

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 31, № 2. 2021

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в январе 1990 г.
Периодичность издания –
4 раза в год
16+



Vol. 31, no. 2. 2021

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

DOI: 10.15507/2658-4123

Учредитель и издатель –
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет
им. Н. П. Огарёва»

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

FOUNDER AND PUBLISHER –
Federal State
Budgetary Educational
Institution
of Higher Education
“National Research
Ogarev Mordovia
State University”

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК)

Индексируется и архивируется в Web of Science Core Collection (ESCI),
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также EBSCO

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),
Committee on Publication Ethics (COPE),

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef
Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство ПИ № ФС77-74640 от 24.12.2018 г.

Подписной индекс – **70539**

Адрес учредителя, издателя и редакции:
430005, Российская Федерация,
Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1
Тел./факс: +7 (8342) 48-14-24

Founder, Publisher and Editorial House address:
68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,
Republic of Mordovia,
Russian Federation
Tel/Fax: +7 8342 481424

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2021

Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

публикует оригинальные научные статьи (Full Articles) на русском и английском языках, ранее не публиковавшиеся в других изданиях. Миссия заключается в публикации результатов научных исследований, способствующих развитию науки в области инженерных систем и технологий.

Журнал адресован исследователям, аналитикам и практикам в области физики и сельскохозяйственного производства, а также широкому кругу читателей, интересующихся проблемами технических наук.

Редакция журнала осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих статей. Рукопись статьи направляется на рецензирование для оценки ее научного содержания нескольким ведущим специалистам соответствующего профиля, имеющим научную специализацию, наиболее близкую к тематике статьи.

Редакция журнала реализует принцип нулевой толерантности к плагиату. Мониторинг некорректного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

Журнал предоставляет открытый доступ к полным текстам публикаций, исходя из следующего принципа: открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

01.03.02 Приборы и методы экспериментальной физики

01.03.06 Оптика

01.03.13 Электрофизика, электрофизические установки

04.03.01 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

04.03.02 Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение агропромышленного комплекса

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

Журнал является членом Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics (COPE), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef и международного сообщества рецензентов Publons

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная



The scientific journal Engineering Technologies and Systems

publishes original scientific articles (full articles) in Russian and English, which have not been previously published in other publications. The mission of the journal is to publish research results that contribute to the advancement of knowledge in area of engineering systems and technology.

The journal is addressed to researchers, analysts and practitioners in the fields of physics and agricultural production, as well as readers interested in engineering problems.

The Editorial Board reviews (double-blind review) all incoming papers. The manuscript of the article is sent for review to several leading specialists of the corresponding profile, who have scientific specialization closest to the subject of the article, to evaluate the scientific content.

The Editorial Board follows the principle of zero tolerance to plagiarism. The incorrect citations shall be monitored with the help of AntiPlagiat and CrossCheck systems.

The journal is distributed in Russian Federation and other countries of the world.

The journal offers direct open access to full-text issues based on the following principle: open access to research results contributes to the global knowledge sharing.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Sciences should be published for scientific specialties and branches of science:

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies, Machinery and Equipment for Agro-Industries

Electrotechnics, Electrical Equipment and Power Supply in Agro-Industries

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),

Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication

Ethics (COPE), Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef and the international community of reviewers Publons

All the materials of the “Engineering Technologies and Systems” journal are available under Creative Commons “Attribution” 4.0 license



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Вдовин Сергей Михайлович – *главный редактор*, ректор ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@adm.mrsu.ru (Саранск, Российская Федерация)

Сенин Пётр Васильевич – *заместитель главного редактора*, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Российская Федерация)

Гордина Светлана Викторовна – *ответственный секретарь*, член Европейской ассоциации научных редакторов (EASE), кандидат педагогических наук, ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет» (Москва, Российская Федерация); профессор кафедры лесной индустрии Бартынского государственного университета, доктор биологических наук (Бартын, Турция)

Булгаков Алексей Григорьевич – профессор кафедры промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Российская Федерация); профессор строительного факультета Дрезденского технического университета, доктор технических наук, ORCID: 0000-0003-4261-9840 (Дрезден, Германия)

Димитров Валерий Петрович – заведующий кафедрой управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ерофеев Владимир Трофимович – академик Российской академии архитектуры и строительных наук, декан архитектурно-строительного факультета ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8407-8144 (Саранск, Российская Федерация)

