \varphi(\gamma) d\gamma + \int_{X_{\text{В}}-X}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma \right) dx, \quad (4)$$

где $f(x)$ и $\varphi(\gamma)$ – соответственно плотности распределений действительных размеров деталей и погрешности средства измерений.

Наиболее распространена методика определения вероятностных характеристик параметров разбраковки, изложенная в РД 50-98-86, но она реализована только для случая совпадения центра зоны рассеяния размеров с серединой поля допуска. Согласно этим рекомендациям можно определить следующие параметры разбраковки:

m (m_1) – количество неправильно принятых деталей, % от общего числа измеренных (количества принятых);

n (n_1) – количество неправильно забракованных деталей, % от общего числа измеренных (количества годных);

c (c_1) – вероятностная величина выхода измеряемого параметра за каждую границу допуска у неправильно принятых деталей (от количества принятых деталей).

Из вышеизложенного следует, что m , n и c будут равны как слева, так и справа от зоны рассеяния, причём в РД 50-98-86 эти значения уже удвоены. В ремонтном производстве совпадение центра распределения размеров с серединой поля допуска практически не встречается. С другой стороны, например,

¹ Шкаруба Н.Ж. Совершенствование метрологического обеспечения ремонтного производства агропромышленного комплекса: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 274 с.

количество неправильно забракованных деталей слева и справа имеет разный смысл с позиции оценки потерь, каждый из которых имеет свою стоимость.

Действительный размер детали и погрешность измерения оказывают влияние на результаты допускового контроля с выявлением следующих категорий: годные детали; неисправимый брак; исправимый брак; неправильно принятые детали в зоне неисправимого брака; неправильно принятые детали в зоне исправимого брака; неправильно забракованные детали в зоне неисправимого брака; неправильно забракованные детали в зоне исправимого брака.

Разработка методики оценки брака по вероятностным характеристикам сортировки деталей с учётом специфики ремонтного производства осуществлялась на основе математической модели формирования исправимого и неисправимого брака. Также рассматривалась модель, описывающая влияние результатов измерений, близких к границам поля допуска, на вероятностные характеристики сортировки деталей. Методика рассматривалась на деталях типа «Вал».

Результаты и их обсуждение. В ремонтном производстве детали, размер которых контролируют на различных этапах технологического процесса, условно подразделяют на детали типа «Отверстие» и детали типа «Вал». Детали типа «Вал» в процессе контроля сортируют на 3 группы: исправимый брак (ИБ), неисправимый брак (НБ) и годные детали (ГД). Для оценки влияния погрешности измерения на результаты контроля деталей типа «Вал» рассмотрим схему, представленную на рисунке 1.

По причине влияния погрешности измерения на результат контроля возникает вероятность того, что часть годных деталей типа «Вал» попадёт в исправимый брак, а часть – в неисправимый. Аналогично для деталей с дефектами появляется вероятность того, что они будут признаны годными¹.

В соответствии со схемой рисунка 1 составим интегральные зависимости, описывающие вероятностные характеристики результатов контроля деталей типа «Вал».

Вероятность появления деталей типа «Вал», действительные размеры которых находятся в интервале допуска и которые будут признаны годными, описывается интегралом:

$$P_{\text{дГГ}} = \int_{x_d^{\text{Н}}}^{x_d^{\text{В}}} f(x) \int_{x_d^{\text{Н}}-x}^{x_d^{\text{В}}-x} \varphi(\gamma) d\gamma dx, \quad (5)$$

где $x_d^{\text{В}}$, $x_d^{\text{Н}}$ – верхняя и нижняя границы интервала допуска детали типа «Вал»; $f(x)$ и $\varphi(\gamma)$ – соответственно функции распределения контролируемого параметра и погрешности измерения¹.

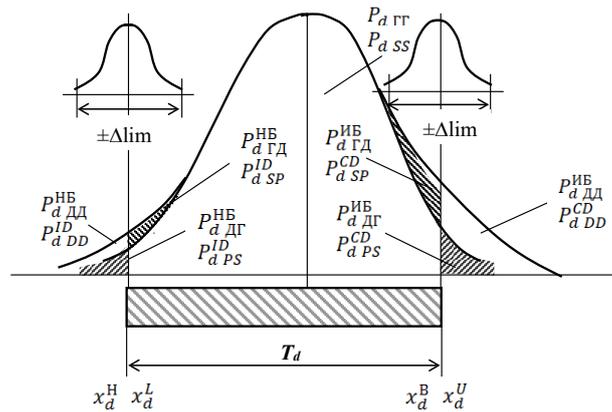


Рис. 1. Схема формирования брака при контроле валов в ремонтном производстве при условии сдвига центра настройки процесса финишной обработки в сторону исправимого брака:

$\pm\Delta\text{lim}$ – предельная погрешность измерения; T_d – допуск контролируемого вала; x_d^B, x_d^H – верхняя (верхний предельный размер) и нижняя (нижний предельный размер) границы интервала допуска контролируемого вала; $P_{d\text{ГД}}^{\text{ИБ}}$ – вероятность того, что контролируемые валы с действительными размерами в пределах интервала допуска будут отнесены к группе деталей с исправимым браком; $P_{d\text{ГД}}^{\text{НБ}}$ – вероятность того, что контролируемые валы с действительными размерами в пределах интервала допуска будут отнесены к группе деталей, имеющих неисправимый брак; $P_{d\text{ДГ}}^{\text{ИБ}}$ – вероятность того, что контролируемые валы с действительными размерами, выходящими за верхний предельный размер, будут отнесены к годным; $P_{d\text{ДГ}}^{\text{НБ}}$ – вероятность того, что контролируемые валы с действительными размерами, выходящими за нижний предельный размер, будут отнесены к годным; $P_{d\text{ДД}}^{\text{ИБ}}$ – вероятность того, что контролируемые валы с действительными размерами, выходящими за верхний предельный размер, будут отнесены к группе деталей с исправимым браком; $P_{d\text{ДД}}^{\text{НБ}}$ – вероятность того, что контролируемые валы с действительными размерами, выходящими за нижний предельный размер, будут отнесены к группе деталей с неисправимым браком; $P_{d\text{ГГ}}$ – вероятность того, что контролируемые валы с действительными размерами в пределах интервала допуска будут отнесены к группе годных деталей

Fig. 1. Pattern of defect formation during the control of shafts in repair production, provided that the center of adjustment of the finishing process is shifted towards a reparable reject:

$\pm\Delta\text{lim}$ – limit measurement error; T_d – controlled shaft tolerance; x_d^U, x_d^L – upper (upper limit size) and lower (lower limit size) limits of the tolerance interval of the controlled shaft; $P_{d\text{SP}}^{\text{CD}}$ – probability that controlled shafts with permissible dimensions within the permissible range will be assigned to the group of parts with a reparable rejects; $P_{d\text{SP}}^{\text{ID}}$ – probability that the controlled shafts with valid dimensions within the tolerance interval will be assigned to the group of parts having an irreparable reject; $P_{d\text{PS}}^{\text{CD}}$ – probability that controlled shafts with actual dimensions exceeding the upper limit size will be classified as suitable; $P_{d\text{PS}}^{\text{ID}}$ – probability that controlled shafts with actual dimensions exceeding the lower limit size will be classified as suitable; $P_{d\text{DD}}^{\text{CD}}$ – probability that controlled shafts with actual dimensions exceeding the upper limit size will be assigned to the group of parts with a reparable reject; $P_{d\text{DD}}^{\text{ID}}$ – probability that controlled shafts with actual dimensions exceeding the lower limit size will be assigned to a group of parts with an irreparable reject; $P_{d\text{SS}}$ – probability that controlled shafts with valid dimensions within the tolerance range will be assigned to the group of suitable parts

Аналогично опишем другие вероятности:

$$P_{d\text{ДД}}^{\text{НБ}} = \int_{-\infty}^{x_d^H} f(x) \left(\int_{-\infty}^{x_d^H-x} \varphi(\gamma) + \int_{x_d^B-x}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma \right) dx; \quad (6)$$

$$P_{d\text{ДД}}^{\text{ИБ}} = \int_{x_d^B}^{+\infty} f(x) \left(\int_{-\infty}^{x_d^H-x} \varphi(\gamma) + \int_{x_d^B-x}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma \right) dx; \quad (7)$$

$$P_{d\text{ГД}}^{\text{НБ}} = \int_{x_d^H}^{x_d^B} f(x) \int_{-\infty}^{x_d^H-x} \varphi(\gamma) d\gamma dx; \quad (8)$$

$$P_{d\text{ГД}}^{\text{ИБ}} = \int_{x_d^H}^{x_d^B} f(x) \int_{x_d^B-x}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma dx; \quad (9)$$

$$P_{d\text{ДГ}}^{\text{НБ}} = \int_{-\infty}^{x_d^H} f(x) \int_{x_d^B-x}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma dx; \quad (10)$$

$$P_{d\text{ДГ}}^{\text{ИБ}} = \int_{x_d^B}^{+\infty} f(x) \int_{x_d^H-x}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma dx. \quad (11)$$

Формулы (5-11) являются математической моделью, которая описывает влияние погрешности измерения на вероятностные характеристики распределения контролируемых параметров деталей типа «Вал». Выражение (5) формируется как произведение двух определённых интегралов, причем границы второго интеграла зависят от переменной функции первого интеграла.

Параметры разбраковки в большей степени зависят от закона распределения контролируемого параметра и протяжённости распределения. Поэтому для их определения необходимо иметь априорную статистическую информацию о рассеянии действительных размеров объекта контроля.

Рассмотрим расчёт вероятностных характеристик параметров разбраковки на примере диаметров коренных шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-238, восстановленных под ремонтный размер. Экспериментальные измерения диаметров восстановленных коренных шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-238 обработаны и представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Проведенными исследованиями выявлено, что рассеяние восстановленных под ремонтный размер диаметров коренных шеек коленчатых валов подчиняется закону нормального распределения (проверено по критерию согласия Пирсона с уровнем значимости 0,01). Годными являются 95,4% шеек, 3,20% шеек с исправимым браком и 1,31% с неисправимым браком.

Используя полученные характеристики распределений диаметров шеек коленчатых валов, можно определить вероятностные характеристики параметров разбраковки для различных средств измерений. Результаты расчётов представлены в таблице 2. Расхождение результатов разбраковки теоретических

и экспериментальных исследований представлено в таблице 3.

Количественное значение вероятностных характеристик параметров сортировки при прочих равных условиях в значительной степени зависит от характеристик распределения и смещения середины зоны рассеяния относительно поля допуска.

При неправильном забраковании и неправильном принятии коренных шеек характер потерь от брака будет различным. Неправильно забракованные коленчатые валы с шейками, имеющими неисправимый брак, будут утилизированы в виде лома. Взамен необходимо будет приобрести новый вал, появятся потери от неправильного забракования слева от зоны рассеяния. Неправильно забракованные коленчатые валы с шейками, имеющими исправимый брак, отправляются на переделку. В этом случае потери на один коленчатый вал будут определяться себестоимостью переделки – это потери справа от зоны рассеяния. Неправильно принятые коленчатые валы с шейками, имеющими брак как слева, так и справа от зоны рассеяния, отправляются на сборку. В этой ситуации потери возрастут значительно, но только в случае превышения границы наибольшего размера, так как возможно проворачивание вкладышей, и потребуются переборка двигателя. При нарушении границы по нижнему размеру снизится ресурс вала, и потери возникнут только у потребителя.

Таблица 1
 Параметры распределения диаметров коренных шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-238, восстановленных под ремонтный размер

Table 1

Parameters of diameter distribution of the main bearing journals of the YaMZ-238 engine crankshafts restored to the repair size

Параметр распределения <i>Distribution parameter</i>	Коренные шейки <i>Main bearing journals</i>
Зона рассеяния, мм / <i>Scatter zone, mm</i>	0,0324
Величина сдвига, мм / <i>Value of the shift, mm</i>	0,001
Коэффициент риска для области возникновения неисправимого брака <i>Risk factor for the irreparable reject area</i>	2,22
Коэффициент риска для области возникновения исправимого брака <i>Risk factor for the reparable reject area</i>	1,85
Вероятный процент неисправимого брака, % <i>Probable percentage of irreparable reject, %</i>	1,31
Вероятный процент исправимого брака, % <i>Probable percentage of reparable reject, %</i>	3,20
Суммарный брак, % <i>Total reject, %</i>	4,52
Вероятный процент годных валов, % <i>Probable percentage of usable shafts, %</i>	95,48

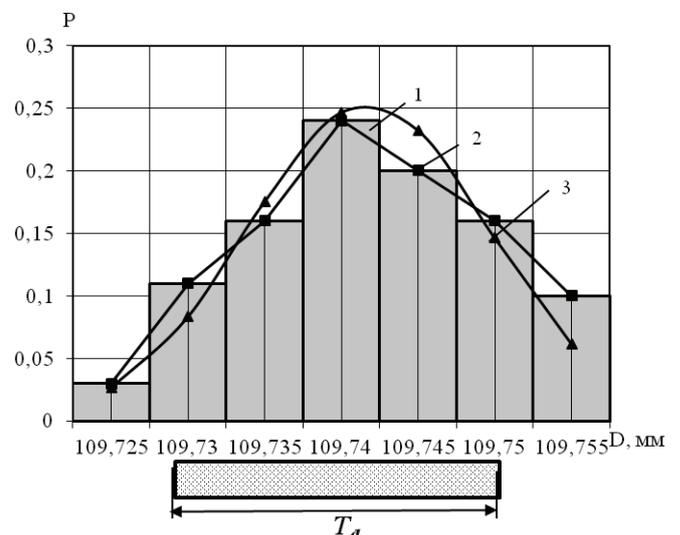


Рис. 2. Рассеяние размеров коренных шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-238:
 1 – полигон эмпирического распределения;
 2 – гистограмма эмпирического распределения;
 3 – теоретическая кривая распределения

Fig. 2. Dispersion of the sizes of the main bearing journals of the YaMZ-238 engine crankshafts:
 1 – empirical distribution polygon;
 2 – histogram of the empirical distribution;
 3 – theoretical distribution curve

Таблица 2

Результаты расчёта неправильно принятых и неправильно забракованных коренных шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-238 при обработке под ремонтный размер

Table 2

Calculation results of incorrectly accepted and incorrectly rejected main bearing journals of crankshafts of the YAMZ-238 engines when machined for the repair size

Параметр / Parameter	Средство измерений Measurement instrument	
	1*	2**
Контролируемый размер, d , мм / Controlled size, d , mm	109,75 _{0,022}	
Предельная погрешность СИ, Δlim , мкм / Maximum error of MI, Δlim , mkm	±6	±3,5
СКО погрешности измерения, $\sigma_{\text{мер}}$, мкм / Mean square deviation of the measurement error, $\sigma_{\text{мер}}$ mkm	3,00	1,75
Коэффициент точности измерения, $A_{\text{мер}}$, % / Measurement accuracy coefficient, $A_{\text{мер}}$ %	13,64	7,95
Количество неправильно принятых коренных шеек с исправимым браком, m , % Number of incorrectly accepted main bearing journals with repairable rejects, m , %	1,3	1,8
Количество неправильно принятых коренных шеек с неисправимым браком, m , % Number of incorrectly accepted main bearing journals with irreparable rejects, m , %	2,7	0,75
Количество неправильно забракованных коренных шеек с исправимым браком, n , % Number of incorrectly rejected main bearing journals with repairable rejects, n , %	6,2	3,2
Количество неправильно забракованных коренных шеек с неисправимым браком, n , % Number of incorrectly rejected main bearing journals with irreparable rejects, n , %	4,3	2,1
Итого брака, % / Total reject, %	14,50	7,85

*Микрометр МР-100 с ценой деления 0,002 мм / * Micrometer MR-100 with a sensitivity of 0.002 mm

**Скоба рычажная СР-100 с ценой деления 0,002 мм / ** Lever bracket SR-100 with a sensitivity of 0.002 mm

Таблица 3

Расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований забраковки коренных шеек

Table 3

Discrepancy of the results of theoretical and experimental studies on the rejection of main bearing journals

Параметр Parameter	Теоретическое исследование Theoretical study	Экспериментальное исследование Experimental study
Вероятный процент неисправимого брака, % / Probable percentage of irreparable reject, %	1,31	2,85
Вероятный процент исправимого брака, % / Probable percentage of repairable reject, %	3,20	5,00
Суммарный брак, % / Total reject, %	4,52	7,85

Выводы

Разработанный математический аппарат и методика для оценки параметров сортировки результатов допускового контроля при смещении зоны рассеяния относительно допуска позволили сформировать более дифференцированный и уточненный методологический подход к оценке потерь при забраковке деталей.

Апробация математической модели оценки брака по вероятностным характеристикам при обработке под ремонтный размер коренных шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-238 показала, что наблюдается смещение центра рассеяния в сторону

исправимого брака на 1 мкм. Это приводит к различному количеству неправильно принятых и неправильно забракованных шеек справа и слева от середины поля допуска. Неправильно забракованные коленчатые валы с шейками, имеющими неисправимый брак, отправляются на утилизацию (2,8% по коренным шейкам). Неправильно забракованные коленчатые валы с шейками, имеющими исправимый брак, отправляются на переделку (6,2% по коренным шейкам). Неправильно принятые коленчатые валы с шейками, имеющими брак, отправляются на сборку (1,3% по коренным шейкам).

Список литературы

1. Глухов В.И., Гриневиц В.А., Шалай В.В. Система допусков линейных размеров максимума материала и их контроль калибрами // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 2. С. 12-16. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2018-6-2-12-16>

References

1. Glukhov V.I., Grinevich V.A., Shalay V.V. Tolerance system for maximum material linear sizes and their inspection by calipers. *Dinamika Sistem, Mekhanizmov i Mashin*. 2018;6(2):12-16. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2018-6-2-12-16>

2. Шибанов Г.П. Допусковый контроль авиационной техники в объёме ее предполетной проверки // Полет: Общероссийский научно-технический журнал. 2019. № 4. С. 53-58. EDN: TJHJZC.
3. Пицык В.В. Задача прогнозирования точности измерений при допусковом контроле систем // Измерительная техника. 2004. № 7. С. 3-6. EDN: PDXGVV.
4. Темасова Г.Н. Допусковый контроль валов в ремонтном производстве // Сельский механизатор. 2023. № 8. С. 40-41. EDN: PAFUWP.
5. Кутяйкин В.Г. Технические средства для измерений, испытаний и контроля: терминология // Компетентность. 2019. № 7. С. 34-37. EDN: PWEXQX.
6. Лебедев П.А. К вопросу повышения надежности и эффективности МТА при выполнении технологических процессов // Наука в Центральной России. 2019. № 6. С. 58-66. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-6-58-66>
7. Леонов О.А., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Леонов Д.О., Зимогорский В.К. Выбор средств измерений для дефектации коренных опор двигателя ЯМЗ // Агроинженерия. 2022. № 24 (6). С. 59-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-59-63>
8. Чигрик Н.Н. Количественная оценка неопределенности среднего зазора и натяга в сопряжениях одноименных промежуточных и крайних размерных групп // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10, № 1. С. 11-29. <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-1-11-29>
9. Серенков П.С., Рудницкий Ф.И., Сацукевич А.А., Волкотруб Р.Е. Повышение эффективности техники планирования эксперимента на этапе разработки инновационных материалов и покрытий // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Т. 8. С. 348-351. EDN: ITWGX1.
10. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Нормирование погрешности косвенных измерений при приёмо-сдаточных испытаниях двигателей // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 23-27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-23-27>
11. Ефремов Л.В. Проблемы учёта случайных и систематических погрешностей в прямых многократных измерениях // Мир измерений. 2012. № 10. С. 52-57. EDN: PCUISV.

Информация об авторах

- Галина Николаевна Темасова**¹, канд. экон. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>; temasova@rgau-msha.ru
- Олег Альбертович Леонов**², д-р техн. наук, профессор;
<https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; oaleonov@rgau-msha.ru
- Нина Жоровна Шкаруба**³, д-р техн. наук, профессор;
<https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>;
shkaruba@rgau-msha.ru
- Юлия Геннадьевна Вергазова**⁴, канд. техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; vergazova@rgau-msha.ru
- Александр Васильевич Чепурин**⁵, канд. техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-0865-3263>; av.tchepurin@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

- Г.Н. Темасова – концептуализация, методология, проведение исследования, руководство исследованием
О.А. Леонов – администрирование проекта, ресурсы
Н.Ж. Шкаруба – верификация данных, формальный анализ
Ю.Г. Вергазова – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование
А.В. Чепурин – визуализация, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 29.05.2023, после рецензирования и доработки 25.10.2023; принята к публикации 25.10.2023

2. Shibanov G.P. Tolerance testing of aviation equipment during the preflight check. *Polet. Obshcherossiyskiy Nauchno-Tekhnicheskii Zhurnal*. 2019;4:53-58. (In Rus.)
3. Pitsyk V.V. Predicting the accuracy of measurements in the tolerance control of systems. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2004;7:3-6. (In Rus.)
4. Temasova G.N. Tolerance control of shafts in repair production. *Selskiy Mekhanizator*. 2023;8:40-41. (In Rus.)
5. Kutyaykin V.G. Technical means for measurement, testing and control: Terminology. *Competency (Russia)*. 2019;7:34-37. (In Rus.)
6. Lebedev P.A. On improving the reliability and efficiency of machine-and-tractor units performing technological processes. *Science in the Central Russia*. 2019;6:58-66. (In Rus.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-6-58-66>
7. Leonov O.A., Golinitzkiy P.V., Antonova U.Yu., Leonov D.O., Zimogorsky V.K. Choosing measuring instruments for the fault detection of the main bearing supports of the YAMZ engine. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022;24(6):59-63. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-59-63>
8. Chigrik N.N. Quantitative estimation of the uncertainty of the average clearance and interference in the conjugations of the eponymous intermediate and extreme dimensional groups. *Computational Nanotechnology*. 2023;10(1):11-29. (In Rus.) <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-1-11-29>
9. Serenkov P.S., Rudniczkij F.I., Satsukevich A.A., Volkotrub R.E. Improving the efficiency of designing experiment techniques at the stage of development of innovative materials and coatings. *Topical Issues of Mechanical Engineering*. 2019;8:348-351. (In Rus.)
10. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Regulation of the indirect measurement errors in approval tests of engines. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022;8:23-27. (In Rus.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-23-27>
11. Efremov L.V. Problems of recording random and systematic errors in direct multiple measurements. *Mir Izmereniy*. 2012;10:52-57. (In Rus.)

Information about the authors

- Galina N. Temasova**¹, CSc (Econ), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>; temasova@rgau-msha.ru
- Oleg A. Leonov**², DSc (Eng), Professor;
<https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; oaleonov@rgau-msha.ru
- Nina Zh. Shkaruba**³, DSc (Eng), Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; shkaruba@rgau-msha.ru
- Yulia G. Vergazova**⁴, CSc (Eng), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; vergazova@rgau-msha.ru
- Aleksandr V. Chepurin**⁵, CSc (Eng), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-0865-3263>; av.tchepurin@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Contribution of the authors

- G.N. Temasova – conceptualization, methodology, conducting research, research supervision
O.A. Leonov – project administration, resources
N.Zh. Shkaruba – data verification, formal analysis
Y.G. Vergazova – draft finalizing and editing
A.V. Chepurin – visualization, original draft preparation

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 29.05.2023; revised 25.10.2023; accepted 25.10.2023

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363:636.086.5

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-46-52>



Предпосевная УФ-обработка семян сои: проращивание на витаминный корм

В.Ю. Страхов^{1✉}, *С.В. Вендин*², *Ю.В. Саенко*³

^{1,2,3} Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина; п. Майский, Белгородская обл., Россия

¹ stakhov.94@list.ru

² elapk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0482-6657>

³ yuriy311300@mail.ru

Аннотация. Введение в рацион животных пророщенного зерна сои обеспечивает высокое содержание протеина в корме, повышает его питательность и поедаемость. В технологии приготовления зелёных витаминных кормов на основе сои для обеззараживания семян перед проращиванием предложено использовать УФ-облучение. С целью определения оптимальных режимов предпосевной обработки семян по представленной методике проведено УФ-облучение семян сои на разработанной ранее экспериментальной установке ленточного типа. Проращивание обработанных семян осуществлялось в закрытом коробе с принудительной вентиляцией и встроенной фитолампой. В качестве варьируемых факторов выбирались энергетическая освещённость УФ-облучения и время УФ-обработки семян перед проращиванием, а в качестве функции отклика – длина ростков сои на 5-е сутки проращивания. По экспериментальным данным получено регрессионное уравнение, описывающее влияние параметров УФ-обработки на длину ростков, построены графические зависимости изменения функции отклика в интервалах варьирования. Экспериментальными исследованиями установлен оптимальный режим УФ-обработки семян сои, обеспечивающий максимальное значение ростков сои. При удельной мощности 9 Вт/м² с экспозицией УФ-облучения от 30 до 90 с длина ростков на 5-е сутки после начала проращивания составила 120 мм (при 109 мм в контрольных образцах). Предложенный режим рекомендован для предпосевной обработки семян при проращивании семян сои на витаминный корм животным.

Ключевые слова: зелёный витаминный корм, проращивание семян сои, УФ-обработка, время УФ-обработки, энергетическая освещённость, УФ-облучение, длина ростков

Для цитирования: Страхов В.Ю., Вендин С.В., Саенко Ю.В. Предпосевная УФ-обработка семян сои: проращивание на витаминный корм // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 46-52. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-46-52>

ORIGINAL PAPER

Pre-sowing UV treatment of soybean seeds: sprouting for vitamin feed

V. Yu. Strakhov^{1✉}, *S. V. Vendin*², *Yu. V. Saenko*³

^{1,2,3} Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin; Belgorod region, Russia

¹ stakhov.94@list.ru

² elapk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0482-6657>

³ yuriy311300@mail.ru

Abstract. Introduction of sprouted soybean grain into animal diet provides high protein content in feed, increases its nutrition and digestibility. In the technology of preparation of green vitamin forages based on soybean for seed disinfection before sprouting it is proposed to use UV-irradiation. In order to determine the optimal modes of seed pre-sowing treatment according to the presented methodology, UV-irradiation of soybean seeds was carried out on the previously developed experimental unit of belt type. The treated seeds germinated in a closed box with forced ventilation and a built-in phytolamp. The energy illuminance of UV irradiation and the time of UV treatment

of seeds before sprouting were selected as the variable factors, and the length of soybean sprouts on the 5th day of sprouting was selected as the response function. The regression equation describing the influence of UV-treatment parameters on sprout length was obtained from experimental data, and graphical dependences of the response function changes in the variation intervals were plotted. Experimental studies have established the optimal mode of UV-treatment of soybean seeds, providing the maximum value of soybean sprouts. At a specific power of 9 W/m² with UV-irradiation exposure from 30 to 90 s the length of sprouts on the 5th day of sprouting was 120 mm (with 109 mm in control samples). The proposed mode is recommended for pre-sowing seed treatment during sprouting of soybean seeds for vitamin feed for animals.

Keywords: green vitamin feed, sprouted grain, soy, UV treatment, UV treatment duration, irradiance, UV irradiation, length of sprouts

For citation: Strakhov V.Yu., Vendin S.V., Sayenko Yu.V. Pre-sowing UV treatment of soybean seeds: sprouting for vitamin feed. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):46-52. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-46-52>

Введение. Одной из проблем развития животноводства на территории нашей страны является обеспечение животных полноценными кормами¹.

Соевые бобы, содержащие до 45% протеина, незаменимые аминокислоты, метионин, витамины, микроэлементы и клетчатку, и соевое масло, восполняющее дефицит полиненасыщенных жирных кислот омега-3 и омега-6, позволяют использовать сою при откорме животных и особенно при откорме молодняка.

Пророщенное зерно, в том числе сои, вводимое в рацион животных, значительно повышает питательность и поедаемость кормов [1-3]. Зелёный витаминный корм способствует наиболее полной реализации генотипа, продлению хозяйственного использования животных, рождению здорового приплода, увеличению продуктивности и сохранению здоровья. Существующие технологии приготовления зелёных кормов на основе сои включают в себя термическую обработку, которая приводит к увеличению затрат труда и электроэнергии и препятствует широкому распространению технологий получения зелёных витаминных кормов на основе соевого зерна. Для обеззараживания семян сои перед проращиванием тепловую обработку семян можно заменить на УФ-облучение, обеспечивающее снижение общей микробной обсеменённости на поверхности семян, уничтожение плесени и грибов. К тому же УФ-облучение семян по сравнению с технологиями на основе тепловой обработки требует меньших затрат энергии на единицу продукции.

Научная литература содержит достаточно сведений положительного использования пророщенного зерна пшеницы и ячменя для кормления

животных [4]. Значительно реже учёные рассматривают кормовой потенциал пророщенной сои, что можно связать с присущими соевым бобам веществами, оказывающими вредное воздействие, снижающими питательную ценность (ингибиторы протеаз, лектины и гемагглютинины, сапонины), а также веществами, вызывающими эндокринные и рахитические расстройства. Инактивации ядовитых антипитательных веществ можно добиться микронизацией, экстрадированием, СВЧ-обработкой и проращиванием.

Для реализации УФ-обработки семян перед проращиванием необходимо задавать режимы обработки как по интенсивности УФ-воздействия, так и по времени УФ-обработки.

Цель исследований: изучение влияния режимов предпосевной УФ-обработки семян на эффективность проращивания сои.

Материалы и методы. УФ-облучение неспособно проникать в глубь слоя семян, поэтому для равномерности обработки необходимо обеспечить высоту слоя в одно семя. Данные условия обработки наилучшим способом можно реализовать на нескольких устройствах: вибрационном транспортере, ленточном транспортере и обработке семян на горизонтальной или наклонной поверхностях. Каждый из способов имеет в совокупности недостатки и преимущества.

Конструкция вибрационного транспортера для УФ-облучения семян авторского коллектива во главе с В.П. Архиповым [5] имеет недостатки, связанные со сложностью управления скоростью движения семян на вибрационном транспортере в зоне обработки под УФ-лампами. В процессе работы устройства вибрация лотка способствует скоплению пыли от семян, что в значительной мере снижает бактерицидный поток источника облучения. Необходима периодическая очистка лампы от пыли. Неоспоримым преимуществом является высокая равномерность УФ-облучения за счёт постоянного вращения семян

¹ Походня Г.С. Свиноводство и технология производства свинины // Сборник трудов научной школы профессора Г.С. Походни: Специальный выпуск № 2. Использование пророщенного зерна в рационах свиней; Под общ. ред. Г.С. Походни. Белгород: Издательство БелГСХА, 2009. 68 с.

относительно своей оси при перемещении по поверхности вибрационного транспортера.

Устройства, реализующие принцип УФ-облучения семян на поверхности, обладают низкой производительностью. При обработке на горизонтальной поверхности в устройствах, созданных В.А. Савельевым и Е.А. Васеневым [6, 7], отсутствуют узлы для механизации подачи семян под УФ-лампы и извлечения обработанных семян. В установках для обработки семян на наклонных поверхностях затрудняется процесс управления дозой облучения [8]. Для повышения дозы требуются повторные обработки или возможность увеличения энергетической освещенности.

В конструкциях ленточных транспортеров для УФ-облучения семян, созданных И.Р. Владыкиным и Н.И. Боханом [9, 10], нереализованной является возможность управления скоростью движения ленты транспортера.

Для проведения УФ-обработки семян ранее разработана экспериментальная установка ленточного типа (рис. 1) [11]. В конструкции устройства предусмотрены бункер для загрузки семян, ленточный транспортер для перемещения массы семян в зону обработки. Ленточный транспортер приводит в движение мотор-редуктор. Применение ленточного транспортера в совокупности с преобразователем частоты позволяет управлять скоростью перемещения семян под источниками УФ-облучения и обеспечивать режимы обработки семян различных сельскохозяйственных культур с учетом рекомендуемой дозы облучения. Для равномерного распределения семян на поверхности ленточного транспортера предусмотрен разравниватель семян с заслонкой. Над ленточным транспортером расположены параболические отражатели с ультрафиолетовыми лампами. Отражатели выполнены из травленного алюминия. Согласно исследованиям данный материал обладает наилучшим коэффициентом отражения (близким к 88%) УФ-излучения с длиной волны 254 нм [12]. На поверхности ленточного транспортера в зоне обработки семян смонтирована щетка с приводом, которая ворошит семена и повышает равномерность облучения обрабатываемой культуры со всех сторон. Устройство выполнено на раме.

Предложенное устройство позволяет механизировать и автоматизировать процесс предпосевной УФ-обработки семян различных сельскохозяйственных культур с целью обеззараживания от плесени и грибков и стимуляции ростовых процессов в семенах перед проращиванием.

Интенсивность УФ-воздействия на семена можно регулировать мощностью ультрафиолетовых ламп и высотой их подвеса над слоем семян.

Время УФ-обработки семян определяется временем прохождения семенами зоны облучения и регулируется скоростью движения транспортной ленты.

В целях использования способа были проведены предварительные экспериментальные исследования по оценке влияния режимов предпосевной УФ-обработки семян на эффективность проращивания и определения рекомендуемых режимов для реализации процесса обработки семян на установке ленточного типа.

В качестве объекта исследований были использованы семена сои.

В качестве варьируемых воздействующих факторов при проведении экспериментальных исследований приняты энергетическая освещенность УФ-облучения, Вт/м² (X1), и время УФ-обработки, с (X2) (табл. 1). В производстве кормов необходимо получить зеленую массу ростков пророщенного семени, содержащую макро-, микроэлементы

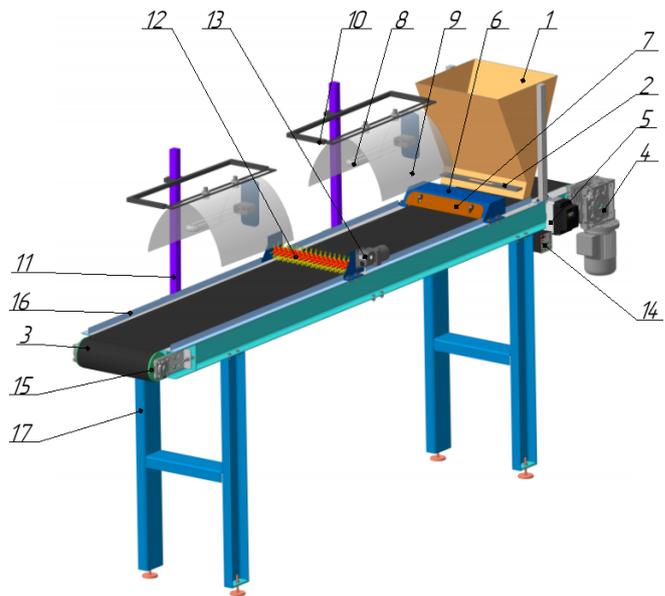


Рис. 1. Модель устройства для ультрафиолетовой обработки семян ленточного типа:

- 1 – бункер; 2 – заслонка; 3 – лента транспортера;
- 4 – мотор-редуктор; 5 – преобразователь частоты;
- 6 – разравниватель семян; 7 – заслонка разравнивателя;
- 8 – ультрафиолетовая лампа; 9 – параболический отражатель;
- 10 – подвеска для светильника; 11 – стойка светильника;
- 12 – щетка; 13 – привод щетки; 14 – блок управления щеткой;
- 15 – барабан; 16 – борт; 17 – рама

Fig. 1. Model of a ribbon-type device for UV treatment of seeds:

- 1 – hopper; 2 – flap; 3 – conveyor belt; 4 – gear motor;
- 5 – frequency converter; 6 – seed leveler; 7 – leveller flap;
- 8 – UV lamp; 9 – parabolic reflector;
- 10 – suspension for the lamp; 11 – lamp stand;
- 12 – brush; 13 – brush drive; 14 – brush control unit;
- 15 – drum; 16 – side; 17 – frame

Уровни варьирования факторов

Table 1

Levels of factor variation

Наименование фактора <i>Name of the factor</i>	Уровни варьирования факторов <i>Levels of factor variation</i>		Интервал варьирования <i>Range of variation</i>
	-1	+1	
Энергетическая освещённость УФ-облучения, Е, Вт/м ² (X1) <i>UV irradiance, E, W/m²</i>	1	9	4
Время УФ-облучения, T _{ОБЛУЧ} , с (X2) / <i>Time of exposure to UV, T_{ОБЛУЧ}, sec.</i>	30	90	30

и витамины, поэтому в качестве критерия оптимизации принимали длину ростков на 5-е сутки [13].

Материалы и методы. Методика проведения экспериментов заключалась в следующем.

1. В соответствии с планом эксперимента проводилась обработка образцов семян сои. В качестве источника ультрафиолетового облучения использовалась лампа типа UVT ДКБУ 7 L 2G7 СОМРАСТ с доминирующим спектром излучения, соответствующим длине волны 253,7 нм, мощностью 7 Вт. При задании режимов УФ-облучения уровень энергетической освещённости, Вт/м², на поверхности обрабатываемого материала контролировался предварительными замерами с использованием УФ-радиометра «ТКА-ПКМ» (12). Для обеспечения энергетической освещённости 1 Вт/м² УФ-лампу размещали на расстоянии 0,25 м от поверхности обрабатываемого материала, а для обеспечения энергетической освещённости 9 Вт/м² источник облучения размещали на расстоянии 0,1 м от поверхности обрабатываемого материала.

2. Образцы семян помещали в ёмкости для проращивания. Для удержания влаги семена в емкостях размещали на коврик из материала спанлейс, который на 80% состоит из вискозы. При проращивании контейнеры с семенами размещали в закрытом коробе с принудительной вентиляцией и встроенной фитолампой (рис. 2).

3. Во время проращивания, в течение каждых суток, семена каждые 3 ч увлажняли.

4. При проращивании каждые сутки в течение 4 ч (с 9-00 до 13-00) обработанные и контрольные образцы семян, находящиеся на проращивании, подвергали искусственному освещению под фитолампой Camelion (спектр излучения синий – 23%, красный – 77%). В остальное время суток лампу выключали, и семена проращивались в темноте.

5. Срок проращивания составлял 5 сут. (рис. 3), по истечении которого проводился замер длины ростков пророщенного зерна сои.



Рис. 2. Устройство для проращивания семян

Fig. 2. Seed sprouting device



Рис. 3. Проращивание семян сои (5-е сутки)

Fig. 3. Soybeans on the fifth day of sprouting

Результаты и их обсуждение. Выявлено влияние воздействующих факторов X1 (энергетическая освещённость УФ-облучения, Вт/м²) и X2 (время УФ-обработки, с) на динамику и абсолютное значение длины ростков сои, мм, при проращивании (табл. 2, рис. 4).

На рисунке 4 зелёным цветом выделена область, где длина ростков превышает 110 мм. Отметим увеличение длинны ростков сои при увеличении удельной мощности ультрафиолетового облучения. Наибольшая длина ростков (110...120 мм) наблюдается в диапазоне обработки от 7 до 9 Вт/м² с экспозицией облучения от 30 до 90 с. Анализируя поверхность, можно отметить увеличение длины ростков при малых значениях удельной мощности 1...2 Вт/м² и времени облучения от 30 до 75 с. Однако для полноценного обеззараживания поверхности семян от патогенных

Таблица 2

Матрица плана и результаты эксперимента

Table 2

Matrix of the plan and the experiment results

Номер опыта / Experiment Number	Фактор X1 / Factor X1	Фактор X2 / Factor X2	Длина ростка, мм / Sprout length, mm	HCP ₀₅
1	-1	-1	114,5	2,8
2	1	-1	115,9	3,6
3	-1	1	104,4	4,2
4	1	1	118,0	4,0
5	-1	0	110,4	3,8
6	1	0	119,9	3,5
7	0	-1	101,0	3,9
8	0	1	102,2	3,4
9	0	0	109,5	3,2
10	Контроль / Control		109,8	2,7

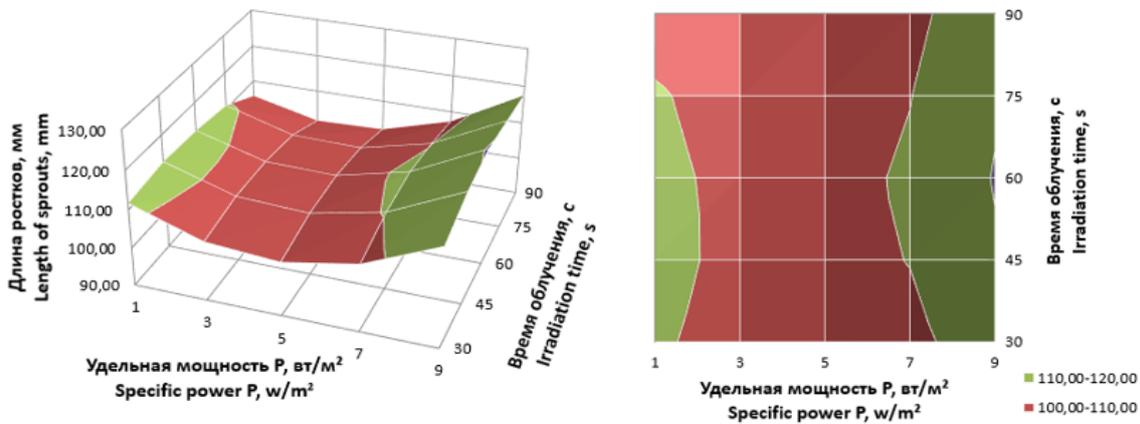


Рис. 4. Поверхность отклика длины ростка сои в зависимости от удельной мощности УФ-облучения и продолжительности УФ-облучения

Fig. 4. Response surface of the soybean sprout length depending on the natural values of the specific power of UV irradiation and the duration of UV irradiation

микроорганизмов удельной мощности УФ-облучения недостаточно в данных режимах. Поскольку производимые зелёные корма должны отвечать всем зоотехническим требованиям по содержанию патогенных микроорганизмов, плесени и дрожжей, то для производства рекомендуется обработка в режимах с удельной мощностью от 7 до 9 Вт/м².

Наблюдаемый на графике «провал» длины ростков в промежутке от 2 до 6 Вт/м² с пиком при удельной мощности, близкой к значению 5 Вт/м², можно объяснить неоднозначностью ответной реакции растения на данный режим УФ-обработки. Обрабатываемые семена состоят из сильных, травмированных и ослабленных единиц. В каждом отдельном семени индивидуальными являются особенности работы ферментативного аппарата и систем жизнедеятельности [14-17].

Исследования проводились в соответствии с ортогональным планом второго порядка полного 2-факторного эксперимента (табл. 1) в 4-кратной повторности в каждой точке плана эксперимента.

Воспроизводимость опытов оценивалась с использованием критерия Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f_2 = 12$. Расчётное значение критерия Кохрена $G_{расч} = 0,12$ не превышало допустимых значений $G_{0,05} = 0,4$ ($0,12 \leq 0,4$).

После обработки данных было получено регрессионное уравнение, описывающее влияние УФ-облучения во время роста, которое в кодированных переменных имеет вид:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2, \quad (1)$$

где X_1 – удельная мощность источника ультрафиолетового облучения, о.е ($-1 \leq X_1 \leq +1$); X_2 – продолжительность УФ-облучения, о.е ($-1 \leq X_2 \leq +1$); $B_0 = 106,81$; $B_1 = 3,98$; $B_2 = -1,04$; $B_{12} = 1,95$; $B_{11} = 9,70$; $B_{22} = -3,85$.

Значимость коэффициентов проверялась по критерию Стьюдента ($t_{кр}$) при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f_2 = 12$. Менее значимым является коэффициент B_2 . Все остальные коэффициенты

уравнения (1) являются значимыми, следовательно, факторы достаточно коррелированы между собой. Адекватность модели оценивалась по критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Расчётное значение критерия Фишера $F_{\text{расч}} = 1,04$ не превышало допустимых значений $F_{0,05} = 2,57$ ($1,04 \leq 2,57$).

Расчётное уравнение регрессии в натуральных переменных получается заменой кодированных переменных в уравнении (1) их натуральными аналогами в соответствии с таблицей 1 по формулам:

$$X_1 = (E_n - 5) / 4; \quad (2)$$

$$X_2 = (t_{\text{обп}} - 60) / 30, \quad (3)$$

где E_n – удельная мощность источника ультрафиолетового облучения, Вт/м²; $t_{\text{обп}}$ – продолжительность облучения, с.

Список литературы

1. Hafla A.N., Soder K.J., Brito A.F., Rubano M.D., Dell C.J. Effect of sprouted barley grain supplementation of an herbage-based or haylage-based diet on ruminal fermentation and methane output in continuous culture. *Journal of Dairy Science*. 2014;97(1):7856-7869. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8518>
2. Yeon-Ji Kim, Su Hyeon Hwang, Yaoyao Jia, Woo-Duck Seo, Sung-Joon Lee. Barley sprout extracts reduce hepatic lipid accumulation in ethanol-fed mice by activating hepatic AMP-activated protein kinase. *Food Research International*. 2017;101:209-217. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.08.068>
3. Страхов В.Ю., Вендин С.В., Саенко Ю.В. Результаты исследований по оценке влияния предпосевной УФ-обработки и режимов искусственного освещения при проращивании люпина на витаминный корм // *Агроинженерия*. 2021. № 3 (103). С. 36-42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-36-42>
4. Вендин С.В., Саенко Ю.В. Проращивание семян ячменя на витаминный корм свиноматкам и поросётам-отъёмышам // *Кормопроизводство*. 2011. № 11. С. 42-43. EDN: OKGKLN.
5. Способ обеззараживания сыпучих продуктов и устройство для его осуществления: Патент RU2279806 С2, МПК А23В 9/06, А23Л 3/54 / В.П. Архипов, В.И. Базилов, А.С. Камруков, Н.П. Козлов, А.И. Крылов, С.Г. Шашковский, М.С. Яловик; заявл. 27.05.2004; опубл. 20.07.2006, Бюл. № 20. EDN: PQJPVN.
6. Способ предпосевной обработки семян пшеницы: Патент RU2318305 С1, МПК А01С 1/00 / В.А. Савельев, О.А. Курочкина; № 2006116002/13; заявл. 10.05.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. EDN: SYOIQI.
7. Устройство предпосевной обработки семян: Патент RU142430 U1, МПК А01С 1/00 / Е.А. Васенев, В.Ю. Романов, Д.А. Корепанов, А.В. Бывальцев; № 2013148152/13; заявл. 29.10.2013; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 7. EDN: АЕОНВЗ.
8. Способ предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур: Патент RU2537919 С2, МПК А01С 1/00 / В.А. Федотов, И.В. Алтухов, В.Д. Очиров; № 2013100424/13; заявл. 09.01.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 22. EDN: МСОАОФ.
9. Устройство для предпосевной обработки семян: Патент RU54714 U1, МПК А01С1/00 / И.Р. Владыкин, Н.П. Кондратьева; № 2006105078/22; заявл. 17.02.2006; опубл. 27.07.2006. EDN: WYXBUM.

Выводы

При проращивании семян сои на витаминный корм животным рекомендован режим предпосевной УФ-обработки семян с удельной мощностью 9 Вт/м² с экспозицией УФ-облучения от 30 до 90 с, при котором длина ростков в течение 5 суток после начала проращивания составила 120 мм (в контрольных образцах – 109 мм). Можно предположить, что повышение эффективности проращивания семян сои обусловлено суммарным эффектом УФ-обеззараживания и предпосевной стимуляции роста.

Для оценки вклада обеззараживания или предпосевной стимуляции необходимо проведение дополнительных исследований, учитывающих обеззараживающее (угнетающее) воздействие на патогенную микрофлору (плесень и грибки).

References

1. Hafla A.N., Soder K.J., Brito A.F., Rubano M.D., Dell C.J. Effect of sprouted barley grain supplementation of an herbage-based or haylage-based diet on ruminal fermentation and methane output in continuous culture. *Journal of Dairy Science*. 2014;97(1):7856-7869. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8518>
2. Yeon-Ji Kim, Su Hyeon Hwang, Yaoyao Jia, Woo-Duck Seo, Sung-Joon Lee. Barley sprout extracts reduce hepatic lipid accumulation in ethanol-fed mice by activating hepatic AMP-activated protein kinase. *Food Research International*. 2017;101:209-217. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.08.068>
3. Strakhov V.Yu., Vendin S.V., Saenko Yu.V. Results of studies to assess the effect of pre-sowing UV treatment and artificial lighting modes during the germination of lupine grown for vitamin feed. *Agricultural Engineering*. 2021;3:36-42. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-36-42>
4. Vendin S.V., Saenko Yu.V. Germination of barley seeds grown for vitamin feed for sows and wean pigs. *Fodder Production*. 2011;11:42-43. (In Rus.).
5. Arkhipov V.P., Bazikov V.I., Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Krylov A.I., Shashkovskiy S.G., Yalovik M.S. Method of disinfection of bulk products and the device for its implementation: Patent No.2279806 Russian Federation, IPC A23V9/06 (2006.01), A23L3/54 (2006.01). 2005. (In Rus.).
6. Savelyev V.A., Kurochkina O.A. Method of pre-sowing treatment of wheat seeds: Patent No.2318305 Russian Federation, IPC A01S1/00 (2006.01). 2008. (In Rus.).
7. Vasenev E.A., Romanov V.Yu., Korepanov D.A. Device of pre-sowing seed treatment: patent No.142430 Russian Federation, IPC A01S1/00 (2006.01). 2014. (In Rus.).
8. Fedotov V.A., Altukhov I.V., Ocherov V.D. Method of pre-sowing treatment of seeds of agricultural crops: Patent No.2537919 Russian Federation, IPC A01S1/00 (2006.01) / 2015. (In Rus.).
9. Vladyskin I.R., Kondratyeva N.P. Device for pre-sowing seed treatment: Patent No.54714 Russian Federation, IPC A01C1/00 (2006.01). 2006. (In Rus.).
10. Bokhan N.I., Drobyshev G.Yu., Tsvirko L.Yu., Drobyshev Yu.V. Device for mixing and processing the product with ultraviolet rays: Patent No.1558318 Russian Federation, IPC A01S1/00 (2000.01), B65G 47/22 (2000.01). 1990. (In Rus.).

10. Устройство для перемещения и обработки продукта ультрафиолетовыми лучами: а.с. SU1558318 A1, МПК A01C 1/00, B65G 47/22 / Н.И. Бохан, Г.Ю. Дробышев, Л.Ю. Цвирко, Ю.В. Дробышев; № 4377770; заявл. 16.02.1988; опубл. 23.04.1990. EDN: BFCRYO.

11. Устройство для ультрафиолетовой обработки семян: Патент RU206252 U1, МПК U1, A01C1/00 / С.В. Вендин, В.Ю. Страхов, С.В. Килин, С.В. Соловьев, А.О. Яковлев; № 2021116372; заявл. 04.06.2021; опубл. 02.09.2021, Бюл. № 25. EDN: DHSVSO.

12. Kowalski W.J. UVGI Disinfection Theory. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9_2

13. Вендин С.В., Саенко Ю.В., Страхов В.Ю. Результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности применения УФ облучения, СВЧ обработки и искусственного освещения при проращивании зерна пшеницы и ячменя на витаминный корм // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 2 (46). С. 42-50. EDN: FDTBKS.

14. Сафаралихонов А.Б., Акназаров О.А. Влияние предпосевного УФ-облучения семян пшеницы на её рост, продуктивность и активность эндогенных регуляторов роста растений // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2011. Т. 54, № 8. С. 666-672. EDN: ONBZNN.

15. Вендин С.В., Саенко Ю.В., Широков М.С., Страхов В.Ю. Влияние продолжительности освещения на скорость проращивания и химический состав зерна сои и люпина // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, № 1 (42). С. 93-98. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-1-93-98>

16. Юдаев И.В., Чарова Д.И., Феклистов А.С., Воронников И.Н., Габриелян Ш.Ж. Выращивание листового салата в светодиодной облучательной камере // Сельский механизатор. 2017. № 1. С. 20-21. EDN: XXMOZR.

17. Кондратьева Н.П., Краснолуцкая М.Г. Ильясов И.Р. и др. Результаты опытов по влиянию УФ облучения на семена, из которых выращивается зеленый корм на гидропонике // Агротехника и энергообеспечение. 2016. № 4-2 (13). С. 6-14. EDN: YHSQAJ.

11. Vendin S.V., Strahov V.Yu., Kilin S.V., Solovyev S.V., Yakovlev A.O. Device for UV seed treatment: Patent No.206252 Russian Federation, IPC U1, A01C1/00 (2021.05).2021. (In Rus.).

12. Kowalski W.J. UVGI Disinfection Theory. In: Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9_2

13. Vendin S.V., Saenko Yu.V., Strahov V.Yu. Results of experimental studies to assess the effectiveness of the application UV irradiation, microwave processing and artificial lighting during germination of wheat and barley grains for vitamin feed. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2019;2:42-50. (In Rus.).

14. Safaralikhonov A.B., Aknazarov O.A. Effect of pre-sowing UV irradiation of wheat seeds on its growth, productivity and activity of endogenous plant growth regulators. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Plant Physiology*. 2011;54(8):666-672. (In Rus.).

15. Vendin S.V., Saenko Yu.V., Shirokov M.S., Strahov V.Yu. Effect of the duration of illumination on the germination rate and chemical composition of soybean and lupine grains. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2021;68(1):93-98. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-1-93-98>

16. Yudaev I.V. Growing lettuce in a led irradiation chamber. *Selskiy Mekhanizator*. 2017;1:20-21. (In Rus.).

17. Kondratyeva N.P., Krasnolutskaia M.G. Ilyasov, I.R. Results of experiments on the effect of UV radiation on seeds grown hydroponically for green feed. *Agrotekhnika i Energoobespechenie*. 2016;4-2:6-14. (In Rus.).

Информация об авторах

Владимир Юрьевич Страхов¹, преподаватель; strakhov.94@list.ru

Сергей Владимирович Вендин², д-р техн. наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0002-0482-6657>; elapk@mail.ru

Юрий Васильевич Саенко³, д-р техн. наук, профессор; yuriy311300@mail.ru

^{1,2,3} Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина; 308503, Россия, Белгородская обл., Белгородский район, п. Майский, ул. Вавилова, 1

Вклад авторов

В.Ю. Страхов – проведение исследования, визуализация, описание результатов и формирование выводов исследования. С.В. Вендин – формулирование основной концепции исследования.

Ю.В. Саенко – разработка методологии исследования.

Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 04.04.2023; поступила после рецензирования и доработки 13.09.2023; принята к публикации 27.09.2023

Information about the authors

Vladimir Yu. Strakhov¹, Lecturer; strakhov.94@list.ru

Sergey V. Vendin², DSc (Eng), Professor; <https://orcid.org/0000-0002-0482-6657>; elapk@mail.ru

Yuriy V. Saenko³, DSc (Eng), Professor; yuriy311300@mail.ru

^{1,2,3} Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin; 308503, Russia, Belgorod region, Belgorodsky district, Mayskiy, Vavilova Str., 1

Contribution

V.Yu. Strakhov – conducting research, visualization, writing – original draft preparation (results and discussion, conclusion).

S.V. Vendin – conceptualization.

Yu.V. Saenko – methodology.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 04.04.2023; revised 13.09.2023; accepted 27.09.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 635.075

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-53-60>**Влияние импульсного и сканирующего светодиодного излучения на биохимический состав и продуктивность капусты японской сорта Мизуна Ред***И.В. Князева*^{1✉}, *О.В. Вершинина*², *А.А. Гришин*³^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ knyazewa.inna@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1065-1814>² vershinina.oks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9745-7805>³ 5145412@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1670-4577>

Аннотация. При выращивании растений в светокультуре эффективными являются энергосберегающие светодиодные облучатели, имеющие длительный срок службы, низкую теплоотдачу и небольшие габариты, а также возможность близкого расположения к растениям и регулирование интенсивности и спектров освещения. С целью оценки влияния режимов излучения на растения и затрат энергии при данных режимах исследовалась продуктивность растительной продукции капусты японской сорта Мизуна Ред и их биохимический состав. Растения освещали специально разработанными светодиодными лампами производства ВИМ с динамически регулируемым спектральным составом по 4 каналам. Экспериментальные исследования проводились при трёх режимах излучения: непрерывном (контроль), импульсном и сканирующем с общей фотосинтетической активной радиацией 321 мкмоль/м²с в пропорции В:G:R:FR (синий: зеленый: красный: дальне красный спектры) ~ 30:26:38:6. Параметры формирования надземной массы и сухого вещества определялись дважды на 15 и 30 дни вегетационного периода. Установлено, что при импульсном режиме излучения содержание пищевых волокон в листьях по сравнению с непрерывным освещением (контролем) больше на 64,3%, зольных веществ – на 19,1%. Отмечается повышенное содержание аскорбиновой кислоты и холина. Применение импульсного режима излучения позволило повысить содержание углеводов в тканях побегов Мизуна Ред на 71,4% по сравнению со сканирующим режимом.