Железникова Ольга Евгеньевна – директор Института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат технических наук, доцент, Scopus ID: 56362747600 (Саранск, Российская Федерация)

Игумнов Леонид Александрович – заведующий кафедрой теоретической, компьютерной и экспериментальной механики ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3035-0119 (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Истомина Наталья Леонидовна – начальник отдела физических наук Российской академии наук, заместитель академика-секретаря по научно-организационной работе ОФН РАН; профессор кафедры управления инновациями ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»; главный редактор научно-технического журнала «Фотоника», доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-6008-1226 (Москва, Российская Федерация)

Кечемайкин Владимир Николаевич – директор Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук, доцент (Саранск, Российская Федерация)

Котин Александр Владимирович – профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, ORCID: 0000-0001-8235-0052 (Саранск, Российская Федерация)

Кусмарцев Федор Васильевич – декан физического факультета Университета Лафборо (Лафборо, Великобритания); профессор Колледжа искусств и наук Университета Халифы, кандидат физико-математических наук, Scopus ID: 7006372417 (Абу-Даби, ОАЭ)

Кухарев Олег Николаевич – ректор ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Пенза, Российская Федерация)

Микаева Светлана Анатольевна – заведующий кафедрой электроники ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», доктор технических наук, доцент, Scopus ID: 8542764000 (Москва, Российская Федерация)

Нищев Константин Николаевич – директор Института физики и химии ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Саранск, Российская Федерация)

Прытков Юрий Николаевич – директор Аграрного института ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Российская Федерация)

Рябочкина Полина Анатольевна – научный руководитель лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Саранск, Российская Федерация)

Салем Абдель-Бадех Мохамед – руководитель Исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук университета Ain Shams, доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор, ORCID: 0000-0003-0268-6539 (Каир, Египет)

Скрябин Владимир Александрович – профессор кафедры технологий и оборудования в машиностроении ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доктор технических наук, ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Пенза, Российская Федерация)

Чучаев Иван Иванович – декан факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент (Саранск, Российская Федерация)

Шишелова Тамара Ильинична – профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, профессор, Scopus ID: 6507978465 (Иркутск, Российская Федерация)

Ямашкин Анатолий Александрович – декан географического факультета ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор географических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Саранск, Российская Федерация)

EDITORIAL BOARD

Sergey M. Vdovin – *Editor-in-Chief*, Rector of National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Economics), Associate Professor, ORCID: [0000-0001-7363-1389](#), rector@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)

Petr V. Senin – *Deputy Editor-in-Chief*, Vice-Rector for Science and Research, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: [0000-0003-3400-7780](#), vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)

Svetlana V. Gordina – *Executive Editor*, Member of European Association of Science Editors (EASE), Cand.Sc. (Pedagogy), ORCID: [0000-0003-2265-418X](#), vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

Surhay Allahverdi – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University (Moscow, Russian Federation); Head of the Forest Industry Chair, Bartın University, D.Sc. (Biology) (Bartın, Turkey)

Aleksey G. Bulgakov – Professor of the Chair of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University (Kursk, Russian Federation); Professor of Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engineering), ORCID: [0000-0003-4261-9840](#) (Dresden, Germany)

Ivan I. Chuchayev – Dean of the Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russian Federation)

Valeriy P. Dimitrov – Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: [0000-0003-1439-1674](#) (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Leonid A. Igumnov – Head of the Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: [0000-0003-3035-0119](#) (Nizhniy Novgorod, Russian Federation)

Natalia L. Istomina – Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work; Professor of the Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University); Editor-in-Chief, Photonics Russia, D.Sc. (Phys.-Math.), ORCID: [0000-0001-6008-1226](#) (Moscow, Russian Federation)

Vladimir N. Kechemaykin – Director of the Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Economics), Associate Professor (Saransk, Russian Federation)

Aleksandr V. Kotin – Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: [0000-0001-8235-0052](#) (Saransk, Russian Federation)

Fedor V. Kusmartsev – Head of Physics Department, Loughborough University (Loughborough, Great Britain); Professor of College of Art and Science, Khalifa University, Ph.D. (Phys.-Math.), Scopus ID: [7006372417](#) (Abu Dhabi, UAE)

Oleg N. Kukharev – Rector of Penza State Agrarian University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: [0000-0002-3519-4066](#) (Penza, Russian Federation)

Svetlana A. Mikayeva – Head of the Electronics Chair, MIREA – Russian Technological University, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Scopus ID: [8542764000](#) (Moscow, Russian Federation)