Ключевые слова: гидропонный модуль, капуста японская, Мизуна Ред, светодиодные облучатели, LED, режим облучения, импульсный режим облучения, сканирующий режим облучения, продуктивность

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на разработку крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (№ 075-15-2020-774)

Для цитирования: Князева И.В., Вершинина О.В., Гришин А.А. Влияние импульсного и сканирующего светодиодного излучения на биохимический состав и продуктивность капусты японской сорта Мизуна Ред // Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 6. С. 53-60. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-53-60>.

ORIGINAL PAPER

Effect of pulsed and scanning LED irradiation on physicochemical parameters of Japanese cabbage of the Mizuna Red variety*I.V. Knyazeva*^{1✉}, *O.V. Vershinina*², *A.A. Grishin*³^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ knyazewa.inna@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1065-1814>² vershinina.oks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9745-7805>³ 5145412@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1670-4577>

Abstract. When growing plants in light culture, particularly effective are energy-saving LED irradiators with long service life, low heat dissipation and small size, as well as an ability to be closely located to the plants and possibility of regulating the intensity and spectrum of illumination. To evaluate the effect of irradiation modes on plants and energy expenditure under these regimes, the productivity of plant products of Japanese cabbage variety Mizuna Red and their biochemical composition were studied. Plants were illuminated by specially designed LED lamps

produced by VIM with a dynamically adjustable spectral composition in four channels. Experimental studies were conducted under three radiation modes: continuous (control), pulsed and scanning with a total photosynthetic active radiation of 321 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ in the proportion of B:G:R:FR \sim 30:26:38:6. Parameters of aboveground mass and dry matter formation were determined twice on the 15th and 30th days of the growing season. It was found that under the pulsed radiation mode the content of dietary fibres in leaves compared to continuous illumination (control) is 64.3% higher, and ash content – 19.1% higher. The increased content of ascorbic acid and choline has also been noted. The application of the pulsed mode of radiation increased the content of carbohydrates in the tissues of Mizuna Red shoots by 71.4% as compared to the scanning mode.

Keywords: hydroponic module, Japanese cabbage, Mizuna Red, LED irradiators, LED, irradiation mode, pulsed irradiation mode, scanning irradiation mode, productivity, power consumption

Funding: The study was funded by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the development of major scientific projects in priority areas of scientific and technological development (No. 075-15-2020-774).

For citation: Knyazeva I.V., Vershinina O.V., Grishin A.A. Effect of pulsed and scanning LED irradiation on physicochemical parameters of Japanese cabbage of the Mizuna Red variety. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):53-60. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-53-60>

Введение. Выращивание растений в светокультуре является одним из актуальных направлений развития городского сельского хозяйства [1, 2].

Возможность гибкого регулирования интенсивности и спектров освещения [3], минимум затрат на электроэнергию, длительный срок службы, низкая теплоотдача, меньший объём/вес [4] и возможность близкого расположения к растениям делает светодиодные (LED) системы освещения экономически эффективным решением для технологии многоуровневого выращивания растений без естественного освещения в закрытых помещениях [5].

Искусственное освещение является одним из основных параметров, который существенно влияет на рост и качество выращиваемых в контролируемых условиях вертикальных ферм закрытого типа (PFAL) растений [6].

Исследования показали, что при разных комбинациях спектрального облучения в биомассе салата-латук изменяется содержание витамина С (3,3 мг/г), общего сахара (14,3 мг/г) и нитратов 237,7 мг/кг, меняются вкусовые качества [7].

Наличие красных и синих светодиодов (RB) в соотношении 4:1, используемых в качестве источника света с импульсной обработкой растений *Brassica rapa* L. subsp. *nipposinica* (L.H. Bailey) Ханельт, способствовало увеличению скорости фотосинтеза на 291% и лучшему темпу роста по сравнению с обычной 12-часовой системой освещения [8]. Прерывистое освещение в соотношении 60 мин света:15 мин темноты способствовало повышению морфометрических параметров у растений *Brassica rapa* L. subsp. *nipposinica* (L.H. Bailey) Ханельт [9]. Кроме того, импульсный режим излучения с длительными темновыми периодами может снизить потребление энергии от 30

до >50%, не влияя на морфологические признаки таких видов растений, как *Brassica napus* L., *Brassica rapa* L. и *Beta vulgaris* L. [10].

Капуста японская *Brassica rapa* L. subsp. *nipposinica* (L.H. Bailey) Ханельт, относящаяся к листовым овощам [11], является источником природных антиоксидантов, большого количества минеральных веществ, аминокислот, углеводов, жирных кислот, пищевых волокон, витаминов (токоферол, аскорбиновая и фолиевая кислоты), требует популяризации для использования в системе вертикального земледелия.

Цель исследований: оценить влияние разных режимов облучения на продуктивность и физико-химические показатели; разработать технологические приёмы получения качественной товарной продукции капусты японской сорта Мизуна Ред, выращенной в ярусном гидропонном модуле; оценить снижение потребления энергии при выращивании капусты японской в режиме прерывистой световой обработки (периодического воздействия света) в закрытой агороэко-системе без отрицательного влияния на динамику роста и развитие растений.

Материалы и методы. В целях проведения экспериментальных исследований разработан двухъярусный гидропонный модуль (производство ВИМ) для выращивания растений в контролируемых условиях (рис. 1). Питание растений осуществлялось минеральными удобрениями Flora Series компании General Hydroponics Europe согласно регламенту выращивания листовых овощей, в гидропонных системах от William Texier, ЕС раствора поддерживали в пределах 0,9...1,2 мСм·см⁻¹, pH – 5,8...6,0. Над каждым лотком закреплялись светодиодные светильники с изменяемым спектральным составом. Поддержание климатических параметров

с минимальным отклонением обеспечивалось системой PID-регулирования. Сбор данных с датчиков (температуры и влажности воздуха), управление освещением, поливом, увлажнением и вентиляцией осуществлялись промышленным программируемым логическим контроллером производства Delta Electronics серии DVP-S.

Освещение растений осуществлялось специально разработанными светодиодными светильниками производства ВИМ с динамически управляемым спектральным составом по 4 каналам. Контроллер системы управления имеет возможность плавного изменения интенсивности освещения по каждому из каналов, что позволяет настроить спектр с необходимым пропорциональным составом. Конструкция системы освещения обеспечивала три сменных режима: непрерывное, импульсное и сканирующее с суммарной фотосинтетически активной радиацией (ФАР) 321 мкмоль/м²с: синий – 97 мкмоль/м²с; зелёный – 84 мкмоль/м²с; красный – 122 мкмоль/м²с; дальний красный – 18 мкмоль/м²с. Пропорция составляет B:G:R:FR ~ 30:26:38:6. При проведении исследований интенсивность излучения и спектральный состав для всех изучаемых режимов был в диапазоне от 380 до 780 нм (рис. 2).

Плотность потока фотонов и спектральный состав излучения измерялись прибором MK350D Compact Spectrometer (UPRtek Corp. Miaoli County, Taiwan).

Непрерывное освещение обеспечивает непрерывный стабильный световой поток от трех ламп, равномерно распределённый по всей зоне роста растений. Импульсное облучение также обеспечивает равномерный световой поток по всей зоне роста растений. Однако в их алгоритм управления добавлена функция прерывистого, импульсного свечения по схеме. Время работы освещения подразделено на два диапазона: t_{impulse} – диапазон импульсов (30 с), t_{pause} – диапазон пауз (15 с). Длительность работы ламп с импульсным облучением имела соотношение $t_{\text{ON}}/t_{\text{OFF}}$ – 0,5 с. В паузе лампа

выключалась. Длительность одного цикла рассчитывалась по формуле: $t_{\text{сум}} = t_{\text{импульс}} + t_{\text{пауза}}$. Сканирующий режим освещения предполагает использование одного светильника, установленного на подвижных направляющих с электроприводом от шагового двигателя. По направляющим светильник перемещался над вегетационным лотком от одного ряда растений к другому. Продолжительность цикла «Свет/темнота» составляла 50/70 с, полного цикла освещения всех растений в лотке – 120 с.



Рис. 1. Двухъярусный гидропонный модуль (производство ВИМ)

Fig. 1. Two-tier hydroponic module produced by VIM

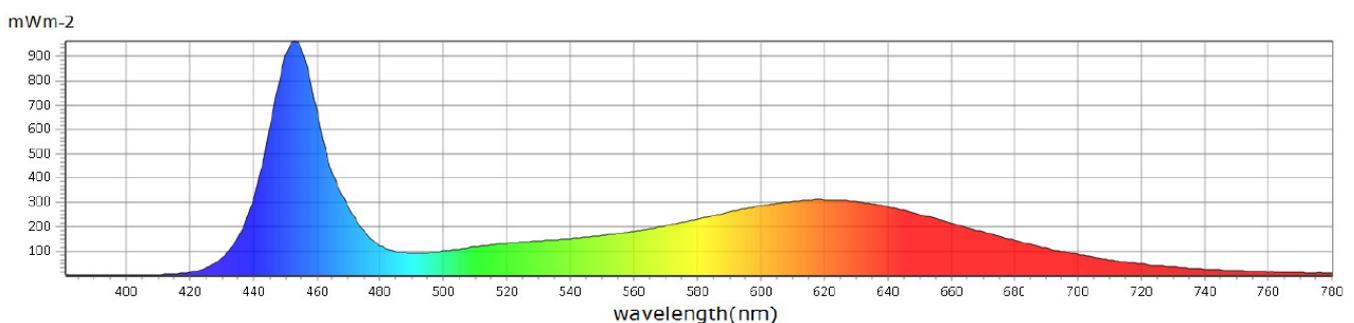


Рис. 2. Спектральный состав света в ярусном гидропонном модуле при выращивании растений капусты японской сорта Мизуна Ред

Fig. 2. Spectral composition of light in a tiered hydroponic module when growing the Mizuna Red variety

Интеграл суточной радиации (DLI) рассчитывался как произведение плотности потока фотосинтетических фотонов (PPFD) на длительность суточной экспозиции (табл. 1).

Для определения экономической эффективности импульсного и сканирующего режимов излучения ярусного гидропонного модуля затраты на электроэнергию рассчитывались с учётом суточной экономии затрат на электроэнергию при условии суммарной мощности установленных светильников 420 Вт/м² и времени работы контрольного, импульсного и сканирующего излучения на протяжении 12 ч в сутки.

Содержание пищевых волокон определялось методом ферментативного гидролиза крахмала

и некрахмальных соединений. Пищевые волокна осаждали этиловым спиртом, высушивали и определяли гравиметрическим методом.

Определение массовой доли катионов (ионов аммония, калия, натрия, магния и кальция), анионов (хлорид-, нитрат-, сульфат- и фосфат-ионов), витаминов группы В и углеводов проводилось методом капиллярного электрофореза с использованием аналитического комплекса на основе системы капиллярного электрофореза «Капель-205».

Содержание витаминов В1, В2 и С в растительной продукции определялось на анализаторе ФЛУОРАТ-02-5 М.

Определение массовой доли нитратов проводилось потенциометрическим методом, основанном на извлечении нитратов из пробы экстракционной жидкостью алюмокалиевых квасцов с последующим измерением концентрации нитрат-ионов в полученном растворе с помощью ионоселективного электрода. Для анализа использовался ионметр «Итан» (Россия).

Анализ данных оценивали методами дисперсионного анализа с использованием программного обеспечения STADIA 8.0 (Россия). Для проверки достоверности полученных данных использовали тест Дункана при уровне вероятности $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Показатели формирования надземной массы и сухого вещества определяли дважды: на 15-й и 30-й дни вегетационного периода.

При импульсном излучении прослеживается увеличение прироста надземной массы растений с прибавкой в 32,9% (на 15-й день наблюдения)

Таблица 1

Интеграл суточной радиации и показатели энергопотребления для трёх режимов светодиодного излучения при ФАР 321 ммоль/м²с и фотопериоде 12 ч

Table 1

Dayly light integral and energy consumption indicators for three LED irradiation modes for photosynthetic active radiation o 321 mmol/m²s and photoperiod of 12 hours

Режим излучения <i>Irradiation mode</i>	Дневной интеграл света, моль/м ² сут. <i>Daily Light Integral, mol m⁻² Day⁻¹</i>	Энергопотребление, кВт <i>Power consumption, kW</i>
Контроль (непрерывный) <i>Control (continuous)</i>	27,7	5,0
Сканирующий <i>Scanning</i>	18,5	3,3
Импульсный / <i>Pulsed</i>	18,5	3,3

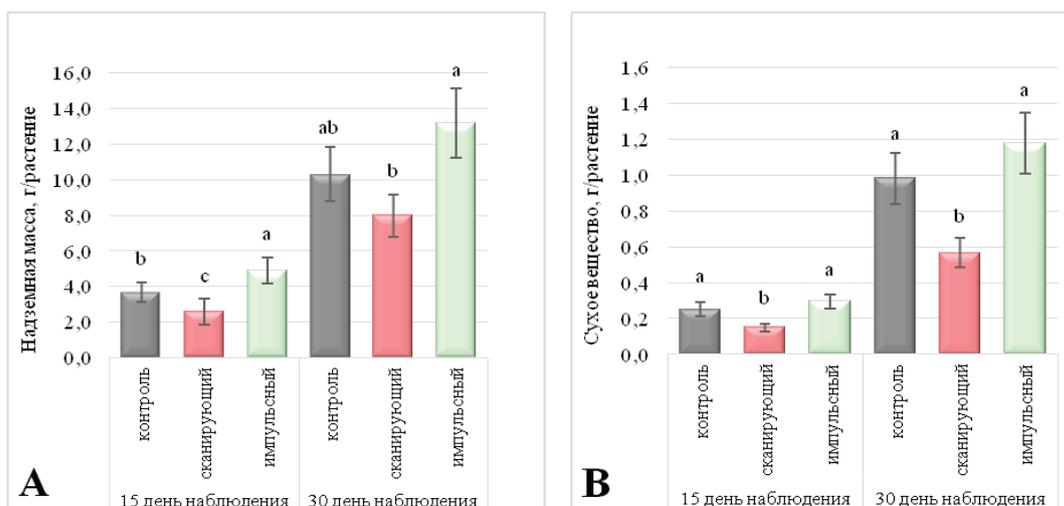


Рис. 3. Показатели накопления сырой и сухой массы растений капусты японской сорта Мизуна Ред (n = 25):

А – надземная масса; В – накопление сухого вещества; a, b, c, ab – разные буквы указывают на существенные различия между режимами излучения по критерию Дункана ($p \leq 0,05$)

Fig. 3. Indicators of accumulation of wet and dry mass of Japanese cabbage plants of the Mizuna Red variety (n = 25):

(A) aboveground mass; (B) dry matter accumulation;

a, b, c – indicate significant differences among emission modes according to Duncan’s test ($p \leq 0.05$)

и 27,8% (на 30-й день наблюдения) по отношению к контролю (рис. 3А). Статистическая обработка проводилась на 15-е и 30-е сутки наблюдения.

При сканирующем режиме облучения в ходе проведения эксперимента существенные отклонения по отношению к контрольному варианту не выявлены. В этом варианте отмечается формирование надземной массы на уровне 2,57 г/растение (15-й день) и 7,97 г/растение (30-й день), что ниже импульсного излучения.

Анализ полученных экспериментальных данных по показателям сухой биомассы сорта Мизуна Ред показал преимущество применения режима с импульсным излучением (рис. 3В). Содержание сухого вещества в этом варианте достигло 1,98 г/растение против 0,65 г/растение (сканирующий тип светильника) и 0,98 г/растение (контроль). Выращивание растений под импульсным излучением не оказало достоверного влияния на накопление сухого вещества в растительной продукции японской капусты сорта Мизуна Ред по сравнению с контролем. При сканирующем излучении содержание сухой биомассы было намного ниже.

Режим излучения незначительно повлиял на содержание пищевых волокон, зольных веществ и отдельных углеводов в растительной продукции (табл. 2). Наиболее высокое содержание сухих

веществ наблюдалось в варианте с импульсным излучением. По сравнению с контрольным вариантом при импульсном режиме излучения накопление пищевых волокон оказалось больше на 64,3%, зольных веществ – на 19,1%.

Важнейшими пищевыми веществами, обладающими высокой биологической активностью, являются витамины. Определялось содержание витаминов: С (аскорбиновая кислота), В₁ (тиамин), В₂ (рибофлавин) и холина в биомассе растений. Использование импульсного облучения способствовало наибольшему накоплению витаминов в растениях по сравнению со сканирующим режимом (табл. 3).

Для оценки питательной ценности проанализирован аминокислотный состав растений японской капусты, выращенных при различных режимах освещения (рис. 4). В результате анализа выявлено 18 основных аминокислот. При использовании импульсного режима растения в большей степени синтезировали 9 аминокислот: аргинин, лизин, фенилаланин, гистидин, лейцин+изолейцин, валин, пролин и глицин. Содержание цистина и метионина в биомассе значительно выше при импульсном освещении, чем при (непрерывном) контрольном. Отметим, что при сканирующем освещении наблюдалось снижение содержания всех анализируемых аминокислот по сравнению с контролем.

Физико-химические показатели растений капусты японской сорта Мизуна Ред (n = 6)*

Таблица 2

Physico-chemical characteristics of plants Mizuna Red (n = 6)

Table 2

Режим излучения <i>Emission mode</i>	Содержание, % (в сухой массе) / Content, % (dry matter)				
	пищевые волокна <i>dietary fiber</i>	зольные вещества <i>ash substances</i>	фруктоза <i>fructose</i>	глюкоза <i>glucose</i>	сахароза <i>sucrose</i>
Контроль (непрерывный) / Control (continuous)	9,27±1,9b	1,43±0,2ab	1,33±0,2a	1,65±0,3a	0,91±0,1a
Сканирующий / Scanning	10,85±2,3b	1,18±0,1b	0,19±0,0b	0,51±0,1b	0,66±0,1b
Импульсный / Pulsed	15,23±3,2a	1,71±0,2a	1,47±0,3a	1,75±0,3a	0,96±0,1a

*a, b, ab – разные буквы указывают на существенные различия между режимами излучения по критерию Дункана (p ≤ 0,05)
a, b, ab – indicate significant differences among emission modes according to Duncan's test (p ≤ 0.05)

Содержание витаминов в биомассе растений капусты японской сорта Мизуна Ред (n = 6)

Таблица 3

Vitamin content in plant biomass of Japanese cabbage plants of the Mizuna Red variety (n = 6)

Table 3

Режим излучения <i>Emission mode</i>	Витамины, мг/100 г съедобной части / Vitamins, mg/100 g edible part			
	С	В ₁	В ₂	Холин /Choline
Контроль (непрерывный) / Control (continuous)	887±130,5a	0,69±0,1ab	0,81±0,1a	281±41,4a
Сканирующий / Scanning	672±9,9b	0,55±0,1b	0,61±0,1b	213±31,4b
Импульсный / Pulsed	913±134,3a	0,73±0,1a	0,84±0,1a	290±42,7a

*a, b, ab – разные буквы указывают на существенные различия между режимами излучения по критерию Дункана (p ≤ 0,05)
a, b, ab – indicate significant differences among emission modes according to Duncan's test (p ≤ 0.05)

Минеральные вещества являются незаменимыми микронутриентами питания человека, которые должны ежедневно потребляться с пищей. К важным макроэлементам относят калий, натрий, кальций, магний, фосфор, хлор и серу. Фосфор влияет на общий уровень метаболической активности тканей растений. Изменение ионов кальция и сульфат-ионов связано с накоплением хлорофилла в биомассе растений под действием освещения. Нами изучен катионно-анионный состав растений сорта Мизуна Ред, выращенных в разных режимах излучения (табл. 4).

В зависимости от варианта опыта в сырой биомассе растений концентрация сульфат-ионов находилась на уровне 138,02...297,24 мг/100 г, фосфат-ионов – 110,98...164,73 мг/100 г (табл. 4).

Экспериментальные данные наших исследований по определению содержания основных катионов и анионов в биомассе растений капусты японской сопоставимы с научными результатами других ученых. Так, по данным исследований R.L. Metallo [12], в зависимости от светодиодной обработки в сухой массе побегов гидропонной капусты концентрация магния соответствовала 0,48...0,56%, фосфора – 0,56...0,66%, серы – 0,49...1,76%.

Применение разных режимов светового облучения приводит к изменению химического состава. Оценивая катионно-анионный состав биомассы капусты японской сорта Мизуна Ред, установили, что режим облучения в большей степени повлиял на накопление ионов K^+ , Na^+ , Mg^{2+} и SO_4^{2-} . Повышенное содержание K^+ обнаружено в растениях, выращенных

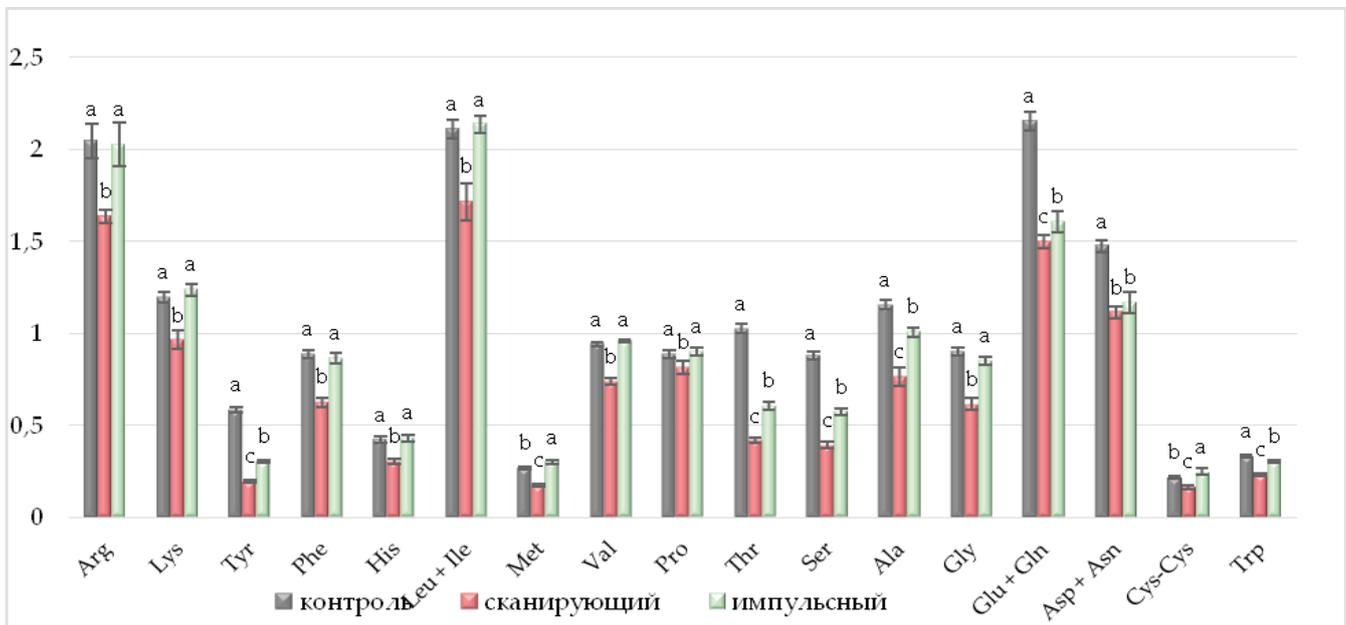


Рис. 4. Содержание аминокислот в биомассе растения мг/г съедобной части капусты японской сорта Мизуна Ред (n = 6):

a, b, c – разные буквы указывают на существенные различия между режимами излучения по критерию Дункана (p ≤ 0,05)

Fig. 4. Amino acid content in plant biomass of Japanese cabbage plants of the Mizuna Red variety, mg·g⁻¹ edible part (n = 6):

a, b, c – indicate significant differences among emission modes according to Duncan’s test (p ≤ 0.05)

Таблица 4
Содержание основных катионов и анионов в биомассе растений капусты японской сорта Мизуна Ред (n = 6)*

Table 4
Content of basic cations and anions in plant biomass of Japanese cabbage plants of the Mizuna Red variety (n = 6)

Режим излучения Emission mode	Содержание, мг/100 г (сырой массы) / Content, mg/100 g (wet matter)						
	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	Cl^-
Контроль (непрерывный) Control (continuous)	371,84±47,53a	14,26±1,90b	40,87±5,70b	121,67±9,51a	262,35±28,52a	162,54±19,01a	48,48±6,65a
Сканирующий / Scanning	155,80±21,34b	19,92±2,85a	25,61±3,56c	78,97±7,11b	138,02±14,23b	110,98±14,23b	41,97±5,69a
Импульсный / Pulsed	378,71±53,72a	10,74±1,79b	43,87±6,27a	116,39±8,95a	297,24±35,81a	164,73±17,91a	49,24±7,16a

*a, b разные буквы указывают на существенные различия между режимами излучения по критерию Дункана (p ≤ 0,05)

*a, b – indicate significant differences among emission modes according to Duncan’s test (p ≤ 0.05)

при непрерывном (контроль) и импульсном вариантах. Амплитуда колебания по содержанию Mg^{2+} в биомассе растений составила 25,61...43,87 мг/100 г, Ca^{2+} – 78,97...121,67 мг/100 г в зависимости от режимов излучения. Сканирующий режим светового излучения способствовал большему накоплению ионов Na^+ . При сравнении полученных результатов по распределению сульфат-ионов в растениях выявлено, что при импульсном режиме излучения содержание ионов SO_4^{2-} составила 297,24 мг/100 г, что в 2 раза превышает значения сканирующего режима излучения. По содержанию хлоридов различия между изучаемыми режимами излучения установить не удалось. Содержание фосфат-ионов в тканях капусты японской составило 110,98...164,73 мг/100 г.

Таблица 5
Содержание нитратов
в биомассе растений сорта Мизуна Ред (n = 6)*

Table 5
Nitrate content in the biomass of Japanese cabbage plants
of the Mizuna Red variety (n = 6)

Режим излучения <i>Emission mode</i>	Содержание нитратов в биомассе, мг/кг <i>Nitrate content, mg·kg⁻¹</i>
Контроль (непрерывный) <i>Control (continuous)</i>	556,9b
Сканирующий / <i>Scanning</i>	1534,2a
Импульсный / <i>Pulsed</i>	580,4b

*a, b разные буквы указывают на существенные различия между режимами излучения по критерию Дункана ($p \leq 0,05$)

a, b – indicate significant differences among emission modes according to Duncan's test ($p \leq 0.05$)

С целью выявления накопления нитратов в биомассе растений капусты японской сорта Мизуна Ред проведен химический анализ (табл. 5).

Установлено, что во всех вариантах эксперимента предельно допустимая концентрация нитратов в биомассе японской капусты сорта Мизуна Ред не превышала допустимую норму 2000 мг/кг (требования ТР ТС 021/2011). При выращивании растений капусты японской под воздействием сканирующего режима облучения обнаружено значительное превышение уровня нитратов (1534,2 мг/кг) относительно контроля (556,9 мг/кг) и импульсного излучения (580,4 мг/кг).

Выводы

1. По сравнению с непрерывным освещением (контроль) импульсный режим светодиодного облучения обеспечивает достоверное увеличение урожая сырой и сухой биомассы капусты японской сорта Мизуна Ред на 27,8 и 205% соответственно. В сухой биомассе содержание пищевых волокон увеличилось на 64,3%, зольных элементов – на 19,1%. Увеличилось содержание аминокислот: метионина на 12,6%, цистина на 15,1%. Среди анализируемых витаминов преобладают аскорбиновая кислота и холин.

2. Растения, выращенные при сканирующем режиме светодиодного облучения, характеризовались достоверно пониженным по сравнению с контролем содержанием биологически активных соединений витаминов (С, B_1 и B_2), холина и комплекса 18 протеиногенных аминокислот.

Список литературы / References

- Loi M., Villani A., Paciolla F., Mulè G., Paciolla C. Challenges and opportunities of light-emitting diode (led) as key to modulate antioxidant compounds in plants. A Review. *Antioxidants*. 2021;10(1):42. <https://doi.org/10.3390/antiox10010042>
- Santin M., Ranieri A., Castagna A. Anything new under the sun? An update on modulation of bioactive compounds by different wavelengths in agricultural plants. *Plants*. 2021;10(7):1485. <https://doi.org/10.3390/plants10071485>
- Xu Y. Nature and source of light for plant factory. In *Plant Factory Using Artificial Light*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019. Pp. 47-69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00002-6>
- Polzella A., Terzaghi M., Trupiano D., Baronti S., Scipia G.S., Chiatante D., Montagnoli A. Morpho-physiological responses of *Pisum sativum* L. to different light-emitting diode (LED) light spectra in combination with biochar amendment. *Agronomy*. 2020;10(3):398. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030398>
- Beacham A.M., Vickers L.H., Monaghan J.M. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2019;94(3):277-283. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214>
- Orsini F., Pennisi G., Zulficar F., Gianquinto G. Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). *European Journal of Horticultural Science*. 2020;85(5):297-309. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.1>
- Zhang Y., Zha L., Liu W., Zhou Ch., Shao M., Yang Q. LED light quality of continuous light before harvest affects growth and AsA metabolism of hydroponic lettuce grown under increasing doses of nitrogen. *Plants*. 2021;10(1):176. <https://doi.org/10.3390/plants10010176>
- Nicole C.C.S., Mooren J., Pereira Terra A.T., Larsen D.H., Woltering E.J., Marcelis L.F.M., Verdonk J., Schouten R., Troost F. Effects of LED lighting recipes on postharvest quality of leafy vegetables grown in a vertical farm. *Acta Hort.* 2019;1256:481-488. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1256.68>
- Harun A.N., Ani N.N., Ahmad R., Azmi N.S. Red, blue LED with pulse lighting control treatment for Brassica chinensis in Indoor farming. In *Proceedings of the IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, Kuching, Malaysia. 2013. 2-4 December. Pp. 231-236. <https://doi.org/10.1109/ICOS.2013.6735080>
- Yokoyama R. Energy Consumption and Heat Sources in Plant Factories. In *Plant Factory Using Artificial Light*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019. Pp. 177-184. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00016-6>
- Артемьева А.М., Синявина Н.Г., Панова Г.Г., Чесноков Ю.В. Биологические особенности капустных овощных

культур вида *Brassica Rapa L.* при выращивании в интенсивной светокультуре // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56, № 1. С. 103-120. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.1.103rus>
Artemyeva A.M., Sinyavina N.G., Panova G.G., Chesnokov Yu.V. Biological features of cabbage vegetable crops of *Brassica rapa L.* species when grown in intensive light culture. *Agricultural Biology*. 2021;56:103-120. (In Rus.)

Информация об авторах

Инна Валерьевна Князева¹, канд. биол. наук, старший научный сотрудник;
<https://orcid.org/0000-0002-1065-1814>;
Researcher ID: AAY-4360-2021; knyazewa.inna@yandex.ru
Оксана Владимировна Вершинина², канд. с.-х. наук, научный сотрудник; <https://orcid.org/0000-0001-9745-7805>;
Researcher ID: AAB-6190-2022; vershinina.oks@yandex.ru
Андрей Александрович Гришин³, канд. экон. наук, старший научный сотрудник;
<https://orcid.org/0000-0002-1670-4577>;
Researcher ID: ABC-7314-2021; 5145412@mail.ru
^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов.

И.В. Князева – разработка концепции статьи, анализ литературы, описание результатов и формирование выводов исследования.
О.В. Вершинина – сбор статистических данных, анализ и доработка текста табличное и графическое представление результатов.
А.А. Гришин – табличное и графическое представление результатов

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 14.04.2023, после рецензирования и доработки 25.10.2023; принята к публикации 16.11.2023

12. Metallo R.M., Kopsell D.A., Sams C.E., Bumgarner N.R. Influence of blue/red vs. white LED light treatments on biomass, shoot morphology, and quality parameters of hydroponically grown kale. *Scientia Horticulturae*. 2018.235:189-197. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.061>

Information about the authors

Inna V. Knyazeva¹, CSc (Bio), Senior Research Engineer;
<https://orcid.org/0000-0002-1065-1814>;
Researcher ID: AAY-4360-2021; knyazewa.inna@yandex.ru
Oksana V. Vershinina², CSc (Ag), Research Engineer;
<https://orcid.org/0000-0001-9745-7805>;
Researcher ID: AAB-6190-2022; vershinina.oks@yandex.ru
Andrey A. Grishin³, CSc (Econ) Senior Research Engineer;
<https://orcid.org/0000-0002-1670-4577>;
Researcher ID: ABC-7314-2021; 5145412@mail.ru
^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5th Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russia

Author contribution

I.V. Knyazeva – conceptualization, literature review, description of the results and drawing up the conclusion.
O.V. Vershinina – statistical data collection, analysis and text revision, tabular and graphical presentation of the results.
A.A. Grishin – tabular and graphical presentation of the results

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 14.04.2023; revised 25.10.2023; accepted 16.11.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 636.083.313

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-61-66>**Обоснование параметров системы искусственного светодиодного освещения животноводческих помещений***С.М. Бакиров¹, Т.А. Широбокова²*¹ Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; г. Саратов, Россия² Удмуртский государственный аграрный университет; г. Ижевск, Россия¹ s.m.bakirov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>² 9048336842@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>

Аннотация. Освещение животноводческих помещений влияет на продуктивность животных. Система искусственного светодиодного освещения обеспечивает снижение энергетических затрат при производстве продукции животноводства на агропромышленных предприятиях. Для обоснования параметров системы светодиодного искусственного освещения животноводческих помещений представлена математическая модель. Система искусственного светодиодного освещения должна обеспечивать регулирование освещенности в зависимости от породы и каналов восприятия света животного, использовать программы управления спектром излучения и длительностью освещения. Результатами математического анализа определено, что освещённость, равномерность освещения в животноводческих помещениях и потребляемая мощность светодиодной системы зависит от высоты подвеса осветительных приборов, а также типа кривой силы света, которые определяются геометрическими особенностями светодиодных осветительных приборов. Спектр излучения определяется типом светодиодных источников света, а продолжительность и периодичность светового дня обеспечиваются программным устройством для светодиодов. Разработка новых конструктивных решений осветительных приборов позволит повысить эффективность продукции животноводства и снизить затраты на электроэнергию.

Ключевые слова: система искусственного светодиодного освещения, освещение животноводческих помещений, освещённость, расположение светодиодов, высота подвеса осветительных приборов, мощность светодиодной системы освещения, равномерность освещения, кривая силы света, продуктивность животных

Для цитирования: Бакиров С.М., Широбокова Т.А. Обоснование параметров системы искусственного светодиодного освещения животноводческих помещений // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 61-66. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-61-66>

ORIGINAL PAPER

Justification of the parameters of the artificial intelligence system of LED lighting for livestock premises*S.M. Bakirov¹, T.A. Shirobokova²*¹ Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia² Udmurt State Agrarian University, Izhevsk; Russia¹ s.m.bakirov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>² 9048336842@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>

Abstract. Lighting of livestock buildings affects the productivity of animals. The system of artificial LED lighting provides the reduction of energy costs in the livestock production at agro-industrial enterprises. A mathematical model is presented to substantiate the parameters of the system of artificial LED lighting of livestock premises. The system of artificial LED lighting should provide regulation of illumination depending on breed and light perception channels of an animal, use control programs of radiation spectrum and illumination duration. The results of mathematical analysis determined that illuminance, uniformity of illumination in livestock premises and power consumption of the LED system depends on the mounting height of lighting devices, as well as the type of light intensity curve, which are determined by the geometric features of LED lighting devices. The emission spectrum is determined by the type of LED light sources, while the duration and periodicity of the daylight hours is provided by the LED software devices. The development of new design solutions of lighting devices will increase the livestock productivity and reduce energy costs.

Keywords: artificial LED lighting system, lighting of livestock premises, illuminance, location of LEDs, mounting height of lighting devices, power of LED lighting system, uniformity of lighting, light intensity curve, animal productivity.

For citation: Bakirov S.M., Shirobokova T.A. Justification of the parameters of the artificial intelligence system of LED lighting for livestock premises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):61-66. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-61-66>

Введение. Освещение животных при их выращивании способствует повышению производительности (яйценоскости, привеса, удоя молока и т.п.) [1, 2]. Наибольшую чувствительность к освещению имеют птицы [3]. Световой день моделируется с помощью систем искусственного освещения [4].

Качество системы освещения влияет на удой коров, а также на суточный привес свиней¹ [5]. Результаты отечественных и зарубежных исследований [6-8] показывают, что ориентируясь на норму освещенности², принятую укрупненно в нормативных документах, невозможно добиться высокой продуктивности животных. Излишняя же освещенность или увеличенная продолжительность светового дня могут негативно влиять на здоровье животных, а также приводят к повышению потребления электроэнергии [9]. В связи с этим к системам искусственного освещения выдвигаются требования: возможности регулирования освещенности в зависимости от породы и каналов восприятия света животного (не через глаза); использования программ управления спектром излучения, длительностью освещения, отлаженных под незатухающие биологические колебания систем животных.

Цель исследований: обоснование параметров системы светодиодного искусственного освещения для животноводческих помещений, обеспечивающей повышение продуктивности животных.

Материалы и методы. В зоне пребывания животного необходимо обеспечить норму освещенности E_o , при которой животное имеет умеренную активность³, необходимый спектр излучения $\Phi_{\lambda o}$ в соответствии с возрастом, длительность t_o и периодичность Π_o светового дня в соответствии с биологическими ритмами.

¹ Освещение животноводческих помещений. URL: <http://varton.ru/ru/articles/states/osveshchenie-zhivotnovodcheskih-pomeshcheniy> (дата обращения: 12.04.2023).

² Нормы освещения сельскохозяйственных предприятий, зданий и сооружений. ОСТ-АПК 2.10.24.001-04. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/bcd/4293853695.pdf> (дата обращения: 8.11.2023).

³ Баев В.И., Короткий Р.П. Электрическое освещение птичников на основе кормовой активности цыплят-бройлеров: Монография / Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия. Волгоград: Станица-2, 2006. 135 с.

Для конкретной породы животного норма освещенности, при которой достигается его максимальная продуктивность, определяется по выражению:

$$E_o = \frac{E_{кр-вmax} + E_{кр-вmin}}{2}, \tag{1}$$

где $E_{кр-вmax}$, $E_{кр-вmin}$ – критические значения освещенности при высокой и низкой активности животного, лк.

Спектральный состав излучения, длительность и периодичность светового дня определяются результатами наблюдений. Пример регулирования параметров системы искусственного светодиодного освещения (ИСО) представлен на рисунке 1.

Система ИСО создает фактические параметры освещенности E_{ϕ} , спектральный состав излучения $\Phi_{\lambda \phi}$, длительность t_{ϕ} и периодичность Π_{ϕ} светового дня. Опишем взаимодействие системы искусственного освещения с животным в виде объекта исследования (рис. 2).

Результирующие показатели системы ИСО (параметры освещенности, равномерность освещения, мощность и энергопотребление системы, спектральный состав излучения, длительность и периодичность светового дня), влияющие на животное, формируются в совокупности с видом источника света, спектром его излучения, возможностью автоматического управления конструкцией светильника.

Для обеспечения высокой продуктивности животных при организации и разработке системы ИСО необходимо выполнение совокупности следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} E_o - E_{\phi} - E_c &= \Delta E, \quad \Delta E \rightarrow 0; \\ \Phi_{\lambda o} - \Phi_{\lambda \phi} - \Phi_{\lambda c} &= \Delta \Phi_{\lambda}, \quad \Delta \Phi_{\lambda} \rightarrow 0; \\ t_o - t_{\phi} - t_c &= \Delta t, \quad \Delta t \rightarrow 0; \\ \Pi_o - \Pi_{\phi} &= \Delta \Pi, \quad \Delta \Pi \rightarrow 0; \\ Z_{\phi} - Z_c - Z &= \Delta Z, \quad \Delta Z \rightarrow 0. \end{aligned} \right\}, \tag{2}$$

где Z_{ϕ} , Z_o – фактическая и наилучшая равномерность освещения, о.е.; E_c , Φ_c , t_c , Z_c – значения параметров естественного освещения; ΔE , $\Delta \Phi_{\lambda}$, Δt , $\Delta \Pi$, ΔZ – разности между наилучшими и фактическими (системы ИСО и естественного освещения): освещенностью, лк; спектральной плотностью потока излучения, лм; продолжительностью и периодичностью светового дня, ч; равномерностью освещения, о.е.

Выполнить совокупность условий (2) можно при разработке новой системы искусственного светодиодного освещения с наименьшими значениями мощности и энергопотребления и учётом влияния естественного освещения.

Результаты и их обсуждение. Спектральная плотность потока излучения $\Phi_{\lambda\phi}$ определяется типом источника света⁴. Использование светодиодных источников света позволяет получать различную спектральную плотность светового потока, которая связана с потребляемой мощностью выражением:

$$\Phi_{\lambda\phi} = 683 \sum_{i=1}^n V_{\lambda i} P_{\lambda\phi i} \lambda_{\phi i}, \quad (3)$$

где 683 – коэффициент перевода единиц измерения (энергетической в световую); V_{λ} – кривая спектральной чувствительности глаза животного, о.е.; $P_{\lambda\phi}$ – удельная мощность спектральной плотности излучения, Вт/нм; λ_{ϕ} – длина волны излучения, нм.

Продолжительность t_{ϕ} и периодичность Π_{ϕ} светового дня зависят от возможности системы автоматического управления (САУ) источником света:

$$t_{\phi} = \Pi_{\phi} - t_n - t_c; \quad (4)$$

$$N_t = \frac{8760}{\Pi_{\phi}} = \frac{8760}{(t_{\phi} + t_n + t_c)}, \quad (5)$$

где t_n , t_c – продолжительность ночного времени суток и естественного освещения, ч; N_t – количество включений системы искусственного светодиодного освещения в году (8760 ч в год).

Освещённость и равномерность освещения характеризуют систему освещения в целом. Рассмотрим пример, в котором освещённость на поверхности определяется одинаковым количеством светодиодов с одинаковой силой света (рис. 3).

Освещённость E в точке А для первого случая (рис. 3а) определяется выражением:

$$E = \frac{I_{\alpha} 4 \cos \alpha + I_{\beta} 2 \cos \beta + I_{\gamma} 2 \cos \gamma + I_{\delta} \cos \delta}{h^2}, \quad (6)$$

где h – высота подвеса светодиода, м; $I_{\alpha, \beta, \gamma, \delta}$ – сила света светодиода под углами соответственно $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, кд; α – угол падения света от 2, 3, 5, 6 светодиодов, град.; β – угол падения света от 1 и 9 светодиодов, град.; γ – угол падения света от 4 и 8 светодиодов, град.; δ – угол падения света от 7 светодиода, град.

⁴ Бугров В.Е., Виноградова К.А. Оптоэлектроника светодиодов: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2013. 173 с. EDN ZUZFBN.

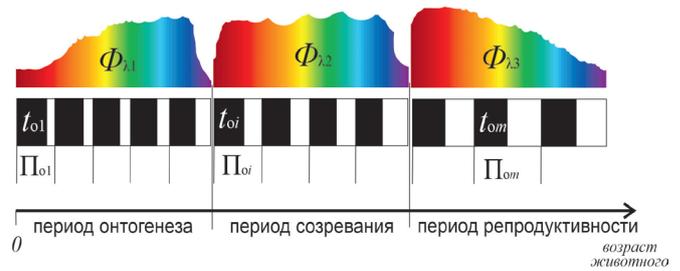


Рис. 1. Изменение параметров светодиодного освещения в зависимости от периода роста животного (птицы):

Φ_{λ} – спектральный состав излучения, t_{ϕ} ; Π_{ϕ} – длительность и периодичность светового дня

Fig. 1. Changing the parameters of LED lighting depending on the growth period of the animal (poultry)

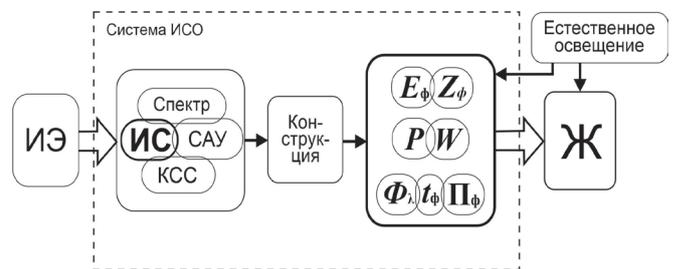


Рис. 2. Объект исследования:

ИЭ – источник энергии; ИС – источник света, САУ – система автоматического управления спектром и длительностью светового дня; КСС – кривая силы света; P – мощность светодиодной системы освещения; W – энергопотребление светодиодной системы освещения; E_{ϕ} – фактические параметры освещенности; Z_{ϕ} – фактическая равномерность освещения; Ж – животное

Fig. 2. Object of study:

ИЭ – energy source; ИС – light source, САУ – automatic control system for the spectrum and daylight hours, КСС – light intensity curve; P – power of the LED lighting system; W – energy consumption of the ISO system; E_{ϕ} – actual illumination parameters; Z_{ϕ} – actual uniformity of illumination; Ж – animal

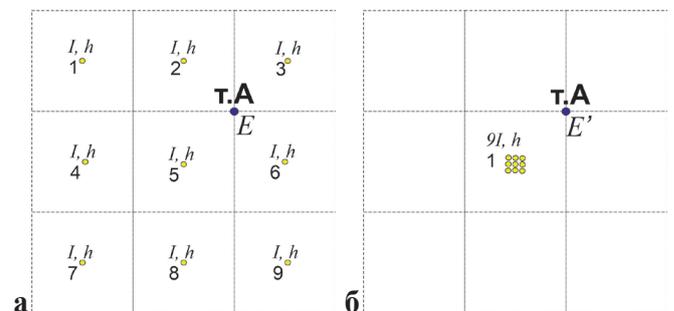


Рис. 3. Освещённость в точке А при различном расположении светодиодов:

а) как отдельных источников света; б) в единой конструкции прибора

Fig 3. Illumination at point A when the LEDs are arranged:
а) as separate light sources and б) in a single device design

Для второго случая освещённость E' в той же точке А (рис. 3б) будет определяться в зависимости от углов падения света:

$$E' = \frac{9I_\alpha \cos \alpha}{h^2}, \tag{7}$$

Геометрическая форма расположения светодиодов в помещении будет отличаться на величину Z :

$$Z = \frac{nI_\alpha \cos \alpha + mI_\beta \cos \beta + \dots + I_\theta \cos \theta}{jI_\alpha \cos \alpha}, \tag{8}$$

$$j = n + m + \dots + 1.$$

где j – общее количество светодиодов в помещении; n – количество светодиодов, находящихся под углом падения света α в рассматриваемой точке; m – количество светодиодов, находящихся под углом падения света β в рассматриваемой точке; θ – угол падения света последнего светодиода, град.

Если освещённость от j светодиодов с одинаковой усреднённой силой света I_{cp} , подвешенных на одну и ту же высоту h в любой точке помещения, –

$$E_j = \frac{ZjI_{cp}}{h^2}. \tag{9}$$

Чтобы определить общее количество светодиодов для помещения, необходимо установить изменение освещённости по площади с учётом требуемой равномерности Z . Если светодиодный осветительный

прибор освещает квадратную площадь с длиной стороны a , то наименьшая освещённость в угловой точке периметра площади определяется по выражению:

$$E' = \frac{I_\varphi \cos \varphi}{h^2}, \tag{10}$$

где φ – угол отклонения вектора, направленного в точку изменения освещённости E' , град. (определяется геометрическим способом).

Изменяя высоту подвеса, высокую равномерность освещения по всей площади, получим

$$Z = \frac{E_{max}}{E'} = \frac{I_{0^0}}{I_\varphi} \sqrt{\frac{a^2}{2h^2} + 1} = \frac{\sqrt{\frac{v^2}{2} + 1}}{k_l}, \tag{11}$$

где I_{0^0} – значение силы света при нулевом векторе излучения источника света, зависящее от кривой силы света (КСС), кд; I_φ – значение силы света образованного угла, зависящее от КСС, кд; k_l – коэффициент, показывающий отношение значений сил света, о.е.; v – геометрический показатель подвеса осветительного прибора, показывающий отношение стороны квадратной площади, освещаемой прибором, к высоте подвеса, о.е.

Согласно выражению (11), чтобы добиться высокой равномерности освещения (например, $Z < 1,1$) осветительными приборами с КСС типа Д (точка А на рисунке 4), осветительные приборы должны располагаться друг от друга на расстоянии $2 \times 0,46 h$

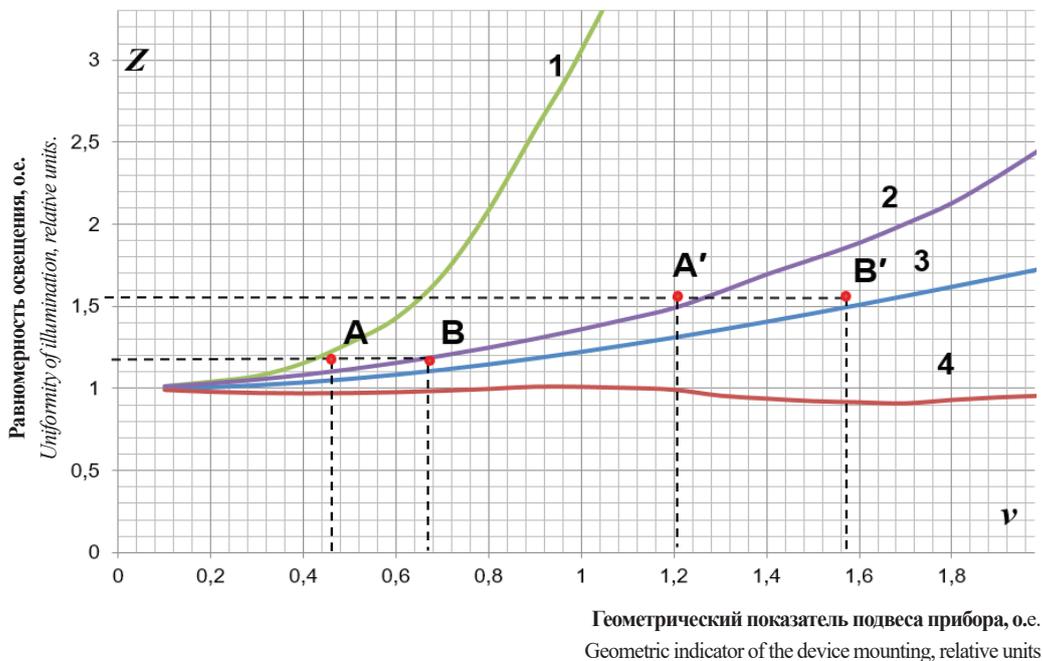


Рис. 4. Зависимость равномерности освещения от геометрического показателя подвеса осветительного прибора при различных типах кривых сил света (КСС):

1 – тип К; 2 – тип Д; 3 – тип М; 4 – тип Л

Fig. 4. Relationship between the uniformity of illumination and the geometric index of the lighting device mounting for various types of light intensity curves:

1 – type K; 2 – type D; 3 – type M; 4 – type L

или при высоте подвеса $h = 2,0$ м на расстоянии не более 1,64 м. Если же допустимая равномерность освещения ответит условию $Z < 1,5$ (точка А' на рисунке 4), то при высоте подвеса $h = 2,0$ м осветительные приборы должны располагаться на расстоянии не более 4,74 м друг от друга. Однако в этих же условиях осветительный прибор с КСС типа М имеет другие характеристики. Если для $Z < 1,1$ и высоты подвеса $h = 2,0$ м светильники можно ставить на расстоянии не более чем на 2,64 м друг от друга, то для $Z < 1,5$ и высоты подвеса $h = 2,0$ м – на расстоянии 6,28 м.

Потребляемая мощность светодиодной системы освещения –

$$P_{\phi} = \frac{ESk_i p_i}{\phi_i \sqrt{\frac{a^2}{2h^2} + 1}}, \quad (12)$$

где a – ширина освещаемой поверхности одним светодиодом в соответствии с кривой силы света, м.

Потребляемая мощность искусственной системы освещения зависит от многих составляющих, в том

числе от высоты подвеса осветительных приборов. Ориентируясь на максимальный рост животного, целесообразно по условию (2) использовать наименьшую высоту подвеса осветительных приборов, что позволяет добиться наименьшего энергопотребления при создании требуемой освещённости для животных. Например, в птичниках при полном содержании (рис. 5) при подвесе светильников на высоту $h = 1,0$ м для создания оптимальной освещённости $E_0 = 100$ лк для нормальной жизнедеятельности птицы, содержащейся в помещении на площади $S = 1000$ м², потребляемая мощность искусственной системы светодиодного освещения составит 14,1 кВт (точка А на рисунке 5) для приборов с кривой силы света типа М, причём для тех же условий, но для приборов с кривой силы света типа Д потребляемая мощность будет ниже в 1,11 и составит 12,7 кВт (точка А'' на рисунке 5). А для приборов с КСС типа Л потребляемая мощность составит 17,9 кВт (точка А' на рисунке 5), что в 1,4 раза выше мощности ИСО с приборами КСС типа Д.

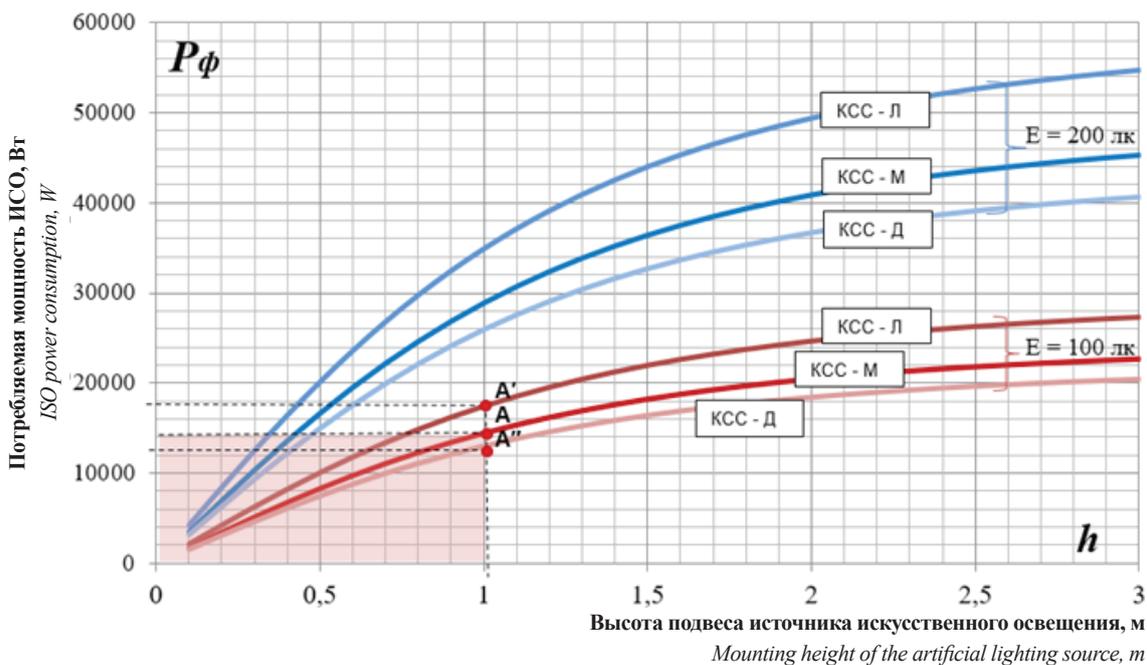


Рис. 5. Потребляемая мощность искусственной светодиодной системы освещения в зависимости от высоты подвеса осветительных приборов*

*При условиях: площадь освещаемого помещения $S = 1000$ м²; ширина освещаемой поверхности $a = 2$ м; световой поток, излучаемый одним светодиодом, $\phi_i = 12$ лм; потребляемая мощность одним светодиодом $p_i = 3$ Вт.

Fig. 5. Relationship between the power consumption of the artificial LED lighting system and the mounting height of the light source under the conditions:

area of the illuminated room $S = 1000$ м²; the illuminated surface width $a = 2$ м; luminous flux emitted by one LED $\phi_i = 12$ лм; power consumption of one LED $p_i = 3$ W

Выводы

Эффективность искусственной системы светодиодного освещения в животноводческих помещениях определяется типом светодиодных источников света

и их программным устройством, высотой подвеса осветительных приборов и кривыми сил света, обусловленными конструктивными особенностями светодиодных осветительных приборов.