Konstantin N. Nishchev – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: [0000-0001-7905-3700](#) (Saransk, Russian Federation)

Yuriy N. Prytkov – Director of Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Agriculture), Professor (Saransk, Russian Federation)

Polina A. Ryabochkina – Scientific Director of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: [0000-0001-8503-8486](#) (Saransk, Russian Federation)

Abdel-Badeeh M. Salem – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of Faculty of Computers and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (Computer Science), Emeritus Professor, ORCID: [0000-0003-0268-6539](#) (Cairo, Egypt)

Tamara I. Shishelova – Professor of the Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engineering), Scopus ID: [6507978465](#) (Irkutsk, Russian Federation)

Vladimir A. Skryabin – Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: [0000-0001-7156-9198](#) (Penza, Russian Federation)

Anatoliy A. Yamashkin – Dean of Geography Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geography), Professor, ORCID: [0000-0001-9995-8371](#) (Saransk, Russian Federation)

Vladimir T. Yerofeev – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural and Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: [0000-0001-8407-8144](#) (Saransk, Russian Federation)

Olga Ye. Zheleznikova – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor, Scopus ID: [56362747600](#) (Saransk, Russian Federation)



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Комаров В. А., Курашкин М. И. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период.....	188
Габитов И. И., Неговора А. В., Сафин Ф. Р., Магафуров Р. Ж., Раков Н. В. Оценка технического состояния электроуправляемых форсунок дизелей по характеристике топливоподачи.....	207

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Субботин И. А., Васильев Э. В. Модель прогнозирования комплексного негативного воздействия технологий сельхозпроизводства на водные объекты	227
Второй В. Ф., Второй С. В., Гордеев В. В. Информационно-прогнозная модель температурно-влажностного режима коровника	241
Сыромятников Ю. Н. Обоснование параметров рыхлителя почвообрабатывающей машины стратификатора	257
Сыроватка В. И., Жданова Н. В., Рассказов А. Н., Обухов А. Д., Торопов Д. И. Сублимация рыбопродуктов в условиях Арктики при производстве кормов для сельскохозяйственных животных	274

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Шелехов И. Ю. Описание новой методики приготовления хлебобулочных изделий из пшенично-ржаной муки на закваске.....	291
--	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Самиков Р. Ф., Нигматуллин Ш. Ф., Разяпов М. М., Козеев А. А., Смольянов А. В., Галин Д. А. Повышение эффективности работы жидкостного подогревателя при предпусковой подготовке двигателя внутреннего сгорания	304
<i>Отзыв публикаций</i>	<i>321</i>
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....</i>	<i>323</i>
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....</i>	<i>325</i>



CONTENTS

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

Komarov V. A., Kurashkin M. I. Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period.....	188
Gabitov I. I., Negovora A. V., Safin F. R., Magafurov R. Zh., Rakov N. V. Assessment of the Technical Condition of Electric-Controlled Diesel Injectors According to the Fuel Supply Characteristics.....	207

TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

Subbotin I. A., Vasilev E. V. A Forecast Model of the Complex Negative Impact of Agricultural Production Technologies on Water Bodies	227
Vtoryi V. F., Vtoryi S. V., Gordeev V. V. The Information Predictive Model of Creating Temperature and Humidity Conditions in Cow Barns.....	241
Syromyatnikov Yu. N. Substantiation of the Parameters of a Soil Tillage Machine Ripper	257
Syrovatka V. I., Zhdanova N. V., Rasskazov A. N., Obuhov A. D., Toropov D. I. Sublimation Drying of Fish Products in the Arctic in the Production of Feed for Farm Animals....	274

ELECTROTECHNOLOGIES AND ELECTRICAL EQUIPMENT IN AGRICULTURE

Shelekhov I. Yu. Description of a New Methodology for Baking Products from Wheat and Rye Flour by the Sour Dough Method.....	291
---	-----

MECHANICAL ENGINEERING

Samikov R. F., Nigmatullin Sh. F., Razyapov M. M., Kozeev A. A., Smolyanov A. V., Galin D. A. Improving the Efficiency of the Liquid Heater in the Pre-Start Preparation of the Internal Combustion Engine	304
<i>Retraction Note</i>	321
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	323
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	325

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

УДК 631.354

DOI: [10.15507/2658-4123.031.202102.188-206](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206)

Оригинальная статья



Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период

В. А. Комаров*, М. И. Курашкин*ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Российская Федерация)***komarov.v.a2010@mail.ru*

Введение. Зерноуборочный комбайн в течение года используют не более двух месяцев. Он должен обладать максимальной эксплуатационной надежностью, так как даже непродолжительные простои в период уборочных работ ведут к большим потерям урожая. Целью настоящего исследования является выявление причин отказов комбайнов при гарантийной эксплуатации.