Совершенствование светодиодного освещения в животноводстве заключается в разработке новых конструктивных решений осветительных приборов

на основе светодиодов, способствующих снижению потребления электроэнергии и повышению продуктивности животных.

Список литературы

1. Бакиров С.М., Широбокова Т.А., Иксанов И.И., Иксанова К.С. Анализ результатов исследования влияния параметров микроклимата на продуктивность коров // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы XIII Национальной научно-практической конференции с международным участием, г. Саратов, 29-30 апреля 2022 г. Саратов: Амирит, 2022. С. 10-14. EDN: ITMUT.
2. Ерошенко Г.П., Лощкарев И.Ю., Шестаков И.В., Лощкарев В.И. Электроёмкость продукции промышленного птицеводства // Аграрный научный журнал. 2016. № 2. С. 48-50. EDN: VNZMFD.
3. Фисинин В.И., Столляр Т.А., Буюров В.С. Инновационные проекты и технологии в мясном птицеводстве // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2007. № 1 (4). С. 6-12. EDN: KYGRLL.
4. Кавтарашвили А., Марчев С., Кирдяшкина Г. Прерывистое освещение и его особенности // Птицеводство. 2001. № 5. С. 25-27. EDN: UCEROR.
5. Есикова О.А., Верба В.П., Козлов Д.Г. Основы применения искусственного освещения на производство свиноводческой продукции // Молодёжный вектор развития аграрной науки: Материалы 73-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов, г. Воронеж, 1 апреля-31 мая 2022 г. Ч. I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2022. С. 114-120. EDN: KQNJCY.
6. Ovchukova S.A., Kondratieva N.P., Kovalenko O.Y. Energy saving in lighting technologies of agricultural production. *Light & Engineering*. 2021;29(2):21-25. <https://doi.org/10.33383/2020-039>
7. Li G., Li B., Shi Z., Zhao Y., Ma H. Design and evaluation of a lighting preference test system for laying hens // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;147:118-125. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.024>
8. Thomson A., Corscadden K.W. Improving energy efficiency in poultry farms through LED usage: a provincial study. *Energy Efficiency*. 2018;11(4):927-938. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9613-0>
9. Бакиров С.М., Широбокова Т.А., Баранова И.А., Иксанова К.С. Энергосберегающее оборудование и расчёт его параметров // Вестник НГИЭИ. 2022. № 2 (129). С. 56-64. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-2-56-64>

Информация об авторах

Сергей Мударисович Бакиров, д-р техн. наук, доцент, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; 410012, Россия, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина, 4, стр. 3; <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>; s.m.bakirov@mail.ru

Татьяна Александровна Широбокова, канд. техн. наук, доцент, Удмуртский государственный аграрный университет; 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11; <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>; 9048336842@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 14.04.2023, после рецензирования и доработки 03.10.2023; принята к публикации 12.10.2023

References

1. Bakirov S.M., Shirobokova T.A., Iksanov I.I., Iksanova K.S. Analysis of the study results on the influence of microclimate parameters on cow productivity. *Aktualnye problemy energetiki APK: Materialy XIII Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*, Saratov, April 29-30, 2022. Saratov: Amirit, 2022:10-14. (In Rus.)
2. Eroshenko G.P., Loshkarev I.Yu., Shestakov I.V., Loshkarev V.I. Electrical capacity of industrial poultry products. *The Agricultural Scientific Journal*. 2016;2:48-50. (In Rus.)
3. Innovative projects and technologies in meat poultry farming. *Vestnik Orlovskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2007;1:6-12. (In Rus.)
4. Kavtarashvili A., Marchev S., Kiryashkina G. Intermittent lighting and its features. *Ptitsvodstvo*. 2001;5:25-27. (In Rus.)
5. Esikova O.A., Verba V.P., Kozlov D.G. Fundamentals of the use of artificial lighting for the production of pig products. *Molodezhniy vektor razvitiya agrarnoy nauki: Materialy 73-oy natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i magistrantov*, Voronezh, April 01-31, 2022. Part I. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2022:114-120. (In Rus.)
6. Ovchukova S.A., Kondratieva N.P., Kovalenko O.Y. Energy saving in lighting technologies of agricultural production. *Light & Engineering*. 2021;29(2):21-25. <https://doi.org/10.33383/2020-039>
7. Li G., Li B., Shi Z., Zhao Y., Ma H. Design and evaluation of a lighting preference test system for laying hens. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;147:118-125. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.024>
8. Thomson A., Corscadden K.W. Improving energy efficiency in poultry farms through LED usage: a provincial study. *Energy Efficiency*. 2018;11(4):927-938. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9613-0>
9. Bakirov S.M., Shirobokova T.A., Baranova I.A., Iksanova K.S. Energy-saving equipment and calculation of its parameters. *Vestnik NГИЭИ*. 2022;2(129):56-64. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-2-56-64>

Information about the authors

Sergey M. Bakirov, DSc (Eng), Associate Professor; Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; 410012, Saratov, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>; s.m.bakirov@mail.ru

Tatyana A. Shirobokova, CSc (Eng), Associate Professor; Udmurt State Agrarian University, Izhevsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>; 9048336842@mail.ru

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 14.04.2023; revised 03.10.2023; accepted 12.10.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.314.212:621.3.027.5

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-67-75>**Анализ загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 6-10 кВ***А.В. Виноградов^{1,5}, А.В. Виноградова², А.В. Букреев³, А.А. Лансберг⁴*^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия⁵ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия^{1,5} winaleksandr@gmail.com² alinawin@gmail.com³ alexziend@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>⁴ lansbergaa@vk.com; <https://orcid.org/0000-0002-2834-6092>

Аннотация. Силовые трансформаторы 6-10/0,4 кВ, питающие сельские электрические сети 0,4 кВ, работают с низкими значениями коэффициентов загрузки, что приводит к значительным потерям электроэнергии. Оптимизация загрузки силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ позволит повысить их энергоэффективность. С целью оценки загрузки и потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с высшим напряжением 6-10 кВ сельских электрических сетей в Орловском районе электрических сетей (РЭС) филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» проведен анализ статистических данных диспетчерских журналов оперативно-технологической группы РЭС нагрузки силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ электрических сетей за 2016-2022 гг. В результате установлено, что 880 силовых трансформаторов (74% от общего количества) работают с коэффициентом загрузки не более 20%. Среди силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ с номинальными мощностями 63, 100, 160 и 250 кВА коэффициент загрузки не более 20% имеют 72-77%. Установлено, что в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ Орловского РЭС годовые потери электроэнергии холостого хода в 1,8-2,9 раза превышают потери короткого замыкания. Выявлено, что доля потерь холостого хода для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ составляет 65-74% от общих годовых потерь электроэнергии. Оценка загрузки силовых трансформаторов позволила разработать ряд мероприятий по сокращению потерь электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ Орловского РЭС: отключение трансформаторов, имеющих сезонную нагрузку; замена недогруженных и перегруженных трансформаторов на трансформаторы необходимой мощности; перевооружение парка силовых трансформаторов 6-10 кВ на современные силовые трансформаторы с энергоэффективностью класса Х2К2 и выше.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, номинальная мощность, коэффициент загрузки, потери холостого хода, потери короткого замыкания, энергоэффективность силовых трансформаторов, загрузка силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ

Для цитирования: Виноградов А.В., Виноградова А.В., Букреев А.В., Лансберг А.А. Анализ загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 6-10 кВ // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 67-75. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-67-75>

ORIGINAL PAPER

Analysis of the load of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV*A.V. Vinogradov^{1,5}, A.V. Vinogradova², A.V. Bukreev³, A.A. Lansberg⁴*^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia⁵ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia^{1,5} winaleksandr@gmail.com² alinawin@gmail.com³ alexziend@gmail.com⁴ lansbergaa@vk.com

Abstract. Power transformers 6-10/0.4 kV feeding 0.4 kV rural electric networks operate with low load factors. This leads to significant electricity losses. Optimization of the load of 6-10/0.4 kV power transformers will increase their energy efficiency. To assess the load and loss of electricity in power transformers with a higher voltage of 6-10 kV

of rural electric networks in the Orel district of electric networks (DEN) of the branch of PJSC Rosseti Tsentr – Orelenergo, the authors carried out an analysis of statistical data obtained from operational and technological group dispatcher logs on the load of power transformers 6-10/0.4 kV of electric networks for 2016-2022. As a result, it was found that 880 power transformers (74% of the total number) operate with a load factor of less than 20%. Among the 6-10/0.4 kV power transformers with rated powers of 63, 100, 160, and 250 kVA, the load factor of less than 20% accounts for 72-77%. It is established that in power transformers 6-10/0.4 kV of the Orel DEN, annual losses of idle power are 1.8-2.9 times higher than the short circuit losses. It is revealed that the share of idling losses for different nominal capacities of power transformers 6-10/0.4 kV is 65-74% of the total annual electricity losses. The assessment of the load of power transformers is necessary to develop a number of measures to reduce electricity losses in the 0.4 kV electrical networks of the Orel DEN: disconnecting transformers with seasonal loads; replacing underloaded and overloaded transformers with transformers of the required capacity; re-equipping the fleet of 6-10 kV power transformers with modern power transformers with energy efficiency of class X2K2 and higher.

Keywords: power transformers, rated power, load factor, no-load losses, short circuit losses, energy efficiency of power transformers, load of power transformers 6-10/0.4 kV

For citation: Vinogradov A.V., Vinogradova A.V., Bukreev A.V., Lansberg A.A. Analysis of the load of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):67-75. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-67-75>

Введение. Повысить эффективность функционирования силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ можно оптимизацией их загрузки и применением технических средств и способов мониторинга электрических параметров сетей для рационального выбора электрооборудования и управления их конфигурацией [1].

Проблема низкой загрузки силовых трансформаторов обусловлена несоответствием потребляемой мощности заявленной мощности потребителей. Согласно Постановлению Правительства РФ от 27 декабря 2004 г. № 861 физические лица до июля 2022 г. могли указывать в заявке на технологическое присоединение мощность до 15 кВт включительно, оплачивая за присоединение одинаковую стоимость – 550 руб. При этом фактически потребляемая мощность зачастую оказывалась ниже заявленной. Сетевые организации рассчитывали мощность трансформаторов и необходимый резерв данной мощности, исходя из суммарной заявленной мощности потребителей, что приводило к низкой загрузке трансформаторов.

Для оптимизации загрузки распределительных силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ рассматриваются как теоретические аспекты повышения степени загрузки оборудования [2], так и практические рекомендации: например, оптимизация режимов сетей по напряжению и реактивной мощности [3], отключение одного из малозагруженных трансформаторов [4], оптимизация точек размыкания распределительных сетей 35 кВ и ниже [5], замена недогруженных трансформаторов на трансформатор меньшей мощности [6] и устаревших трансформаторов на энергоэффективные [7].

Разработана методика точной оценки степени загрузки силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

с помощью данных, получаемых от интеллектуальных систем учета электроэнергии, которая на 30...60% повышает точность определения коэффициента загрузки трансформатора по сравнению с методами режимных замеров и заявленной мощности [1].

Для снижения потерь холостого хода силовых трансформаторов предлагается осуществлять электроснабжение потребителей от одного из двух параллельно включенных трансформаторов 20-35/0,231-0,4 кВ разной номинальной мощности [8] (например, 500 кВА и 2000 кВА), что позволит в разные периоды времени года и суток добиться оптимальных коэффициентов загрузки.

Аналогичные мероприятия предложены на примере высоковольтных силовых трансформаторов с высшим напряжением 110 кВ [9]. Также на примере трансформаторов с высшим напряжением 35-220 кВ предлагается реализовать мероприятия по повышению коэффициента загрузки, что позволит сократить потери на 2210543,36 кВт·ч и снизить их долю с 2,1 до 1,47% от общего отпуска электроэнергии [10].

Оптимальный выбор количества и номинальной мощности силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ в зависимости от мощности подключенной нагрузки позволяет сделать математические выражения [11].

На примере электрических сетей Осинского района, обслуживаемого ОАО «Иркутская сетевая компания», в 2019 г. было произведено 137 замеров нагрузки трансформаторов сельских электрических сетей, из которых 34 замера осуществлялись на трансформаторах номинальной мощностью 63 кВА, 43 – на трансформаторах 100 кВА, 26 – на трансформаторах 160 кВА [12]. Выявлено, что среднее значение коэффициента загрузки по всей номенклатуре номинальных мощностей составляет 18,8%,

что значительно ниже рекомендуемых производителями 85...95%. Для увеличения энергоэффективности силовых трансформаторов нами предложено сократить число трансформаторов с одновременным изменением конфигурации распределительных сетей 0,4 кВ.

Низкая загрузка трансформаторов наблюдается и среди наиболее часто применяемых в филиале в ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» силовых трансформаторов 6-10 кВ. Неэффективное использование вследствие этого трансформаторного парка приводит в итоге к неоправданному росту тарифов на электроэнергию и снижению энергоэффективности систем электроснабжения.

Цель исследований: анализ загрузки и потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с высшим напряжением 6-10 кВ сельских электрических сетей, эксплуатируемых филиалом ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго».

Материалы и методы. Согласно диспетчерским журналам оперативно-технологической группы РЭС в Орловском районе электрических сетей (РЭС) филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» за 2016-2022 гг. произведено 1194 оперативных замера нагрузок и напряжений на стороне низкого напряжения 0,4 кВ силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ.

Оперативные замеры производились при производстве плановых и аварийных отключений воздушных линий (ВЛ) 0,4 кВ, подключенных к трансформаторным подстанциям (ТП) 6-10/0,4 кВ для планирования мероприятий по техническому перевооружению, реконструкции объектов электросетевого комплекса и возможности присоединения новых потребителей к действующим электрическим сетям. Замеры осуществлялись с использованием токовых клещей, измеряющих полное значение тока, протекающего по проводнику. Данные замеры производились в связи с тем, что приборы учёта, устанавливаемые

на стороне низкого напряжения силового трансформатора 6-10/0,4 кВ, не оснащены средствами дистанционной передачи измерений, производят измерения для всей ТП в целом, что в случае подключения к ней нескольких отходящих ВЛ 0,4 кВ не позволяет сделать вывод о загрузке каждой из линий.

Методика определения коэффициента загрузки трансформатора и составляющих потерь в нём. В оперативном журнале содержатся сведения об оперативных замерах на одной из ТП, от которой отходят 3 ВЛ 0,4 кВ, а мощность установленного силового трансформатора составляет 100 кВА. Результаты замеров нагрузки представлены в таблице 1.

Методом измерения с использованием токоизмерительных клещей полная мощность (S_{ϕ} , ВА), например, для фазы А, вычисляется по формуле¹:

$$S_{\phi, A} = I_{\phi, A} \cdot U_{\phi, A}, \tag{1}$$

где $I_{\phi, a}$ – измеренное значение тока фазы А, А; $U_{\phi, a}$ – измеренное значение напряжения фазы А, В.

Полная мощность, потребляемая одной из ВЛ 0,4 кВ ($S_{ВЛ 0,4 кВ}$, ВА), определяется по формуле:

$$S_{ВЛ 0,4 кВ} = S_{\phi, A} + S_{\phi, B} + S_{\phi, C}, \tag{2}$$

где $S_{\phi, A}$ – полная мощность, протекающая по фазе А, ВА; $S_{\phi, B}$ – полная мощность, протекающая по фазе В, ВА; $S_{\phi, C}$ – полная мощность, протекающая по фазе С, ВА.

Ввиду того, что полная мощность двухобмоточного трехфазного трансформатора почти равномерно распределяется на три фазы, то есть для трансформатора номинальной мощностью 100 кВА мощность каждой фазы будет приблизительно равна 33,3 кВА, действующую загрузку трансформатора ($S_{действ.СТ}$, ВА), можно определить по формуле:

$$S_{действ.СТ} = S_{ВЛ 0,4 кВ \ № 1} + S_{ВЛ 0,4 кВ \ № 2} + \dots + S_{ВЛ 0,4 кВ \ n}, \tag{3}$$

где $S_{ВЛ 0,4 кВ \ № 1}$, $S_{ВЛ 0,4 кВ \ № 2}$ и $S_{ВЛ 0,4 кВ \ n}$ – полная мощность ВЛ 0,4 кВ № 1, ВЛ 0,4 кВ № 2 и n-й ВЛ 0,4 кВ, подключённых к силовому трансформатору 6-10/0,4 кВ, ВА.

Таблица 1

Оперативные замеры нагрузок и напряжений на воздушных линиях 0,4 кВ, отходящих от трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ

Table 1

Real-time measurements of loads and voltages on 0.4 kV overhead lines outgoing from 10/0.4 kV transformer substations

Диспетчерский номер воздушной линии 0,4 кВ <i>Dispatching number of the 0.4 kV overhead line</i>	Оперативные замеры / <i>Real-time measurements</i>					
	Токи, фаза, А / <i>Currents, Amp</i>			Напряжения, фаза, В / <i>Voltage, V</i>		
	А	В	С	А	В	С
ВЛ 0,4 кВ № 1 / <i>Overhead line 0,4 kV № 1</i>	13	13	10	230	230	234
ВЛ 0,4 кВ № 2 / <i>Overhead line 0,4 kV № 2</i>	22	20	21	230	230	234
ВЛ 0,4 кВ № 3 / <i>Overhead line 0,4 kV № 2</i>	9	10	30	230	230	234

¹ Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

Исходя из полной нагрузки, протекающей на стороне низкого напряжения 0,4 кВ силового трансформатора 6-10/0,4 кВ, можно рассчитать коэффициент загрузки силового трансформатора (β_3 , %) по формуле²:

$$\beta_3 = \frac{S_{\text{действ.СТ}}}{S_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность силового трансформатора, ВА.

С учётом полученных для исследуемой выборки коэффициентов загрузки было произведено статистическое распределение загрузок силовых трансформаторов по диапазонам: 0...20%; 20...40%; 40...60%; 60...80%; 100% и более. Определены максимальные, минимальные и среднеарифметические коэффициенты загрузки для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ.

Значение среднеарифметического коэффициента загрузки, например, для трансформатора с номинальной мощностью 100 кВА ($\beta_{3,\text{ср.взв}}^{100\text{ кВА}}$, %), определялось по формуле²:

$$\beta_{3,\text{ср.арф}}^{100\text{ кВА}} = \frac{\sum \beta_3^i}{n}, \quad (5)$$

где $\sum \beta_3^i$ – коэффициент загрузки i -го силового трансформатора мощностью 100 кВА, %; n – количество коэффициентов загрузки трансформаторов мощностью 100 кВА, ед.

Аналогичным образом определяются значения среднеарифметических коэффициентов загрузки силовых трансформаторов для других номинальных мощностей силовых трансформаторов.

Наиболее достоверным для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ будут являться средневзвешенные коэффициенты загрузки. Например, значение средневзвешенного коэффициента загрузки силового трансформатора 6-10/0,4 кВ с номинальной мощностью 100 кВА ($\beta_{3,\text{ср.взв}}^{100\text{ кВА}}$, %) с учётом полученных статистических диапазонов загрузки можно определить по формуле¹:

$$\beta_{3,\text{ср.взв}}^{100\text{ кВА}} = \frac{n \cdot 20\% + m \cdot 40\% + p \cdot 60\% + k \cdot 80\%}{n + m + p + k + l + t + b} + \frac{l \cdot 100\% + t \cdot 120\% + b \cdot n\%}{n + m + p + k + l + t + b}, \quad (6)$$

где n, m, p, k, l, t, b – количество силовых трансформаторов номинальной мощностью 100 кВА с загрузкой, соответственно, до 20%, от 20 до 40%, от 40 до 60%, от 60 до 80%, от 80 до 100%, от 100 до 120%, с n -й загрузкой, ед.

² Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

Аналогичным образом определены средневзвешенные коэффициенты загрузки для всего диапазона номинальных мощностей силовых трансформаторов, эксплуатируемых в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго».

С учётом полученных средневзвешенных коэффициентов загрузки можно определить годовые потери электроэнергии ($W_{\text{эз}}$, кВт·ч) в двухобмоточных трёхфазных силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ²:

$$W_{\text{эз}} = P_{\text{хх}} \cdot t + P_{\text{кз}} \cdot (\beta_{3,\text{ср.взв}}^{100\text{ кВА}})^2 \cdot \tau_{\text{max}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{хх}}$ – паспортные данные потерь холостого хода в силовом трансформаторе, кВт; t – число часов в году, 8760; $P_{\text{кз}}$ – паспортные данные потерь холостого хода в силовом трансформаторе, кВт; τ_{max} – время максимальных потерь мощности, ч.

Потери электроэнергии определяются для силовых трансформаторов, номинальная мощность которых соответствует действующему ГОСТ 9680-77 «Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более» и по которым имеется достаточная статистическая выборка данных о замерах нагрузки и напряжений, а именно: 63, 100, 160, 250, 400 и 630 кВА. На трансформаторах данных номинальных мощностей было произведено от 32 до 333 оперативных замеров нагрузок и напряжений.

В работе [13] отражен анализ технических характеристик силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ, находящихся в эксплуатации в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго». Было выявлено, что среди 6206 ед. оборудования 4528 силовых трансформаторов, составляющих 73% от общего количества, имеют схему соединения обмоток «Звезда-звезда» с нулевым проводом и нулевой группой соединения обмоток (Y/Y_n-0). Среди 6206 трансформаторов филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» 5156 – типа ТМ, что составляет 83% от общего количества. Примем допущение, что все замеры нагрузки производились на трансформаторах ТМ со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0.

Паспортные значения потерь холостого хода и короткого замыкания силовых трансформаторов разных номинальных мощностей конструкций ТМ³ представлены в таблице 2. Данные использовались в расчёте годовых потерь электроэнергии в соответствии с формулой (7).

Результаты и их обсуждение. Статистические данные о загрузках силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ Орловского РЭС филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» показали, что преимущественно загрузка трансформаторов не превышает 20% (табл. 3).

Анализ загрузки наиболее часто применяемых в данном филиале силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ проведен на основе данных более ранних исследований авторов [13]. Выявлено, что распределительные электрические сети 0,4 кВ питаются от понижающих трансформаторных подстанций (ТП) 6-10/0,23-0,4 кВ, в которых установлено 6206 силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ. Наиболее часто используемые

мощности – 63 кВА (853 шт.), 100 кВА (1454 шт.), 160 кВА (1252 шт.), 250 кВА (802 шт.) (рис. 1).

Согласно результатам замеров (рис. 1) наиболее часто эксплуатируемые в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» силовые трансформаторы 6-10/0,4 кВ в большинстве случаев имеют коэффициент загрузки 72...77%. Работают с полной загрузкой 1...2% электроустановок, с нагрузкой, превышающей номинальную мощность трансформатора, – 1%.

Технические характеристики силовых трансформаторов 6-10 кВ со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0 Таблица 2

Technical characteristics of 6-10 kV power transformers with circuit and winding connection group Y/Y_n-0 Table 2

Трансформаторы серии ТМ / Transformers of the TM series				
Мощность, кВА <i>Power, kVA</i>	Сочетание напряжений, кВ / Combination of voltages, kV		Потери КЗ, Вт <i>Short circuit losses, W</i>	Потери ХХ, Вт <i>No-load losses, W</i>
	ВН	НН		
63	6-10	0,4	1280	220
100	6-10	0,4	1970	290
160	6-10	0,4	2650	400
250	6-10	0,4	3700	550
400	6-10	0,4	5400	800
630	6-10	0,4	7600	1010

Распределение коэффициентов загрузки силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ Орловского РЭС Таблица 3

Distribution of load coefficients of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV of the Orel DEN Table 3

Мощность трансформатора, кВА <i>Transformer power, kVA</i>	Количество замеров, ед. <i>Number of measurements, units.</i>	Распределение количества трансформаторов по коэффициенту загрузки, ед. <i>Distribution of the number of transformers by load factor, units.</i>					
		0-20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%	>100%
10	2	0	2	0	0	0	0
16	1	1	0	0	0	0	0
25	16	4	3	0	2	2	5
30	2	2	0	0	0	0	0
40	8	5	3	0	0	0	0
60	32	21	9	2	0	0	0
63	133	101	21	7	4	0	0
100	333	240	61	15	11	4	2
160	324	235	64	11	7	5	2
180	7	7	0	0	0	0	0
250	219	168	38	6	5	2	0
320	1	1	0	0	0	0	0
400	76	58	13	5	0	0	0
630	38	35	3	0	0	0	0
1000	2	2	0	0	0	0	0
Итого / Total	1194	880	217	46	29	13	9

³ Новые технологии. Силовые трансформаторы, подстанции, электрооборудование и пр. URL: <https://transelektro.nt-rt.ru/?ysclid=lfwdlojypo86783165> (дата обращения: 31.03.2023).

В Орловском РЭС имеются трансформаторы с номинальной мощностью 25, 63, 100, 160, 250, 400, 630 и 1000 кВА, а также 60 кВА (не входит в ГОСТ 9680-77),

которые работают в режиме холостого хода (рис. 2). Для номинальных мощностей силовых трансформаторов 1000 и 16 кВА, а также мощностей 320, 180

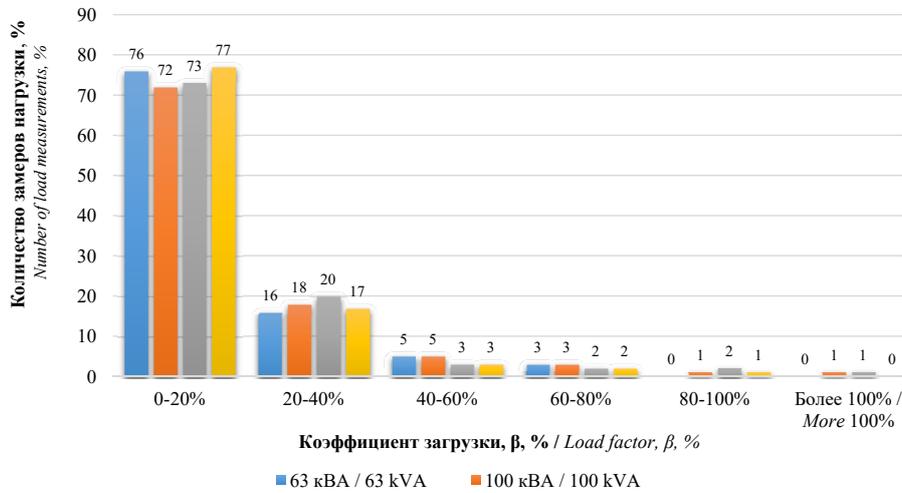


Рис. 1. Распределение силовых трансформаторов 6-10 кВ по загрузке в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго», % от общего количества
 Fig. 1. Distribution of 6-10 kV power transformers by load in the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenergo (% of the total number)

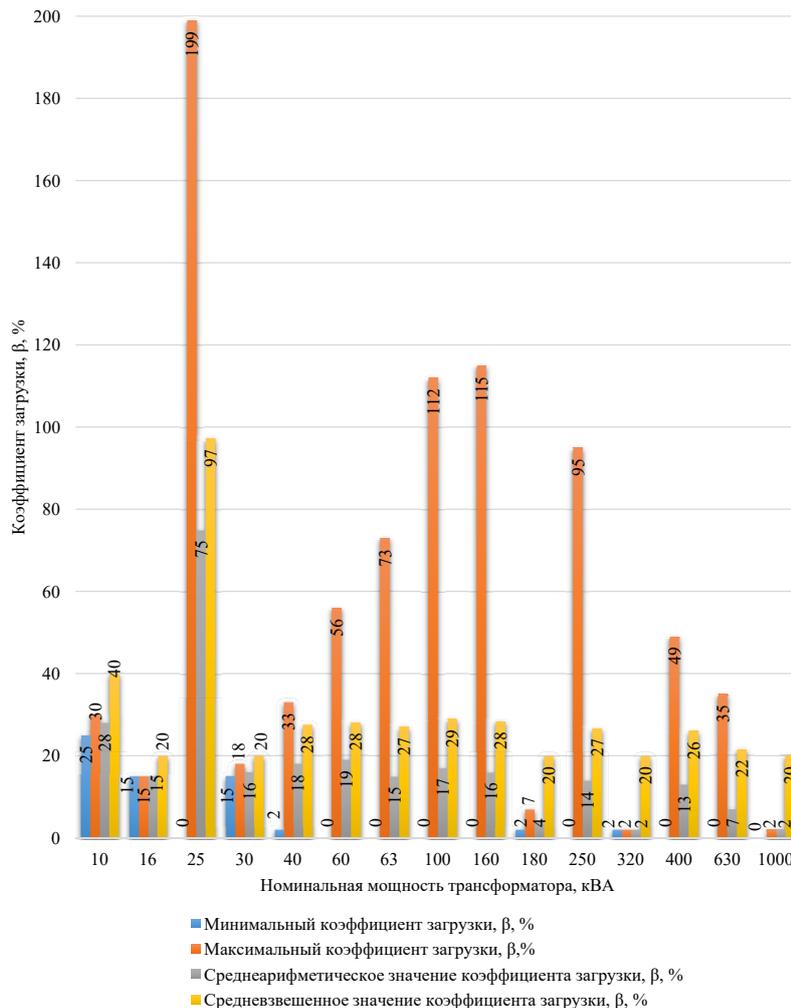


Рис. 2. Коэффициент загрузки силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ Орловского РЭС
 Fig. 2. Load factor of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV of the Orel DEN

и 30 кВА (не входят в ГОСТ 9680-77) коэффициент загрузки не превышал значения 20%. Для трансформаторов 100, 160 и 250 кВА были зафиксированы коэффициенты загрузки от 95 до 115%, а для одного трансформатора номинальной мощностью 25 кВА была зафиксирована двухкратная перегрузка со значением коэффициента загрузки 199%, которая согласно пункту 5.3.15 Правил технической эксплуатации электростанций и сетей может продолжаться не более 10 мин.

Минимальные значения среднеарифметических коэффициентов загрузки (2%) характерны для силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ с номинальной мощностью 320 и 1000 кВА. Наибольшее значение среднеарифметического коэффициента загрузки (75%) характерно для силовых трансформаторов номинальной мощностью 25 кВА ввиду работы одного из них с 2-кратной перегрузкой во время замера.

Полученные по формуле (6) расчётные значения средневзвешенных коэффициентов загрузки (рис. 2) использовались для расчёта годовых потерь электроэнергии, вызванных составляющими холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ), в силовых трансформаторах в соответствии с формулой (7) и паспортными данными трансформаторов, представленными в таблице 2. Результаты расчётов потерь представлены в таблице 4.

В результате расчётов потерь электроэнергии в силовых трансформаторах выявлено, что потери холостого хода в 1,8...2,9 раза превышают потери электроэнергии, вызванные составляющей короткого замыкания. Это обусловлено низкими значениями коэффициентов загрузки силовых трансформаторов

6-10/0,4 кВ, осуществляющих электроснабжение сельских коммунально-бытовых потребителей Орловской области. Значительная доля потерь электроэнергии от составляющей холостого хода обуславливает большие затраты электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» на компенсацию потерь электроэнергии в собственных электрических сетях.

Таким образом, часть бюджета, выделяемая электросетевой компании в рамках ежегодной инвестиционной программы, расходуется нерационально, во время как могла быть направлена на модернизацию электросетевых объектов и техническое перевооружение объектов электросетевого комплекса.

Доля потерь электроэнергии от составляющей холостого хода для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ составляет 65...74% от общих потерь. Полученные соотношения потерь обуславливают необходимость реализации организационных мероприятий по замене силовых трансформаторов на ТП 6-10/0,4 кВ.

Отметим, что в теоретических расчётах были учтены паспортные данные, характерные для новых трансформаторов. Ввиду длительной эксплуатации и возможного ухудшения магнитных свойств сердечников трансформаторов потери холостого хода могут быть еще больше [14].

Для оценки нагрузки и планирования мероприятий по реконструкции электрических сетей, в том числе по замене силовых трансформаторов, актуальным является внедрение технических средств и способов мониторинга электрических параметров сельских сетей⁴.

Таблица 4

Результаты расчётов годовых потерь электроэнергии в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ Орловского РЭС по средневзвешенному коэффициенту загрузки

Table 4

Calculation data on annual electricity losses in power transformers 6-10/0.4 kV of the Orel DEN by the weighted average load factor

Номинальная мощность силового трансформатора, кВА <i>Rated power of the power transformer, kVA</i>	Годовые потери электроэнергии от составляющей холостого хода, кВт·ч (%) <i>Annual electricity losses from idling component, kW·h (%)</i>	Годовые потери электроэнергии от составляющей короткого замыкания, кВт·ч (%) <i>Annual electricity losses from short-circuit component, kW·h (%)</i>	Суммарные годовые потери электроэнергии, кВт·ч <i>Total annual electricity losses, kW·h</i>
63	1927 (70)	822 (30)	2749
100	2540 (64)	1447 (36)	3988
160	3504 (65)	1876 (35)	5380
250	4818 (68)	2305 (32)	7123
400	7008 (69)	3211 (31)	10219
630	8848 (74)	3100 (26)	11948

⁴ Виноградов А.В. Принципы управления конфигурацией сельских электрических сетей и технические средства их реализации: Монография. Орёл: Изд-во «Каргуш», 2022. 392 с.

Отметим, что поправки, внесенные 24 марта 2023 г. в Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2004 г. № 861, изменили порядок осуществления технологического присоединения. Увеличение стоимости за 1 кВт присоединяемой мощности будет стимулировать потребителей более взвешенно подходить к выбору заявляемой мощности и в перспективе позволит повысить коэффициенты загрузки силовых трансформаторов сельских электрических сетей.

Для сокращения потерь электроэнергии в электрических сетях филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» намечены к реализации следующие технические мероприятия: отключение трансформаторов, имеющих сезонную нагрузку; замена недогруженных и перегруженных трансформаторов на трансформаторы необходимой мощности; техперевооружение парка силовых трансформаторов 6-10 кВ на современные трансформаторы классов энергоэффективности Х2К2 и выше

с уменьшенными потерями холостого хода и короткого замыкания, выпускаемые в соответствии с СТО 34.01-3.2-011.2017 ПАО «Россети».

Выводы

1. Силовые трансформаторы 6-10/0,4 кВ, питающие сельские электрические сети 0,4 кВ, работают с низкими значениями коэффициентов загрузки, что приводит к значительным потерям электроэнергии.

2. В Орловском РЭС филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» 74% силовых трансформаторов работают с коэффициентом загрузки не более 20%. Потери холостого хода в 1,8...2,9 раза превышают потери электроэнергии, вызванные составляющей короткого замыкания. Доля потерь электроэнергии от составляющей холостого хода для разных номинальных мощностей силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ составляет 65...74% от общих потерь электроэнергии за год.

Список литературы

1. Мусаев Т.А., Хабибуллин М.Н., Шагеев С.Р., Федоров О.В. Разработка методики точной оценки фактической загрузки трансформаторов 6(10)-0,4 кВ с помощью данных от интеллектуальных систем учёта электрической энергии // *Электричество. Передача и распределение*. 2022. № 4 (73). С. 22-27. EDN: MMBXUR.
2. Фурсанов М.И., Радкевич В.Н. Об оптимальных режимах работы силовых трансформаторов // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика*. 2008. № 2. С. 32-38. EDN: SGQIQZ.
3. Слатинова М.Н. Повышение энергоэффективности при распределении электроэнергии рациональной нагрузкой трансформаторов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2010. № 1. С. 271-276. EDN: MVDZQH.
4. Alyunov A.N., Vyatkina O.S., Akhmetova I.G., Pentuc R.D., Sakipov K.E. Issues on optimization of operating modes of power transformers. *E3S Web of Conferences*. 2019;124:02015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402015>
5. Bajracharya G., Koltunowicz T., Negenborn R.R., Djairam D., De Shutter B., Smith J.J. Optimization of Transformer Loading Based on Hot-Spot Temperature Using a Predictive Health Model. *Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics*. Japan: Tokyo, 2010. Pp. 914-917.
6. Renedo C.J., Santisteban A., Ortiz F., Olmo C., Ortiz A. Evaluation of the Optimal Connection of Power Transformers in the Substations of a Hospital. *Energies*. 2018;11(2):419. <https://doi.org/10.3390/en11020419>
7. Tang Z., Li Zh., Wei J. Research on load optimization management and application of power transformers. *Proceedings. SPIE12598, Eighth International Conference on Energy Materials and Electrical Engineering (ICEMEE2022)*. 2023;125982Z. <https://doi.org/10.1117/12.2673040>
8. Kaya Z., İmal N., Gökhasan O. On power transformers energy efficiency based load transfer analysis. *International Journal of Energy Applications and Technologies*. 2018;5(3):115-118. <https://doi.org/10.31593/ijeat.442589>
9. Хоменко И.В., Березка С.К., Поляков И.В. Анализ оптимальных режимов работы силовых трансформаторов

References

1. Musaev T.A., Khabibullin M.N., Shageev S.R., Fedorov O.V. Development of a methodology for accurate assessment of the actual load of transformers 6(10)-0.4 kV using data from intelligent electric energy metering systems. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2022;4:22-27. (In Rus.)
2. Fursanov M.I., Radkevich V.N. About the optimal operating modes of power transformers. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2008;2:32-38. (In Rus.)
3. Slatinova M.N. Improving energy efficiency in the distribution of electricity by rational loading of transformers. *Izvestiya TulGU, Tekhnicheskie Nauki*. 2010;1:271-276. (In Rus.)
4. Alyunov A.N., Vyatkina O.S., Akhmetova I.G., Pentuc R.D., Sakipov K.E. Issues on optimization of operating modes of power transformers. *E3S Web of Conferences*. 2019;124:02015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402015>
5. Bajracharya G., Koltunowicz T., Negenborn R.R., Djairam D., De Shutter B., Smith J.J. Optimization of Transformer Loading Based on Hot-Spot Temperature Using a Predictive Health Model. *Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics*. Tokyo. Japan. 2010. pp. 914-917.
6. Renedo C.J., Santisteban A., Ortiz F., Olmo C., Ortiz A. Evaluation of the Optimal Connection of Power Transformers in the Substations of a Hospital. *Energies*. 2018;11(2):419. <https://doi.org/10.3390/en11020419>
7. Tang Z., Li Zh., Wei J. Research on load optimization management and application of power transformers. *Proceedings. SPIE12598, Eighth International Conference on Energy Materials and Electrical Engineering (ICEMEE2022)*. 2023;125982Z. <https://doi.org/10.1117/12.2673040>
8. Kaya Z., İmal N., Gökhasan O. On power transformers energy efficiency based load transfer analysis. *International Journal of Energy Applications and Technologies*. 2018;5(3):115-118. <https://doi.org/10.31593/ijeat.442589>
9. Khomenko I., Berezka S., Poliakov I. Analysis of optimum operating modes of power transformers under operating conditions. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2016;6:70-73. (In Rus.) 10.20998/2074-272X.2016.6.12

в условиях эксплуатации // Электротехника і Електромеханіка. 2016. № 6. С. 70-73. EDN: XEQDUX.

10. Мироненко Ю.Е. Оценка эффективности загрузки силовых трансформаторов на примере центрального энергорайона Амурской области // Научные исследования. 2017. № 7 (18). С. 5-8. EDN: YUIAJN.

11. Трушников А.Л., Радкевич В.Н. Выбор рациональных режимов работы силовых трансформаторов по условию минимума потерь активной мощности // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2006. № 1 (24). С. 23-29. EDN: PYSMPP.

12. Наумов И.В., Карамов Д.А., Третьяков А.Н., Якупова М.А., Федоринова Э.С. Исследование загрузки силовых трансформаторов в системах сельского электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2020. Т. 13, № 4. С. 282-289. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289>

13. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Виноградова А.В. Структура парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ на примере электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго», обслуживающей сельские электрические сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 5. С. 34-45. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45>

14. Балабин А.А., Волчков Ю.Д. Повышение достоверности расчёта потерь электроэнергии в трансформаторах 10(6)/0,4 кВ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 4. С. 22-23. EDN: KLTКМН.

10. Mironenko Yu.E. Evaluating the efficiency of loading power transformers as exemplified by the central power district of the Amur region. *Nauchnye Issledovaniya*. 2017;7:5-8. (In Rus.)

11. Trushnikov A.L., Radkevich V.N. Selection of rational modes of operation of power transformers according to the condition of minimum loss of active power. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. P.O. Sukhogo*, 2006;1:23-29. (In Rus.)

12. Naumov I.V., Karamov D.A., Tretyakov A.N., Yakupova M.A., Fedurinova E.S. Study of the loading of power transformers in rural power supply systems. *Nadezhnost i Bezopasnost Energetiki*. 2020;13(4):282-289. (In Rus.)

13. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Vinogradova A.V. Structure of the range of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV as exemplified by the electric grid organization of the branch of PJSC “Rosseti Center”-“Orelenego” serving rural electric networks. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki*. 2021;23(5):34-45. (In Rus.)

14. Balabin A.A., Volchkov Yu.D. Increasing the reliability of the calculation of electricity losses in transformers 10(6)/0.4 kV. *Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Selskogo Khozyaystva*. 2009;4:22-23. (In Rus.)

Информация об авторах

Александр Владимирович Виноградов^{1,5}, д-р техн. наук., доцент; winaleksandr@gmail.com

Алина Васильевна Виноградова², канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; alinawin@gmail.com

Алексей Валерьевич Букреев³, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; alexziend@gmail.com

Александр Александрович Лансберг⁴, специалист, магистрант; lansbergaa@vk.com

^{1,2,3,4} Федеральное научное агроинженерное учреждение ВИМ; 109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

⁵ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Критерии авторства

А.В. Виноградов – научное руководство, концептуализация, верификация данных, доработка текста.

А.В. Виноградова – концептуализация, анализ полученных данных, доработка текста

А.В. Букреев – ресурсы, методология, визуализация

А.А. Лансберг – формальный анализ, подготовка текста статьи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 11.05.2023, после рецензирования 19.06.2023, принята к публикации 11.09.2023

Information about the authors

Aleksandr V. Vinogradov^{1,5}, DSc (Eng), Associate Professor; winaleksandr@gmail.com

Alina V. Vinogradova², CSc (Eng), Associate Professor; alinawin@gmail.com

Aleksei V. Bukreev³, CSc (Eng), Senior Researcher; alexziend@gmail.com

Aleksandr A. Lansberg⁴, Specialist, MSc student; lansbergaa@vk.com

^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM;

⁵ 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russia

⁵ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Author contribution

A.V. Vinogradov – scientific supervision, conceptualization, data verification, text revision.

A.V. Vinogradov – conceptualization, data analysis, text revision

A.V. Bukreev – resources, methodology, visualization.

A.A. Lansberg – formal analysis, original draft preparation

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 11.05.2023; revised 19.06.2023; accepted 11.09.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 621.385.6

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-76-82>

Термообработка слизистых субпродуктов под воздействием электрофизических факторов: разработка установки

Е.В. Воронов¹, О.В. Михайлова², Г.В. Новикова³, М.В. Просвирякова⁴, В.Ф. Сторчевой⁵^{1,2,3} Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; г. Княгинино, Россия^{4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ e_voronov@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9867-5860>² ds17823@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9231-4733>³ NovikovaGalinaV@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>⁴ prosviryakova.maryana@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3258-260x>⁵ energo-air@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

Аннотация. Низкая эффективность оборудования для термообработки, обеззараживания и удаления неприятного запаха некондиционного слизистого субпродукта обуславливает необходимость разработки установки, предусматривающей комплексное воздействие электромагнитного поля сверхвысокой частоты, озона и бактерицидного потока ультрафиолетовых лучей. Представлена технология и разработана установка, обеспечивающая электромагнитную безопасность и равномерность загрузки в соответствии с глубиной проникновения волны. Продолжительность нахождения сырья согласована с удельной мощностью СВЧ-генератора, мощностью ламп и с частотой вращения диска с отсеками. Напряжённость электрического поля исследована в программе CST Microwave Studio. Разработанная установка содержит резонатор в виде сплюснутого сфероида с диаметрами главных осей, кратными половине длины волны. На верхней поверхности сфероида по периметру размещены магнетроны. На внутреннюю поверхность сфероида, где имеются коронирующие иглы, по периметру равномерно установлены через зазор кольцевые электрогазоразрядные лампы, запитанные от импульсно моделированных высокочастотных генераторов. Источником излучения в бактерицидной лампе служит электрический разряд в смеси паров ртути с аргоном. На уровне большого диаметра сфероида установлен фторопластовый перфорированный диск, на котором обрабатываются слизистые субпродукты. Проведенные исследования показывают, что собственная добротность сфероидного резонатора составляет 9000. Наиболее эффективно термообработка и обеззараживание сырья осуществляются при производительности установки 50 кг/ч, напряжённости электрического поля 3...4 кВ/см, частоте вращения диска 0,17...0,2 об/мин и удельной мощности СВЧ-генератора 1,2 Вт/г. Потребляемая мощность при этом составила 6,6 кВт, энергетические затраты – 0,132 кВт·ч/кг.

Ключевые слова: слизистые субпродукты, термообработка слизистых субпродуктов, обеззараживание, озонирование, удаление запаха, электромагнитное поле сверхвысокой частоты, коронный разряд

Для цитирования: Воронов Е.В., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Просвирякова М.В., Сторчевой В.Ф. Термообработка слизистых субпродуктов под воздействием электрофизических факторов: разработка установки // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 76-82. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-76-82>

ORIGINAL PAPER

Heat treatment of mucous by-products under the influence of electrophysical factors: development of the installation

E. V. Voronov¹, O. V. Mikhailova², G. V. Novikova³, M. V. Prosviryakova⁴, V. F. Storchevov⁵^{1,2,3} Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics; Knyaginino, Russia^{4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia¹ e_voronov@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9867-5860>² ds17823@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9231-4733>³ NovikovaGalinaV@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>⁴ prosviryakova.maryana@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3258-260x>⁵ energo-air@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

Abstract. Low efficiency of equipment for heat treatment, disinfection and removal of unpleasant odour of substandard mucous by-products urges the development of an installation that provides for the complex effect of ultra-high frequency

electromagnetic field, ozone and bactericidal flow of ultraviolet rays. The paper presents the technology and describes the installation developed by the authors. The installation ensures electromagnetic safety and uniformity of loading according to the penetration depth of the wave. The duration of raw material treatment is matched with the specific power of the microwave generator, the power of the lamps and with the rotation frequency of the compartment disc. The electric field strength has been studied in the CST Microwave Studio program. The developed installation contains a resonator in the form of a flattened spheroid with diameters of the main axes multiple of half the wavelength. Magnetrons are placed on the upper surface of the spheroid along the perimeter. On the inner surface of the spheroid, where there are corona needles, ring electro-gas-discharge lamps powered from pulsed modeled high-frequency generators are uniformly installed along the perimeter through the gap. The source of radiation in the bactericidal lamp is an electric discharge in a mixture of mercury vapour and argon. A fluoroplastic perforated disc is installed at the level of the large diameter of the spheroid, on which mucous by-products are treated. The conducted research shows that the intrinsic factor of quality of the spheroid resonator is 9000. The heat treatment and disinfection of raw materials is most effective at the plant productivity of 50 kg/h, electric field strength of 3 to 4 kV/cm, disc rotation frequency of 0.17 to 0.2 rpm and a specific power of the microwave generator of 1.2 W/g. Power consumption amounted to 6.6 kW, while energy costs were 0.132 kW·h/kg.

Keywords: mucous by-products, heat treatment of mucous by-products, ozonation, odor removal, corona discharge.

For citation: Voronov E.V., Mikhailova O.V., Novikova G.V., Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F. Heat treatment of mucous by-products under the influence of electrophysical factors: development of the installation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):76-82. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-76-82>

Введение. Термообработка вторичного мясного сырья осуществляется через непосредственный контакт его с острым паром или через стенку от глухого пара¹ [1]. С целью интенсификации теплообмена, ускорения внутреннего переноса теплоты за счёт теплопроводности применяют оборудование, совмещающее термообработку и измельчение сырья. В условиях фермерских хозяйств использование высокопроизводительного оборудования (1...2 т/ч) является нерентабельным.

В Княгининском университете разработаны установки непрерывно-поточного действия со сверхвысокочастотным (СВЧ) энергоподводом в резонаторы разного конструкционного исполнения² [2]: многоярусная установка с цилиндрическими резонаторами (патент № 2661372); установка с шнековым резонатором (патент № 2679203); установка с биконическим резонатором и диэлектрическим шнеком (патент № 2729151); установка с комбинированным резонатором (патент № 2729153).

СВЧ-установки предназначены для термообработки мясного сырья производительностью до 40 кг/ч при энергетических затратах 0,15...0,2 кВт·ч/кг [2], общим микробным числом не превышающим 1,5 млн КОЕ/г. Но у вторичного мясного сырья³, например, желудка жвачных животных, бактериальная обсемененность достигает 5...6 млн КОЕ/г [3].

¹ Ивашов В.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. Ч. 1. Оборудование для убоя и первичной обработки. М.: Колос, 2001. 552 с.

² Жданкин Г.В. Техника сверхвысокочастотного нагрева вторичного сырья агропредприятий для повышения кормовой ценности: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Мичуринск-наукоград РФ, 2021, 40 с.

³ Технология обработки субпродуктов. Интернет-источник. URL: zdamsam.ru/a446.html (дата обращения: 19.06.2023).

Известна СВЧ-установка с резонатором в виде сплюснутого эллипсоида вращения (патент № 2797259) [4]. С помощью данной установки возможна термообработка измельчённого субпродукта, но удалить неприятный запах невозможно, так как не предусмотрено комплексное воздействие основных физических факторов – озона и бактерицидного потока ультрафиолетовых лучей.

Низкая эффективность оборудования для термообработки, обеззараживания и удаления неприятного запаха некондиционного слизистого субпродукта обуславливает необходимость разработки установки, предусматривающей комплексное воздействие электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ), озона и бактерицидного потока ультрафиолетовых лучей.

Цель исследований: разработать наиболее эффективный способ и СВЧ-становку со сфероидным резонатором для термообработки измельчённого некондиционного слизистого субпродукта с обеззараживанием и удалением неприятного запаха в непрерывном режиме.

Материалы и методы. Методика разработки установки предусматривает обеспечение радиационной герметичности и равномерности загрузки в соответствии с глубиной проникновения волны. Продолжительность нахождения сырья согласована с удельной мощностью СВЧ-генератора, мощностью ламп и с частотой вращения диска с отсеками. Напряжённость электрического поля исследована в программе CST Microwave Studio.

Для обеспечения озонирования воздуха в резонаторе в виде сплюснутого сфероида предлагается установить близко к коронирующим иглам электрогазоразрядные лампы бактерицидного потока

ультрафиолетовых лучей, запитанных от источников килогерцовой частоты⁴ [5].

Результаты и их обсуждение. Разработанная авторами СВЧ-установка для термообработки некондиционных слизистых субпродуктов воздействием электрофизических факторов (ЭМП СВЧ, озон, бактерицидный поток ультрафиолетовых лучей) содержит в горизонтальной плоскости резонатор в виде сплюснутого сфероида (заявка № 2023115495) (рис. 1).

Главные оси сфероида кратны половине длины волны. На его верхней поверхности по периметру со сдвигом на 60 град. размещены волноводы с магнетронами 3 воздушного охлаждения. На внутренней поверхности сфероида 5 расположены коронирующие иглы, и по периметру равномерно со сдвигом на 45 град. установлены через зазор кольцевые

электрогазоразрядные лампы 4, запитанные от импульсно-моделирующих высокочастотных генераторов. На уровне большого диаметра сплюснутого сфероида 2 установлен перфорированный фторопластовый электроприводной диск 7 с радиальными направляющими 6, высота которых составляет не более одной глубины проникновения волны в сырье. Над радиальным направляющим 6 (где на поверхности сфероида имеется выгрузное окно 9, на которое подвешена неферромагнитная мелкаячеистая сетка) жёстко установлен фторопластовый ограничитель 10. На верхней части сфероида 2 предусмотрена неферромагнитная загрузочная ёмкость 1 с заслонкой, на нижнем основании имеется сливной патрубок с шаровым краном, который выполняет функцию запредельного волновода 8. Источником излучения в бактерицидной лампе служит

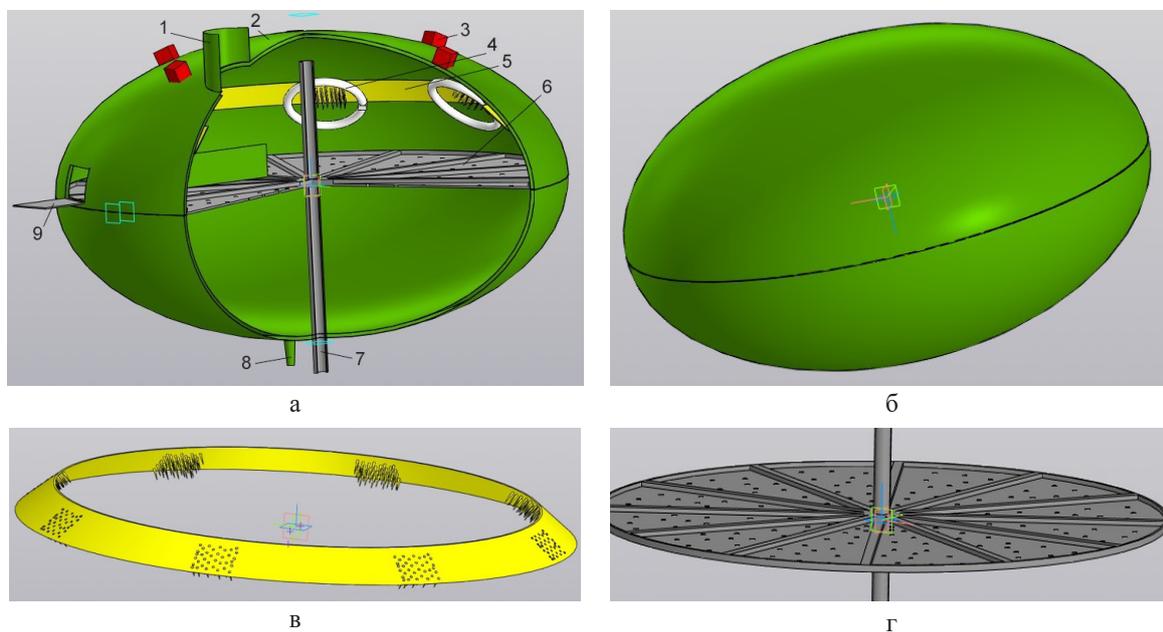


Рис. 1. СВЧ-установка для термообработки некондиционных слизистых субпродуктов воздействием электрофизических факторов:

- а – общий вид; б – резонатор; в – поверхность с коронирующими иглами; г – диск с отсеками;
- 1 – неферромагнитная загрузочная ёмкость с заслонкой; 2 – резонатор в виде сплюснутого сфероида;
- 3 – волноводы с магнетронами; 4 – кольцевые электрогазоразрядные лампы бактерицидного потока ультрафиолетовых лучей; 5 – поверхность с коронирующими иглами;
- 6 – перфорированный фторопластовый электроприводной диск с радиальными направляющими;
- 7 – фторопластовый вал для электропривода фторопластового диска;
- 8 – запредельный волновод с шаровым краном; 9 – окно для выгрузки продукта с экранирующей мелкаячеистой сеткой;
- 10 – фторопластовый ограничитель передвижения сырья

Fig. 1. Microwave installation for heat treatment of substandard mucous by-products by the influence of electrophysical factors:

- a – general view; b – resonator; c – surface with corona needles; d – disk with compartments;
- 1 – non-ferromagnetic loading container with a flap; 2 – resonator in the form of a flattened spheroid;
- 3 – waveguides with magnetrons; 4 – ring electro-gas discharge lamps of bactericidal flow of ultraviolet rays;
- 5 – surface with corona needles; 6 – perforated fluoroplastic electric drive disk with radial guides;
- 7 – fluoroplastic shaft for the electric drive of the fluoroplastic disk; 8 – out-of-the-way shaft with a ball valve;
- 9 – a window for unloading the product with a screening fine mesh; 10 – fluoroplastic limiter for the movement of raw materials

⁴ Импульсно моделированный высокочастотный генератор Искра-1: сайт ООО «Кэлли». URL: <https://kelly.ru/iskra1.htm> (дата обращения: 09.06.2023).