Материалы и методы. Выявление последствий сбоев и обеспечение непрерывной работы комбайнов основывается на усовершенствованной классификации отказов. В процессе исследования предложены пути решения проблемы простоя комбайнов на основании анализа времени на устранение неисправности. Учитывалась категория тяжести последствий отказов.

Результаты исследования. В результате наблюдений в период с 2018 по 2020 гг. выявлены отказы узлов и систем комбайнов, имеющих низкие показатели надежности в гарантийный период. Большая часть отказов (59,2 %) – у комбайнов российского производства. Из них эксплуатационные отказы составляют 55,9 %, конструктивные – 26,7 % и производственные – 17,4 %. Определены общие закономерности изменения среднего времени на устранение отказов комбайнов. Создана геометрическая модель детали, обеспечивающей безотказную работу комбайнов (вал шнека жатки). Использовался конечно-элементный анализ (ANSYS), позволивший выявить участки, подверженные максимальной рабочей нагрузке. Выявлены узлы и детали, выходящие из строя в период гарантийной эксплуатации по причинам, связанным с конструктивно-технологическими недоработками.

Обсуждение и заключение. С целью сокращения времени на устранение последствий отказов необходимо создание более разветвленной сети предприятий, оказывающих широкую номенклатуру сервисных услуг, совершенствование организации

© Комаров В. А., Курашкин М. И., 2021

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

технического сервиса и расширение прямых связей с заводами-изготовителями техники для быстрого реагирования и принятия необходимых конструктивно-технологических решений.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, эксплуатация, гарантийный период, конструкционно-технологическая недоработка, отказ, время устранения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Комаров, В. А. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период / В. А. Комаров, М. И. Курашкин. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.188-206](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 188–206.

Original article

Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period

V. A. Komarov*, M. I. Kurashkin

National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

**komarov.v.a2010@mail.ru*

Introduction. Grain harvesters are used for no more than two months within a year. They must have maximum operating reliability, since even short downtime during the harvesting period result in large crop losses. The purpose of the study is to identify the causes of combine harvester failures within the warranty period.

Materials and Methods. Identifying consequences of failures and ensuring the reliability of grain harvesters are based on an improved classification of failures. In the process of studying, there have been proposed the ways to solve the problem of combine harvester downtime based on the analysis of the time for grain harvester troubleshooting. The category of severity of failure consequences was taken into account.

Results. Through monitoring in the period from 2018 to 2020, there were found failures of units and systems of grain harvesters with low reliability indexes within the warranty period. Most of the failures (59.2%) were found in Russian-manufactured combines, of which operational failures are 55.9%, structural failures – 26.7%, and production failures – 17.4%. The general patterns of changes in the average time for combine troubleshooting have been determined. A geometric model of a detail for the trouble-free operation of combines (header auger shaft) was created. The finite element analysis (ANSYS) was used to identify parts, which are subject to maximum workload. There have been identified units and parts, which fail to function within the warranty period, because of design and technological defects.

Discussion and Conclusion. In order to reduce the time to find the consequences of failures, it is necessary to create a more extensive network of enterprises providing a wide range of services, improve the organization of technical service and expand direct links with the manufacturers of equipment in order to respond quickly and make the necessary design and technological decisions.

Keywords: grain harvester, operation, warranty period, structural and technological defect, failure, time for troubleshooting

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

For citation: Komarov V.A., Kurashkin M.I. Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):188-206. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206>

Введение

Важнейшим звеном в технологической цепочке производства зерновых культур и наиболее напряженной операцией является уборочный процесс. От его продолжительности во многом зависит уровень качества и количество полученного урожая [1–3].

Множество видов сельскохозяйственных культур, разнообразие погодных условий в регионах Российской Федерации требуют от производителей техники разработки и создания высокопроизводительных и надежных зерноуборочных комбайнов [1; 4; 5].

При этом в процессе эксплуатации комбайнов необходимо обеспечение высокого уровня безотказности функционирования [6–8]. Отказ какой-либо подсистемы приводит к нарушению всего комплекса технологических операций. Это может стать причиной снижения уровня работоспособности комбайнов как в гарантийный период, так и в течение всего срока службы [9–11].