электрический разряд в смеси паров ртути и аргона. Большая часть разряда с длиной волны 254 нм имеет область наибольшего бактерицидного потока.

Технологический процесс термообработки некондиционных слизистых субпродуктов в непрерывном режиме. При закрытой заслонке загрузить измельчённые слизистые субпродукты в загрузочную ёмкость 1. Включить электропривод перфорированного фторопластового диска б с секторными отсеками. Включить импульсно-модулирующие высокочастотные генераторы (расположенные на наружной поверхности сфероида) для запитывания кольцевых электрогазоразрядных ламп 4. За счет коронного разряда между бактерицидными лампами и коронирующими иглами 5 выделяется озон, и происходит образование бактерицидного потока ультрафиолетовых лучей. После распространения озона в резонаторе 2 открыть заслонку в загрузочной ёмкости. Включить все сверхвысокочастотные генераторы 3. В резонаторе возбуждается электромагнитное поле сверхвысокой частоты (частота – 2450 МГц, длина волны – 12,24 см)⁵ [6]. При этом в сплюснутом сфероиде образуется стоячая волна высокой напряжённости электрического поля (2...4 кВ/см), достаточная для снижения бактериальной обсемененности вторичного сырья до предельно допустимого уровня (ПДУ) 500 тыс. КОЕ/г. [7, 8]. Как только сырьё окажется на перфорированном фторопластовом электроприводном диске б, оно обеззараживается озоном и бактерицидным потоком ультрафиолетовых лучей и варится за счёт токов поляризации при воздействии электромагнитного поля. Жидкая фаза просачивается через перфорацию фторопластового диска б и удаляется через сливной патрубок, служащий одновременно запредельным волноводом δ (имеет диаметр не более 1/4 длины волны). Секторные отсеки на фторопластовом диске б выполнены высотой не более 6...7 см, соответствующей глубине проникновения волны в сырьё, поэтому измельчённое сырьё равномерно подвергается термообработке, озонированию и воздействию бактерицидного потока ультрафиолетовых лучей. Продолжительность обработки измельчённого вторичного сырья согласована с частотой вращения фторопластового перфорированного диска б. После полного оборота диска готовый белковый корм упирается во фторопластовый ограничитель 10 (отсекатель) и выгружается из резонатора 2 через выгрузное окно 9. На выгрузное окно подвешена неферромагнитная мелкоячеистая сетка, позволяющая ограничить мощность потока электромагнитных излучений. По окончании технологического процесса обработки сырья следует обесточить оборудование и произвести санитарную обработку.

⁵ Стрекалов А.В., Стрекалов Ю.А. Электромагнитные поля и волны: учебное пособие. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2014. 375 с.

Визуализация распределения электромагнитного поля в объёмном резонаторе получена с помощью программы⁶ CST Microwave Studio 2018 [9, 10] (рис. 2). Результаты исследования показывают, что напряжённость электрического поля является достаточно высокой (2...4 кВ/см). Собственная добротность сфероида резонатора составляет 90000.

Эффект от нагрева сырья в электромагнитном поле сверхвысокой частоты зависит от напряжённости электрического поля (E , В/см) и его диэлектрических характеристик – таких, как фактор диэлектрических потерь (k), диэлектрическая проницаемость (ϵ), тангенс угла диэлектрических потерь ($tg \delta$) и глубина проникновения волны (Δ , см).

По данным И.А. Рогова, диэлектрические характеристики субпродуктов в значительной степени зависят от жирности⁷ (рис. 4).

Диэлектрические характеристики описываются эмпирическими выражениями:

$$\begin{aligned}\epsilon &= 52,785 \cdot e^{-0,022 \cdot Ж}; \\ k &= 19,644 \cdot e^{-0,025 \cdot Ж},\end{aligned}\quad (1)$$

где Ж – жирность сырья, %.

Мощность диэлектрических потерь ($P_{уд}$, Вт/см³) определяется по формулам⁸:

$$P_{уд} = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot k \cdot E^2. \quad (2)$$

$$P_{уд} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \cdot \rho \cdot C \frac{1}{\eta}, \quad (3)$$

где f – частота ЭМП ($f = 2450$ МГц); ρ – плотность сырья ($\rho = 800$ кг/м³); C – теплоёмкость слизистых субпродуктов ($C = 1,3...2,6$ Дж/кг·°С); ΔT – приращение температуры нагрева сырья, °С; $\Delta \tau$ – продолжительность воздействия ЭМП СВЧ, мин; η – термический коэффициент полезного действия (КПД).

Из формул 2 и 3 следует, что скорость нагрева сырья (°С/с) можно определить из выражения:

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{P_{уд} \cdot \eta \cdot 10^{-3}}{\rho \cdot C} = \frac{0,555 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot k \cdot E^2 \cdot \eta \cdot 10^{-3}}{800 \cdot 1,3}. \quad (4)$$

Продолжительность воздействия ЭМП СВЧ составляет:

$$\begin{aligned}\Delta \tau &= \frac{90 \cdot 800 \cdot 1,3}{0,555 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 16,6 \cdot 4000^2 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}} = (5) \\ &= 346 \text{ с} = 5,8 \text{ мин.}\end{aligned}$$

⁶ Курушин А.А., Пластикова А.Н. Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio: учебное пособие. М.: МЭИ, 2012. 152 с.

⁷ Рогов И.А. и др. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов: справочник. М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.

⁸ Расчёт и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.

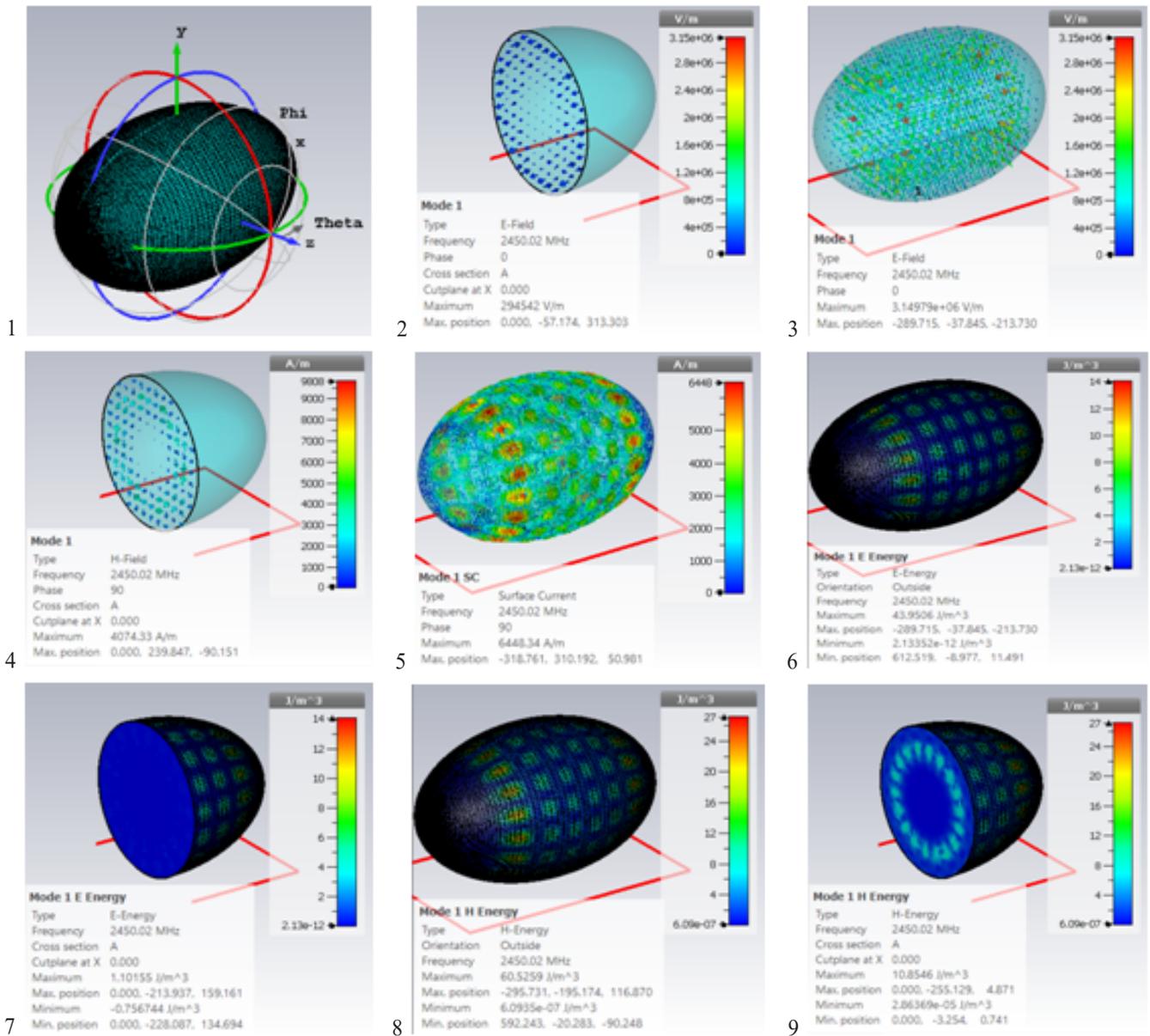


Рис. 2. Электродинамические параметры системы со сфероидным резонатором (мода 1):

- 1 – распределение ЭМП по координатам x, y, z; 2 – напряжённость электрического поля, В/м;
- 3 – напряжённость магнитного поля, А/м; 4 – напряжённость магнитного поля с изображением гребенчатой поверхности резонатора, А/м; 5 – поверхностный ток А/м; 6 – E-энергия электрической составляющей, Вт/м³;
- 6 – E-энергия (электрической составляющей) в разрезе, Вт/м³; 7 – H-энергия, Вт/м³; 8 – H-энергия в разрезе, Вт/м³

Fig. 2. Electrodynamic parameters of a spheroid resonator with an annular conic space (mode 1):

- 1 – EMF distribution along the x, y, z coordinates x, y, z; 2 – electric field strength, V/m; 3 – magnetic field strength, A/m;
- 4 – magnetic field strength with an image of the comb surface of the resonator, A/m; 5 – surface current A/m;
- 6 – E-energy electrical component, W/m³; 6 – energy (electrical component), cross-section, W/m³;
- 7 – energy, W/m³; 8 – energy, cross-section, W/m³

Расчёты показывают, что при напряжённости электрического поля 4 кВ/см и продолжительности воздействия 5,8 мин на сырье жирностью 10% приращение температуры нагрева сырья (ΔT) составит 90°C.

Эффективные режимы термообработки и обеззараживания сырья: производительность установки – 50 кг/ч; потребляемая мощность – 6,6 кВт; энергетические затраты – 0,132 кВт·ч/кг; напряжённость электрического поля – 3...4 кВ/см; частота вращения

диска – 0,17...0,2 об/мин; удельная мощность СВЧ генератора – 1,2 Вт/г.

Данные по напряжённости электрического поля получены расчётным путём на основе моделирования в программе CST Microwave Studio 2018 (рис. 3). Значения производительности, потребляемой мощности, энергетических затрат, частоты вращения диска, удельной мощности получены расчётным путём по формулам (1-5).

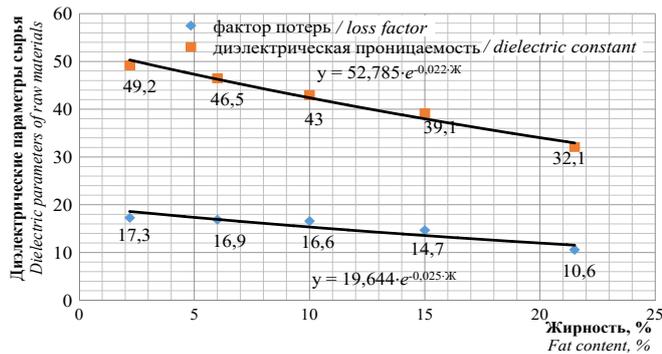


Рис. 3. Диэлектрические характеристики сырья в зависимости от жирности⁹ при температуре 20°C

Fig. 3. Dielectric characteristics of raw materials depending on fat content⁹, at a temperature of 20°C

Выводы

1. Разработанная установка сфероидно-резонатора с коронирующими иглами

⁹ Технология обработки субпродуктов. Интернет-источник. URL: zdamsam.ru/a446.html (дата обращения: 19.06.2023).

Список литературы

- Поручиков Д.В., Просвирякова М.В., Ларионов Г.А., Ершова И.Г. Технология совмещения процессов посола и термообработки субпродуктов в сверхвысокочастотной установке // *Аграрная наука*. 2022. № 364 (11). С. 103-109. DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-103-109
- Поручиков Д.В., Ершова И.Г. Обоснование оптимальных режимов термообработки мясного сырья в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. № 4 (33). С. 50-54. EDN: УТНРСХ.
- СВЧ-маслоплавитель непрерывно-поточного действия с эллипсоидным резонатором: Патент № 2797259 РФ, МПК А47j29/06 / Г.В. Новикова, А.А. Тихонов, О.А. Басонов, Е.И. Меженина, С.И. Шопырева, М.В. Просвирякова, О.В. Михайлова. Заяв. № 2022124278 от 01.06.2023, Бюл. № 16. EDN: DWAYAW.
- Шевелев А.В. Определение эффективных режимов работы СВЧ-воскотопки // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия». М.: ЭйПиСи-Пабблишинг, 2020. С. 725-728. EDN: LVJUUF.
- Шевелев А.В. Обоснование рационального режима работы СВЧ-воскотопки // *Вестник НИИЭИ*. 2023. № 3 (142). С. 17-25. EDN: GETRDI.
- Белова М.В., Жданкин Г.В., Новикова Г.В. Разработка сверхвысокочастотной установки контейнерного типа для термообработки крови и жиросодержащего сырья // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2016. Т. 11, № 4. С. 74-78. https://doi.org/10.12737/article_592fc7d6407e48.58575824
- Ершова И.Г., Поручиков Д.В. Сверхвысокочастотная установка для термообработки мясного сырья // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Продовольственная безопасность и устойчивое развитие АПК». 2015. С. 600-604. EDN: BVVHDZ.
- Zhdankin G.V., Storchevoy V.F., Novikova G.V., Umansky P.M. Survey on UHF Device Operating Modes for Thermal Treatment and Disinfection of Nonfood Animal-Origin Raw Materials. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46:94-99. <https://doi.org/10.3103/S1068367420010206>

и электрогазоразрядными лампами, запитанными от импульсно-моделирующих высокочастотных генераторов, обеспечивает комплексное воздействие электрофизических факторов (ЭМП СВЧ, озона, бактерицидного потока УФ-лучей) и обеспечивает термообработку, обеззараживание и удаление неприятного запаха слизистых субпродуктов при низких энергетических затратах (0,132 кВт·ч/кг).

2. Эффективными являются следующие режимы термообработки и обеззараживания сырья: производительность установки – 50 кг/ч; потребляемая мощность – 6,6 кВт (мощность магнетронов – 6 кВт, мощность вентиляторов для охлаждения магнетронов – 0,1 кВт, мощность ламп – 0,25 кВт, мощность привода диска – 0,25 кВт); напряжённость электрического поля – 4 кВ/см; частота вращения диска – 0,17...0,2 об/мин; удельная мощность СВЧ-генератора – 1,2 Вт/г.

References

- Poruchikov D.V., Prosviryakova M.V., Lari-onov G.A., Ershova I.G. Technology of combining salting and heat treatment of by-products in an ultra-high-frequency installation. *Agrarian Science*. 2022;364:103-109. DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-103-109. (In Rus.)
- Poruchikov D.V., Ershova I.G. Justification of optimal modes of heat treatment of raw meat products in an ultrahigh frequency electromagnetic field. *Vestnik VIESKh*. 2018;4:50-54. (In Rus.)
- Novikova G.V., Tikhonov A.A., Basonov O.A., Mezhenina E.I., Shopyreva S.I., Prosviryakova M.V., Mikhailova O.V. Continuous-flow microwave oil-melting device with an ellipsoid resonator: Patent No. 2797259 of the Russian Federation, IPC A47j29/06. Application. No. 2022124278, 01.06.2023. (In Rus.)
- Shevelev A.V. Determination of effective operation modes of a microwave wax furnace. In: *Safety and Quality of Agricultural Raw Materials and Food. Collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2020:725-728. (In Rus.)
- Shevelev A.V. Justification of the rational operation mode of a microwave oven. *Vestnik NGIEI*. 2023;3:17-25. (In Rus.)
- Belova M.V., Zhdankin G.V., Novikova G.V. Development of an ultra-high-frequency container-type installation for heat treatment of blood and fat-containing raw materials. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2016;11(4):74-78. (In Rus.) https://doi.org/10.12737/article_592fc7d6407e48.58575824
- Ershova I.G., Poruchikov D.V. Ultra-high-frequency installation for heat treatment of meat raw materials. In: *Food security and sustainable development of agriculture. materials of the International Scientific and Practical Conference*. 2015:600-604. (In Rus.)
- Zhdankin G.V., Storchevoy V.F., Novikova G.V., Umanskiy P.M. Survey on UHF Device Operating Modes for Thermal Treatment and Disinfection of Nonfood Animal-Origin Raw Materials. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46:94-99. <https://doi.org/10.3103/S1068367420010206>
- Zakharov V.V., Trigorliy S.V. Numerical and experimental studies of the processes of microwave heat treatment of dielectrics in traveling wave microwave chambers. *Voprosy Elektrotehnologii*. 2020;1(26):14-22. (In Rus.)

9. Захаров В.В., Тригорлый С.В. Численные и экспериментальные исследования процессов СВЧ-термообработки диэлектриков в СВЧ-камерах бегущей волны // Вопросы электро-технологии. 2020. № 1 (26). С. 14-22. EDN: VKMMXS.

10. Рябченко В.Ю., Паслён В.В. Компьютерное моделирование объектов с помощью ПП CST Microwave Studio // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2018. № 1. С. 139. EDN: QIKITH.

Информация об авторах

Евгений Викторович Воронов¹, канд. экон. наук, доцент, директор инженерного института;
https://orcid.org/0000-0002-9867-5860; e_voronov@list.ru

Ольга Валентиновна Михайлова², д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные технологии и системы связи»; https://orcid.org/0000-0001-9231-4733; ds17823@yandex.ru

Галина Владимировна Новикова³, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник;
https://orcid.org/0000-0001-9222-6450; NovikovaGalinaV@yandex.ru

Марьяна Валентиновна Просвирякова⁴, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф. Бородин»;
https://orcid.org/0000-0003-3258-260x; prosviryakova.maryana@yandex.ru

Владимир Федорович Сторчевой⁵, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф. Бородин»;
https://orcid.org/0000-0002-6929-3919; energo-air@rgau-msha.ru

^{1,2,3} Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; 606340, Россия, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22 а

^{4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Е.В. Воронов – анализ способов переработки слизистых суб-продуктов, создание окончательной версии рукописи

О.В. Михайлова – построение 3D-модели, исследование электродинамических параметров системы «Генератор-резонатор» с визуализацией распределения электромагнитного поля

Г.В. Новикова – работа над составлением концепции повышения эффективности установки с источниками электрофизических параметров, редактирование рукописи

М.В. Просвирякова – описание принципа действия установки, расчёт технологических параметров

В.Ф. Сторчевой – анализ диэлектрических параметров сырья и расчёт мощности диэлектрических потерь.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 07.07.2023, после рецензирования и доработки 11.09.2023; принята к публикации 11.09.2023

10. Ryabchenko V.Yu., Paslyon V.V. Computer simulation of objects with CST Microwave Studio. *Modern Issues in Radio Electronics and Telecommunications*. 2018;1:139. (In Rus.)

Information about the authors

Evgeny V. Voronov¹, DSc (Econ), Associate Professor, Director of the Engineering Institute;
https://orcid.org/0000-0002-9867-5860; e_voronov@list.ru

Olga V. Mikhailova², DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Communication Systems;
https://orcid.org/0000-0001-9231-4733; ds17823@yandex.ru

Galina V. Novikova³, DSc (Eng), Professor, Chief Researcher;
https://orcid.org/0000-0001-9222-6450; NovikovaGalinaV@yandex.ru

Mariana V. Prosviryakova⁴, DSc (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin;
https://orcid.org/0000-0003-3258-260x; prosviryakova.maryana@yandex.ru

Vladimir F. Storchevov⁵, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin;
https://orcid.org/0000-0002-6929-3919; energo-air@rgau-msha.ru

^{1,2,3} Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics; Knyaginino, Russia

^{4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Author contribution

E. V. Voronov – analysing the methods of processing mucous by-products, final editing of the draft

O. V. Mikhailova – construction of 3D model, study of electrodynamic parameters of the system “generator-resonator” with visualisation of electromagnetic field distribution

G. V. Novikova – conceptualization of the technology of increasing the efficiency of the installation with sources of electrophysical parameters, editing of the draft

M. V. Prosviryakova – description of the operating principle of the installation, calculation of technological parameters

B. F. Storchevov – analyses of dielectric parameters of raw materials and calculation of dielectric loss power

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 07.07.2023; revised 11.09.2023; accepted 11.09.2023

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.147

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-83-87>



Проектное обучение и кейс-технологии: подготовка специалиста-агроинженера на курсе химии

М.В. Григорьева^{1✉}, *Н.Л. Багнавец*²

^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ marina_gry@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8140-3538>

² nbagnavec@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5272-5236>

Аннотация. Требования к уровню теоретических и практических знаний и умений специалистов-аграриев с каждым годом повышаются. Химические дисциплины являются основой естественнонаучного образования будущих специалистов агропромышленного комплекса. Для повышения эффективности обучения студентами агроинженерных специальностей химических дисциплин предложено применить методы проектного обучения и кейс-технологии. Проанализированы образовательные возможности проектного обучения и кейс-технологии в контексте методологических психолого-педагогических концепций – структуры деятельности и логики развития личности. Установлено, что данные методы, применяемые в ходе преподавания химических дисциплин, позволяют задействовать все компоненты структуры деятельности: познавательный, ценностно-ориентированный, коммуникативный, преобразовательный, физический и эстетический. Показаны способы применения проектного обучения и кейс-технологий при изучении химических дисциплин студентами, обучающимися по специальности «Агроинженерия». Приведён пример кейса по определению качества питьевой воды методами титриметрического и потенциометрического анализа и подбора бытового фильтра для очистки питьевой воды. Детально рассмотрена методика выполнения работ. Определены критерии оценки результатов работы обучающихся. Проектное обучение и кейс-технологии должны соответствовать ряду требований, иметь систему критериев оценки, определённые цели и практико-ориентированную задачу, что позволит обучающимся сформировать способность и готовность к решению практических задач в их будущей профессиональной деятельности.

Ключевые слова: кейс-технологии, проектное обучение, преподавание химических дисциплин, командная работа обучающихся, подготовка специалиста-агроинженера

Для цитирования: Григорьева М.В., Багнавец Н.Л. Проектное обучение и кейс-технологии: подготовка специалиста-агроинженера на курсе химии // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 83-87. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-83-87>

ORIGINAL PAPER

Use of project-based learning and case technology in the course of Chemistry for training agricultural engineers

M.V. Grigoryeva^{1✉}, *N.L. Bagnavets*²

^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ marina_gry@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8140-3538>

² nbagnavec@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5272-5236>

Abstract. The requirements for the level of theoretical and practical knowledge and skills of agricultural specialists are increasing every year. Chemical subjects form the basis of natural science education of future agricultural specialists. To improve the effectiveness of the educational process, the practice of teaching introduces many different teaching methods. The authors analyzed didactic opportunities of project-based learning and case technology

in the context of methodological psychological and pedagogical concepts, in particular, the structure of activity and the logic of personality development. It is established that these methods used in the teaching of chemistry activate all the components of the structure of learning activity: cognitive, value-oriented, communicative, transformative, physical, and aesthetic. The article outlines the ways of using project-based learning and case technologies in the study of chemical subjects by agricultural engineering students. Given as an example is a case study on determining the quality of drinking water by titrimetric and potentiometric analysis methods and selection of a household filter for drinking water purification. The authors dwell on the methodology of performing tasks and define the criteria for evaluating the learning outcomes. Project-based learning and case technologies should meet a number of requirements, have a system of evaluation criteria, certain goals and practice-oriented task, which will enable and motivate students to solve practical problems in their future professional activities.

Keywords: case technologies, project training, teaching of chemical subjects, teamwork of students, training agricultural engineers

For citation: Grigoryeva M.V., Bagnavets N.L. Use of project-based learning and case technology in the course of Chemistry for training agricultural engineers. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):83-87. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-83-87>

Введение. Химические дисциплины являются основой естественнонаучного образования будущих агроинженеров, специалистов агропромышленного комплекса [1]. Подготовка высококвалифицированного инженера на курсах химии подразумевает изучение вопросов, связанных с химическими процессами, топливом, энергетикой и свойствами различных материалов, а также знакомство с основами химического анализа [2].

В соответствии с рабочей программой дисциплины «Химия» ее целью является освоение студентами теоретических и практических знаний в области химии; приобретение умений и навыков в области химических и физико-химических методов исследования объектов агросферы с целью осознанного решения комплексных задач в их будущей профессиональной деятельности.

Для эффективного формирования необходимых в данной предметной области компетенций система химической подготовки должна обладать комплексностью и функциональной полнотой. В соответствии с теорией В.С. Леднева¹ содержание образования должно учитывать предметную структуру научного знания, структуру личности, структуру деятельности и логику формирования личности.

Логика формирования личности осуществляется в образовательной деятельности, включающей в себя теоретическую подготовку (формирование знаний), практическую подготовку (формирование умений и навыков) и опыт творческой, проектной и исследовательской деятельности.

Чтобы система химической подготовки была эффективной, в ней должны быть учтены вышеназванные детерминанты [3].

¹ Леднев В.С. Содержание образования: сущность, структура, перспективы. М.: Высшая школа, 1991. 224 с.

Цель исследований: теоретическое обоснование и определение направлений применения методов проектной деятельности и кейс-технологий в процессе химической подготовки будущих инженеров АПК.

Материалы и методы. Рассмотрены деятельностный аспект образовательного процесса, определяемый применяемыми методами обучения, и образовательные возможности методов кейс-технологии и проектного обучения.

Результаты и их обсуждение. Кейс-технологии и проектное обучение относят к активным, проблемным, эвристическим методам, имеющим некоторые различия. Проект направлен на создание определённого уникального результата, в том числе исследовательского характера. Кейс-задание представляет собой проблемную ситуацию, базирующуюся на реальных фактах и требующую быстрого решения. Кейсы отличаются от проектов большей структурированностью, повторяемостью и непредсказуемостью.

Данные методы обучения позволяют проявить следующие инвариантные компоненты структуры деятельности.

1. Познавательный аспект. В ходе выполнения проекта или кейса происходит закрепление, углубление имеющихся знаний по предмету, а также приращение новых.

2. Ценностно-ориентированный аспект. Реальные сведения и проблемы, лежащие в основе проектного задания или кейса, стимулируют мотивацию к образовательной деятельности.

3. Коммуникационный аспект. В кейс-технологии реализуется командная работа обучающихся, где в ходе выполнения задания и представления результатов работы данный аспект проявляется очень выраженно. В методе проектов не всегда применяется командное выполнение, но коммуникация осуществляется в ходе выполнения проекта и в процессе его защиты.

4. Преобразовательный аспект. В ходе выполнения задания данные методы позволяют обучающимся получить уникальный для себя результат.

5. Физический аспект. Проводя химический эксперимент, обучающиеся выполняют большое число разнообразных манипуляций с химическим оборудованием, работа с которым требует развития определённых практических навыков.

6. Эстетический аспект. Эксперимент завершается представлением результатов в виде эстетично оформленной продуманной презентации.

Кейс-метод предполагает в течение семестра или более короткого срока поэтапное решение практической задачи при использовании командной работы обучающихся с привлечением современных цифровых технологий. В частности, учащиеся первого курса в рамках одного из разделов дисциплины «Химия» решают кейс по определению качества питьевой воды методами титриметрического и потенциометрического анализа и подбирают бытовой фильтр для очистки питьевой воды, исходя из соотношения «Цена фильтра-качество очистки».

Решение кейса преследует следующие учебно-методические цели:

– формирование у обучающихся навыков исследовательской работы для выполнения конкретной практической задачи с использованием оборудования химической лаборатории и с привлечением современных цифровых технологий;

– развитие у обучающихся химического мышления, а также формирование умений и навыков химического эксперимента;

– формирование ответственного отношения к проблемам антропогенного воздействия на окружающую среду.

При выполнении кейса решались следующие задачи:

– максимально вовлечь каждого обучающегося в самостоятельную работу по решению поставленной практической задачи;

– проявить и развить аналитические, экспериментальные и оценочные навыки обучающихся, научиться эффективно работать в команде и находить оптимальное решение поставленной задачи;

– получить навыки структурирования информации и самостоятельного проведения исследовательской работы.

В алгоритме работы с кейсом можно выделить следующие этапы:

1. Постановка задачи, подразделение на мини-группы по 5-6 чел., распределение обязанностей и определение сроков поэтапного выполнения работ.

2. Изучение литературы по теме и выбор методов исследования проб питьевой воды (7-10 дней) с использованием электронно-библиотечной системы университета², ЭБС Издательств «Лань»³ и «Юрайт»⁴, методических пособий⁵. На этом этапе учащиеся с помощью облачного сервиса Google-Формы составляют опрос для выяснения общественного мнения по проблеме качества питьевой воды, например: «Используете ли вы бытовые фильтры для очистки водопроводной воды?».

3. Подготовка к лабораторным исследованиям: отбор проб воды из водопровода и природных источников; приготовление стандартных растворов для определения карбонатной и общей жёсткости воды путём титрования (7-10 дней).

4. Анализ питьевой воды по предварительно определённым параметрам и методикам (7-10 дней). Сравнение полученных показателей (рН, общей и карбонатной жёсткости) исследованных проб воды с показателями СанПин 2.1.4.1074-01 для питьевой воды⁶. Анализ полученных результатов, заключение о качестве питьевой воды из каждого источника и об экологическом состоянии региона, в котором были взяты пробы на анализ (3-4 дня).

5. Проведение фильтрования проб воды через два выбранных бытовых фильтра воды разных торговых марок. Анализ фильтрованной воды по тем же методикам, применимым к нефилтрованной воде (10-15 дней).

6. Представление результатов в виде презентации, выполненной с помощью программ Ahaslides, PowerPoint, Visme (8-10 дней).

Работа по решению кейса выполняется в малых группах под руководством преподавателя, координирующего и направляющего прохождение всех этапов как в очной форме, так и с использованием электронных средств коммуникации.

² Электронно-библиотечная система РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. URL: <http://www.library.timacad.ru/> (дата обращения: 20.08.2023).

³ Электронно-библиотечная система Лань. URL: <https://e.lanbook.com/> (дата обращения: 20.08.2023).

⁴ Электронно-библиотечная система Юрайт. URL: <https://urait.ru/> (дата обращения: 20.08.2023).

⁵ Бочкарев А.В. и др. Химия воды: Учебное пособие для вузов / Отв. ред. Н.Л. Багнавец. М.: Издательство Юрайт, 2022. 102 с. (Высшее образование) // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. URL: <https://urait.ru/bcode/507484>; Блишников В.Д., Багнавец Н.Л., Кауфман А.Л. Гидрохимия: Учебно-методическое пособие. М.: Электронная библиотека РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2018. 153 с.

⁶ СанПин 2.1.4.1074-01. Требования к качеству питьевой воды. URL: http://water2you.ru/n-docs/pdk_sanpin/ (дата обращения: 20.08.2023).

Выполнение предлагаемого кейса активизирует интерес учащихся к изучению дисциплины «Химия» в связи с решением конкретных практических задач, приводит к восприятию учебного процесса не как рутинного, а как динамичного и полезного для реализации будущих профессиональных проектов [4, 5].

В заключение работы над кейсом проводится итоговая защита перед группой обучающихся с привлечением экспертов из числа преподавателей для большей объективности оценки представленных работ. Эксперты задают вопросы, помогающие студентам понять возможные недочёты в проведении эксперимента и в его оформлении.

В процессе защиты кейсов может возникнуть конструктивная дискуссия по теме выполняемого кейса, что вырабатывает у обучающихся навыки формулирования выводов, защиты своей концепции решения поставленной задачи и т.п. Лучшие доклады могут быть рекомендованы для участия в ежегодной

студенческой конференции или для выступления в «Точке кипения» на интернет-платформе Leader ID.

После представления результатов работ в форме докладов преподаватель оценивает участие и вклад каждого члена мини-группы по решению кейса на основе нескольких критериев (табл.).

Основное требование к оценке проекта или кейса – комплексный подход с учётом различных аспектов выполненной работы.

Отметим, что решение данного кейса – первая исследовательская работа в рамках обучения в университете. Полученные в результате проведённой работы навыки в дальнейшем помогут обучающимся при выполнении и написании проектных и курсовых работ на старших курсах. Данная методика направлена на формирование у обучающихся исследовательских навыков и компетенций, подготовку выпускников, способных решать конкретные задачи в профессиональной деятельности [5].

Таблица

Критерии оценки работы учащихся

Table

Criteria for evaluating students' performance

Критерий <i>Criteria</i>	Максимальный балл <i>Maximum score</i>
Глубина проработки теоретического материала по теме <i>Depth of elaboration of theoretical material on the topic</i>	2
Качество выполнения практической работы в химической лаборатории (аккуратность, точность и т.п.) <i>Quality of practical work in the chemical laboratory (neatness, accuracy, etc.)</i>	5
Умение работать в команде / <i>Ability to work in a team</i>	2
Активность при решении поставленной задачи / <i>Activity in solving the task</i>	2
Степень сформированности навыков работы с цифровыми инструментами <i>Development of skills related to the use of digital tools</i>	2
Выполнение этапов работы в точно оговоренное время / <i>Completion of work steps within the agreed time</i>	2
Итого / <i>Total</i>	15

Выводы

1. Проектное обучение и кейс-технологии, применяемые в ходе образовательного процесса по химии, позволяют задействовать все компоненты структуры деятельности: познавательный, ценностно-ориентированный, коммуникативный, преобразовательный, физический и эстетический.

2. Проектное обучение и кейс-технологии должны соответствовать ряду требований, иметь систему критериев оценки, определённые цели и практико-ориентированную задачу, для решения которой студентам необходимо применить несколько методов. В результате у обучающихся формируются способность и готовность к решению практических задач в их будущей профессиональной деятельности.

Список литературы

1. Григорьева М.В., Багнавец Н.Л., Белопухов С.Л. Учебно-исследовательская работа студентов как компонент системы преемственности между бакалавриатом и магистратурой // История и педагогика естествознания. 2021. № 1-2. С. 5-10. EDN: IZNFZU.
2. Boyd M. Goodson, Qingfeng Ge, Lichang Wang. Development and Implementation of a Two-Level Inquiry- and Project-Based Modular Approach to Teaching a Second-Semester Physical Chemistry Laboratory Course. *Journal of Chemical Education*. 2023;100(5):1885-1894. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01225>
3. Григорьева М.В. Химическая подготовка современного агрария: изучение мнения работающих специалистов // Международный научный журнал. 2021. № 4. С. 68-76. EDN: YQQWVW.
4. Пучкина О.Н., Исхакова Д.Д., Черкина М.В. Проектное обучение в химической подготовке студентов младших курсов технологического университета // Казанский педагогический журнал. 2008. № 7. С. 66-72. EDN: KUGJEP.
5. Рыбакова Г.В., Шилова Т.В. Проектная деятельность студентов в вузе при обучении химии // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. 2018. № 2 (98). С. 275-282. EDN: UTXIKY.

Информация об авторах

Марина Викторовна Григорьева¹, канд. пед. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0001-8140-3538>,
ResearcherID: AAE-7222-2022; marina_gry@inbox.ru

Наталья Леонидовна Багнавец², канд. техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-5272-5236>,
ResearcherID: ABM-1019-2022; nbagnavec@yandex.ru

^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 29.08.2023, после рецензирования и доработки 15.09.2023; принята к публикации 22.09.2023

References

1. Grigoryeva M.V., Bagnavets N.L., Belopukhov S.L. Educational and research work of students as a component of the continuity system between bachelor and master students. *History and Pedagogy Natural Science*. 2021;1-2:5-10. (In Rus.)
2. Boyd M. Goodson, Qingfeng Ge, Lichang Wang. Development and Implementation of a Two-Level Inquiry- and Project-Based Modular Approach to Teaching a Second-Semester Physical Chemistry Laboratory Course. *Journal of Chemical Education*. 2023;100(5):1885-1894. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01225>
3. Grigoreva M.V. Chemical training of the modern agrarian specialist: a study of the opinions of working professionals. *International Scientific Journal*. 2021;4:68-76. (In Rus.)
4. Puchkina O.N., Iskhakova D.D., Cherkina M.V. Project work methods in chemistry training of junior students at a university of technology. *Kazan Pedagogical Journal*. 2008;7:66-72. (In Rus.)
5. Rybakova G.V., Shilova T.V. Project activity of university students taking a course of chemistry. *Vestnik Chuvashskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Universiteta im. I.Ya. Yakovleva*. 2018;2:275-282. (In Rus.)

Information about the authors

Marina V. Grigoryeva¹, CSc (Ed), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0001-8140-35-38>,
ResearcherID: AAE-7222-2022; marina_gry@inbox.ru

Natalya L. Bagnavets², CSc (Eng), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-5272-5236>,
ResearcherID: ABM-1019-2022; nbagnavec@yandex.ru

^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 29.08.2023; revised 15.09.2023; accepted 22.09.2023

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.146; 378.14.015.62

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-88-92>

Интеллектуальное воспитание в процессе подготовки агроинженеров

Л.В. Занфирова¹, Т.П. Коваленок², М.В. Шингарева³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ zanfirova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6151-2267>² kovalenok@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2835-1454>³ shingareva@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0713-5042>

Аннотация. Интеллектуальное воспитание студентов вуза – это деятельность, направленная на развитие личности и интеллектуальных качеств: компетентности, креативности, уникального склада ума, саморегуляции. Интеллектуальное воспитание является неотъемлемой частью процесса образования. Задачи интеллектуального воспитания определяются исходя из интеллекта студентов, уровня их соответствия требованиям профессиональной деятельности. Авторами проведено эмпирическое исследование особенностей ментального опыта студентов-агроинженеров с целью получения оценки развития операциональных характеристик мышления, определения связи параметров интеллекта и уровня саморегуляции, соотношения эмпирических данных с критериями интеллектуальной воспитанности. В исследовании приняли участие 97 студентов Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Результаты эмпирического исследования продемонстрировали прямую связь между уровнями развития мыслительных операций и компонентов волевой регуляции деятельности. Особенностью интеллектуального развития будущих агроинженеров является недостаточная сформированность ряда интеллектуальных умений, что препятствует становлению интеллектуальных качеств личности профессионала. Для обеспечения эффективной и успешной инженерной деятельности выпускников направления 35.03.06 «Агроинженерия» необходимы расширение кругозора обучающихся, обогащение общего ментального опыта и формирование комплекса профессиональных знаний, а также тренировка базовых мыслительных операций.

Ключевые слова: интеллектуальное воспитание, подготовка агроинженеров, направление «Агроинженерия», мышление, способности, интеллект, ментальный опыт студентов-агроинженеров

Для цитирования: Занфирова Л.В., Коваленок Т.П., Шингарева М.В. Интеллектуальное воспитание в процессе подготовки агроинженеров // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 88-92 <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-88-92>

ORIGINAL PAPER

Intellectual education in the process of training agricultural engineers

L.V. Zanfirova¹, T.P. Kovalenok², M.V. Shingareva³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ zanfirova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6151-2267>² kovalenok@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2835-1454>³ shingareva@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0713-5042>

Abstract. Intellectual education is an activity aimed at personal development, including such intellectual qualities as competence, creativity, a unique mindset, self-regulation, etc. Intellectual education is an integral part of the education process. The tasks of intellectual education are determined based on students' intelligence, the level of their compliance with the requirements of professional activity. The authors conducted an empirical study of the peculiarities of mental experience of agricultural engineering students to assess the development of operational characteristics of thinking, determine the relationship between the parameters of intelligence and the level of self-regulation, the correlation of empirical data with the criteria of intellectual education. The study involved 97 students of the Institute of Mechanics and Power Engineering named after V.P. Goryachkin of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. The results of the empirical study demonstrated a direct relationship between the levels of development of thinking operations and components of volitional

regulation of activity. The peculiarity of intellectual development of future agricultural engineers is insufficient formation of a number of intellectual skills, which hinders the formation of intellectual qualities of a professional. To ensure effective and successful engineering activity of graduates (training area 35.03.06 Agroengineering), it is necessary to expand students' outlook, enrich general mental experience and form a set of professional knowledge, as well as train basic thinking operations.

Keywords: intellectual education, basic intellectual qualities of personality, mental experience, self-regulation of activity.

For citation: Zanfirova L.V., Kovalenok T.P., Shingareva M.V. Intellectual education in the process of training agricultural engineers. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):88-92. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-88-92>

Введение. Термин «воспитание» в психолого-педагогической и методической литературе имеет множество разнообразных определений¹ [1-3].

Согласно Федеральному закону «Об образовании в Российской Федерации» воспитание является неотъемлемой частью процесса образования, составляя «единый целенаправленный процесс воспитания и обучения...»².

Результатом воспитательной работы должно быть формирование личностных качеств, соответствующих требованиям общества на определённом этапе его развития. В настоящее время одними из важных условий социокультурной адаптации и успешной самореализации человека в социальной системе являются развитое критическое мышление, креативность, способность к саморегуляции и самоконтролю, что делает необходимым целенаправленное воздействие образовательной системы для формирования этих качеств. Интеллектуальное воспитание можно рассматривать как аспект деятельности образовательного учреждения, направленной на формирование ответственного отношения к труду, его результатам, создание условий для самоопределения и социализации.

Профессиональная деятельность инженера специфична своей разнонаправленностью, разнозадачностью и зачастую осуществляется в режиме ограничения времени, в условиях помех и поиска недостающих данных. Проблема совершенствования инженерного образования становится всё более актуальной с появлением новых технологий [4, 5]. Процесс развития инженерного мышления и необходимых для эффективного осуществления профессиональной деятельности компетенций должен базироваться не только на аккумулировании получаемых знаний, но и на преобразовании их в субъективно и/или объективно новый ментальный опыт

посредством мыслительных операций. Интеллектуальное воспитание будущих инженеров должно учитывать специфику будущей профессиональной деятельности и особенности ментального опыта обучающихся. Важно выявлять типичные особенности интеллекта студентов, уровень их соответствия требованиям профессиональной деятельности, и исходя из этого – определять задачи интеллектуального воспитания.

Цель исследований: определить актуальные задачи воспитания интеллектуальных качеств личности агроинженера в процессе профессиональной подготовки.

Материалы и методы. Эмпирическое исследование особенностей ментального опыта студентов-агроинженеров направлено на получение оценки развития операциональных характеристик мышления, определение связи параметров интеллекта и уровня саморегуляции, соотношения эмпирических данных с критериями интеллектуальной воспитанности.

В исследованиях применен анализ нормативной документации, психологической и педагогической литературы по рассматриваемой проблеме, использовались психодиагностические методы («Школьный тест умственного развития», тест «Стиль саморегуляции поведения») и статистические методы обработки данных. Базой для проведения эмпирических исследований стал Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. В исследовании приняли участие 97 студентов.

«Школьный тест умственного развития» позволяет выявить: уровень основных компонентов ментального опыта: общую осведомлённость, эрудированность (способность понимать значение научных и культурных понятий, перечень которых определяется содержанием общего образования); сформированность операционального компонента мышления (умение выделять существенные связи между понятиями, сравнивать, классифицировать, обобщать, действовать по аналогии); математические способности (выявлять закономерности в числовых рядах); умение решать задачи с образным содержанием.

¹ Газман О.С. Неклассическое воспитание: От авторитарной педагогики к педагогике свободы. М.: МИРОС, 2002. 296 с.

² Об образовании в Российской Федерации: Федеральный закон от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ (последняя редакция). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (дата обращения: 20.08.2023).

Оценка результатов предполагала определение процента правильно решённых заданий. Использовалась шкала перевода в качественные оценки: менее 45% правильных ответов – низкоуспешные; 45...60% – средние по успешности; 61...80% – успешные; 81...100% – высокоуспешные.

Для оценки регулятивных способностей использовался тест-опросник, позволяющий оценить развитость процессов планирования, моделирования, контроля деятельности и индивидуально-типологических качеств, определяющих их характеристики. Использовалось онлайн-тестирование.

Результаты и их обсуждение. Диагностика ментального опыта студентов агроинженерных направлений подготовки показала, что в выборке преобладают «успешные» обучающиеся, правильно выполнившие 61...80% тестовых заданий (рис. 1).

В структуре ментального опыта студентов преобладает эрудированность (на уровне общего образования); на втором месте – математические способности; наименее сформирована способность манипулировать образами (рис. 2).

Для определения связи когнитивных и регулятивных функций был проведён корреляционный анализ показателей умственного развития и процессов саморегуляции будущих инженеров, использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена. В таблице представлены значимые корреляции, показавшие, что наиболее тесно с когнитивными способностями связан показатель способности к оценке результатов собственной деятельности, а на успешность осуществления всех регулятивных процессов влияет общий уровень осведомлённости.

Интеллектуальные особенности студентов агроинженерных направлений подготовки (Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина), выявленные в ходе эмпирических исследований, показали, что чем более развиты основные мыслительные

операции, тем успешнее студенты оценивают результаты своих действий [6].

Проблема организации воспитательной работы в высших учебных заведениях является дискуссионной³. Студент вуза – это относительно сложившаяся личность, обладающая присущим только ей набором индивидуальных качеств и способностей. Актуальным является формирование тех личностных качеств, которые станут основой профессиональной успешности. Интеллект является фундаментом развития

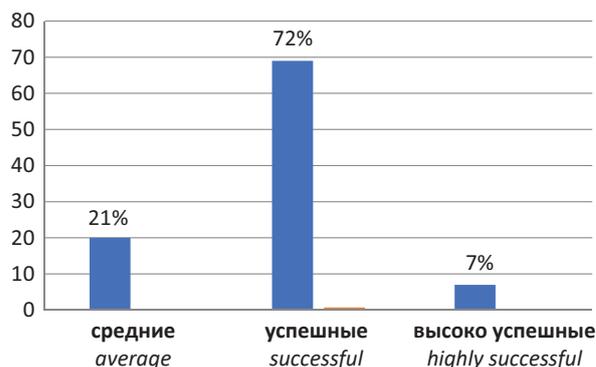


Рис. 1. Распределение студентов по успешности выполнения теста
Fig. 1. Distribution of students according to the success of the test

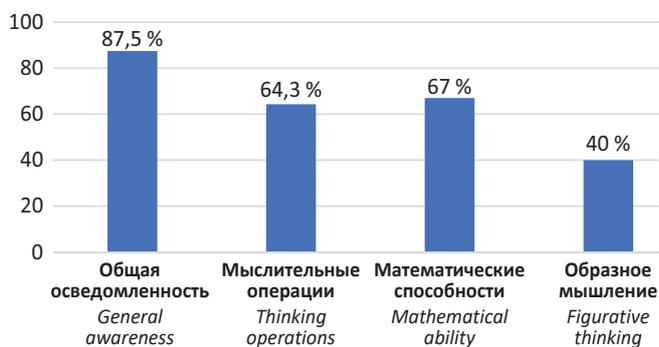


Рис. 2. Структура ментального опыта студентов
Fig. 2. Structure of students' mental experience

Матрица интеркорреляций шкал теста умственного развития и опросника саморегуляции поведения

Matrix of intercorrelations of scales of the mental development test and the self-regulation behavior questionnaire

Шкала методик <i>Scales of methods</i>	Общая осведомлённость <i>General awareness</i>	Мыслительные операции <i>Thinking operations</i>	Математические способности <i>Mathematical ability</i>	Образное мышление <i>Figurative thinking</i>
Общий уровень саморегуляции <i>General level of self-regulation</i>	0,225		0,21	
Оценка результатов <i>Evaluation of results</i>	0,244*	0,259	0,251	0,251

³ Шумская Л.И. Личностно-профессиональное становление студентов в процессе вузовской социализации: Автореф. дис. ... д-ра психол. наук. Санкт-Петербург, 2005. 50 с. EDN NIOESH.

личности и определяет способности конкретного человека как к осуществлению мыслительных операций, так и к степени эффективности и успешности их осуществления. Интеллект не сводится к общей эрудированности, набору разнообразных знаний – он является совокупностью общих сложных способностей, определяющей успешность освоения новой информации и решения мыслительных задач.

По определению М.А. Холодной, интеллектуальное воспитание – это форма организации учебно-воспитательного процесса, которая обеспечивает оказание каждому обучающемуся индивидуализированной педагогической помощи с целью развития его интеллектуальных возможностей⁴. Результатом интеллектуального воспитания является изменение характера познавательного отношения к миру, оно становится более рациональным и объективным, опираясь на методологию научного познания.

В широком смысле интеллект представляет собой ментальный опыт субъекта, который постоянно трансформируется и развивается. Целенаправленное и систематическое интеллектуальное воспитание в рамках профессиональной подготовки позволяет сформировать высокий интеллектуальный потенциал личности⁵, что в свою очередь потенцирует устойчивую познавательную мотивацию, высокий уровень рефлексии, способностей к выполнению сложной деятельности, в том числе профессиональной.

Общее и профессиональное образование должно направлять интеллектуальное развитие субъекта, обеспечивать педагогическое сопровождение с целью развития интеллектуальных возможностей обучающегося, формирования базовых интеллектуальных качеств личности: компетентности, инициативы, креативности, саморегуляции и уникального склада ума. Это составляет суть интеллектуального воспитания, которое должно способствовать применению научного подхода к описанию и объяснению явлений собственной жизни, созданию индивидуальной картины мира как максимально объективной. Интеллектуальное воспитание должно быть направлено на обогащение индивидуального ментального опыта обучающихся с учётом своеобразия его состава и строения.

Диагностика особенностей ментального опыта студентов показала, что на фоне достаточно высокой общей осведомлённости об основных понятиях общеобразовательных дисциплин недостаточно развиты способности оперировать этими понятиями:

⁴ Холодная М.А. Психология интеллекта: Парадоксы исследования. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург: Питер, 2002. 272 с. EDN PVNRAD.

⁵ Бернс Р. Развитие Я-концепции и воспитание: пер. с англ. М.: Прогресс, 1986. 420 с.

правильное выполнение операций обобщения, классификации, выделение аналогичных связей между понятиями. Особенно низкими оказались результаты решения задач, требующих манипуляций с образами в трёхмерном пространстве, то есть способность по чертежу представить объект. Очевидно, что эти способности являются составляющим элементом компетентности интеллектуального качества личности инженера и необходимы специальные педагогические воздействия для формирования данного качества в процессе профессионального обучения.

Анализ результатов исследования особенностей осознанной саморегуляции деятельности показал, что выраженными качествами саморегуляции студентов на данном этапе их личностного становления являются высокий уровень адаптивности, гибкость поведения, готовность перестраивать свои планы. Кроме положительных аспектов, в своих крайних проявлениях это свидетельствует о неустойчивости целей деятельности, недостаточной способности к их самостоятельному определению, планированию. Необходимо организовать воспитательные воздействия, направленные на формирование умения осмысливать происходящее одновременно в контексте прошлого и будущего, ориентации на выявление существенных, объективно значимых аспектов происходящего.

Субъективные критерии успешности являются недостаточно устойчивыми, что ведёт к резкому ухудшению качества результатов при увеличении объёма работы, ухудшении состояния или возникновении внешних трудностей.

Общий показатель успешности регулятивных процессов тесно связан с умением выделять логические связи между понятиями, действовать по аналогии при решении интеллектуальных задач. Возможно, это определяет и поведенческую способность переносить имеющийся опыт в сходные ситуации и упорядочивать свою деятельность.

Выводы

1. Целенаправленное и систематическое интеллектуальное воспитание студентов направления 35.03.06 «Агроинженерия» является необходимым для обеспечения эффективной и успешной инженерной деятельности.

2. Актуальными задачами воспитательной работы являются расширение кругозора обучающихся, обогащение общего ментального опыта и формирование комплекса профессиональных знаний.

3. Интеллектуальная зрелость студентов агроинженерных направлений подготовки формируется тренировкой базовых мыслительных операций и доведением их до высокого уровня развития.

Список литературы

1. Миронова Т.Н. Общая характеристика концепций воспитания // Вестник Кемеровского государственного университета. 2010. № 1 (41). С. 236-242. EDN: MBHMOX.
2. Степанов П.В. Понятие «воспитание» в современных педагогических исследованиях // Сибирский педагогический журнал. 2017. № 2. С. 121-129. EDN: YNEHPB.
3. Гатилова З.Н. Внеклассное воспитательное пространство в школе гуманитарной культуры // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2009. № 1 (79). С. 18-22. EDN: JXQOAR.
4. Kubrushko P.F., Kozlenkova E.N. Continuing engineering education: background and development vectors // 1st International Scientific Practical Conference «The Individual and Society in the Modern Geopolitical Environment» (ISMGE2019). *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*. 2019;331:397-403. <https://doi.org/10.2991/ismge-19.2019.76>
5. Lysenko E.E., Nazarova L.I. Developing technical thinking in engineering students // 1st International Scientific Practical Conference «The Individual and Society in the Modern Geopolitical Environment» (ISMGE2019). *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*. 2019;331:430-435. <https://doi.org/10.2991/ismge-19.2019.82>
6. Занфирова Л.В., Коваленок Т.П., Меликов А.В. Формирование гибких навыков агроинженеров // Международный научный журнал. 2022. № 3 (84). С. 91-101. EDN: ZQDXDZ.

Информация об авторах

- Лариса Вячеславовна Занфирова**¹, канд. пед. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-6151-2267>;
zanfirova@rgau-msha.ru
- Татьяна Петровна Коваленок**², канд. психол. наук, доцент;
<http://orcid.org/0000-0003-2835-1454>;
kovalenok@rgau-msha.ru
- Марина Валентиновна Шингарева**³, канд. пед. наук, доцент;
<http://orcid.org/0000-0002-0713-5042>;
shingareva@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Критерии авторства

Л.В. Занфирова – аналитика, методология, создание черновика рукописи
Коваленок Т.П. – концептуализация, проведение исследования, редактирование окончательной версии рукописи
Шингарева М.В. – визуализация, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 12.08.2023, после рецензирования и доработки 12.10.2023; принята к публикации 12.10.2023

References

1. Mironova T.N. General characteristics of moral education concepts. *Bulletin of Kemerovo State University*, 2010;1:236-242. (In Rus.)
2. Stepanov P.V. Concept of “moral education” in modern pedagogical studies. *Siberian Pedagogical Journal*, 2017;2:121-129. (In Rus.)
3. Gatilova Z.N. Extracurricular educational space in the school of humanitarian culture. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2009;1:18-22. (In Rus.)
4. Kubrushko P.F., Kozlenkova E.N. Continuing engineering education: background and development vectors. *1st International Scientific Practical Conference “The Individual and Society in the Modern Geopolitical Environment” (ISMGE2019). Advances in Social Science, Education and Humanities Research*. 2019;331:397-403. <https://doi.org/10.2991/ismge-19.2019.76>
5. Lysenko E.E., Nazarova L.I. Developing technical thinking in engineering students. *1st International Scientific Practical Conference “The Individual and Society in the Modern Geopolitical Environment” (ISMGE2019). Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, 2019;331:430-435. <https://doi.org/10.2991/ismge-19.2019.82>
6. Zanfirova L.V., Kovalenok T.P., Melikov A.V. Developing flexible skills of agricultural engineers. *International Scientific Journal*, 2022;3:91-101. (In Rus.)

Information about the authors

- Larisa V. Zanfirova**¹, PhD (Ed), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-6151-2267>;
zanfirova@rgau-msha.ru
- Tatyana P. Kovalenok**², PhD (Psy), Associate Professor;
<http://orcid.org/0000-0003-2835-1454>;
kovalenok@rgau-msha.ru
- Marina V. Shingareva**³, PhD (Ed), Associate Professor;
<http://orcid.org/0000-0002-0713-5042>;
shingareva@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Author contribution

L.V. Zanfirova – analytics, methodology, original draft preparation
T.P. Kovalenok – conceptualization, research, draft finalizing and editing
M.V. Shingareva – visualization, draft finalizing and editing

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 12.08.2023; revised 12.10.2023; accepted 12.10.2023