Особенно важно в процессе эксплуатации комбайнов обеспечить и сохранить заложенные на этапах конструирования и производства параметры надежности [12; 13]. Наиболее ответственным с этой точки зрения является начальный период использования комбайнов. Нарушение правил эксплуатации и обслуживания комбайнов в гарантийный период может привести к возникновению преждевременных отказов [14–16].

Целью настоящего исследования является выявление конструктивных, производственных и эксплуатационных отказов, причин возникновения и времени на их устранение для агрегатов зерноуборочных комбайнов различных производителей в период гарантийной эксплуатации.

Обзор литературы

Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 года стимулирует приобретение значительного объема новой техники, в том числе комбайнов¹. Для эффективного использования новых комбайнов необходим анализ производственного уровня параметров безотказности, долговечности и ремонтпригодности. Такие экспериментальные исследования позволяют установить общие зависимости изменения показателей надежности в различные периоды срока службы. Особенно это важно во время действия гарантии для выявления конструктивных и технологических недоработок и создания рекомендаций по их устранению [17–19].

Продолжительность использования комбайнов в технологических операциях в течение года не превышает двух месяцев [20; 21]. Поэтому комбайны должны иметь максимальные эксплуатационные показатели безотказности и долговечности. Возникновение в процессе уборочных работ непродолжительных простоев ведет к снижению урожайности и большим потерям зерна [8; 22; 23].

Согласно данным исследователей зафиксированные простои машин на уборочных работах составляют от 10 до 50 % от общего времени использования комбайнов [3; 9]. Однако большинство исследователей при определении среднего времени устранения последствий отказов учитывают только оперативное и подготовительно-заключительное время (0,5–9 ч) [3; 7; 21]. В действительности затраты времени на организацию восстановления агрегатов составляют более 50 % от общего времени и достигают 70 ч [14; 15]. Длительные простои связаны с несвоевременным обеспечением

¹ Об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс] // Правительство РФ. Распоряжение от 12 апреля 2020 года № 993-р. URL: <http://docs.cntd.ru/document/564654448> (дата обращения: 14.02.2021).

техники запасными частями вследствие отсутствия развитой структуры технического сервиса [19; 24].

Поэтому ряд исследований посвящен вопросам обоснования оптимального времени простоя комбайнов из-за устранения последствий отказов. При этом учитывается сезонная нагрузка на один комбайн и весовые производственные и природно-климатические факторы [1; 9; 22].

В целом анализ видов и последствий отказов осуществляют с целью обоснования достаточности и эффективности принимаемых решений. При этом обеспечивается снижение вероятности возникновения и тяжести последствий отказов за исключением тех, которые могут привести к значительному ущербу объекта или окружающей среды, гибели или тяжелым травмам механизаторов, срыву выполнения поставленной задачи [4; 11].

Материалы и методы

При вычислении показателей надежности комбайнов (среднее время восстановления), согласно рекомендуемым положениям руководящего документа, предусматриваются следующие этапы: определение плана наблюдений, сбор данных о параметрах надежности, статистическая обработка данных². Для изделий серийного производства доверительная вероятность $q = 0,9$, относительная ошибка $\varepsilon = 0,1$. Для объектов, включающих как восстанавливаемые, так и невосстанавливаемые системы при определении среднего времени восстановления, рекомендуется план наблюдений [NUN], [NMT] или [NMr]. При плане наблюдений [NUN], с учетом доверительной вероятности q , предельной относительной ошибки ε ,

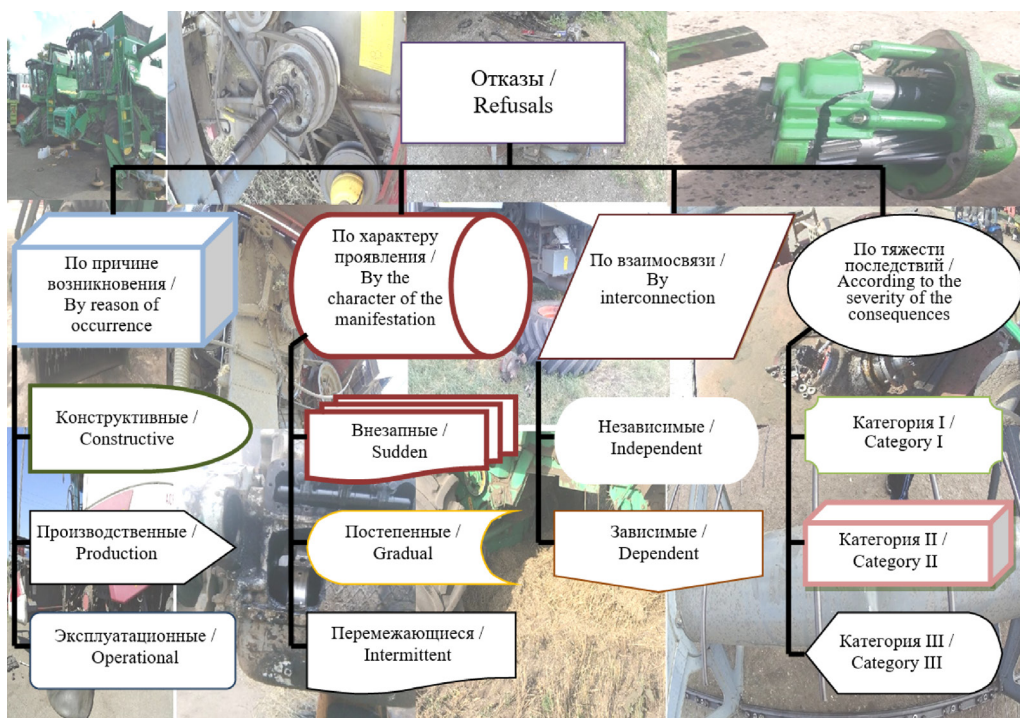
коэффициента вариации V (менее 0,4), вида закона распределения (закон Вейбулла) случайных величин (среднее время восстановления) на основании групп объектов-аналогов и ограниченного объема совокупности ($M = 50$), минимальное количество наблюдений комбайнов каждой марки составит $N = 11$. Для планов наблюдений [NMT] и [NMr] суммарное минимальное количество отказов будет равно 130–250, а общая наработка – суммарной величине гарантийной наработки контрольной группы комбайнов.

Достоверность установления последствий отказов и разработка путей повышения безотказности комбайнов основываются на исследуемой классификации отказов в гарантийный период (рис. 1). Она разработана на базе положений ГОСТа 27.310-95³.

Распределение отказов на конструктивные, производственные и эксплуатационные производилось на основании комплекса международных, межгосударственных, национальных стандартов, стандартов заводов-изготовителей и основных документов в данной области. При этом использовался поэтапный принцип установления причины отказа с созданием экспертных комиссий и использованием современного испытательного или исследовательского оборудования, а именно: I этап – на базе подразделений официальных дилеров, осуществляющих гарантийное обслуживание комбайнов в регионе; II этап – в лабораториях учебно-научно-инновационного центра ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»; III этап – на производственных площадках и испытательных центрах заводов-изготовителей и их филиалов.

² РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035567> (дата обращения: 16.02.2021).

³ ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике (ССНТ). Анализ видов, последствий и критичности отказов. М., 2002.



Р и с. 1. Исследуемая классификация отказов комбайнов в гарантийный период
F i g. 1. Researched classification of combine failures within the warranty period

В гарантийный период эксплуатации зерноуборочных комбайнов не рассматривались катастрофические отказы (IV категория тяжести последствий отказов) вследствие того, что вероятность их возникновения при данных величинах наработки равна нулю.

Одним из важнейших показателей при устранении последствий отказов является время поиска причины отказа и восстановления узла. Длительность ремонта комбайнов в результате устранения последствий отказа в значительной степени зависит от метода определения местонахождения отказа [7; 9; 20]. Результаты ранее проведенных исследований эксплуатации комбайнов показали, что более 50 % времени в процессе ремонта затрачивается на обнаружение отказа и менее 50 % на устранение последствий отказа [12; 14; 15].

Для сокращения времени поиска местонахождения отказа необходимо, прежде всего, знание особенностей устройства и правил обслуживания и эксплуатации комбайнов [25]. Проведенный анализ баланса использования времени смены при эксплуатации комбайнов показал, что основными путями уменьшения являются следующие: значительное увеличение коэффициента технического использования; уменьшение временных затрат на цикловые технологические обслуживания; сокращение времени на устранение последствий отказов [1; 10; 23].

Среднее время устранения последствий отказов, с учетом категории тяжести для комбайнов, будет определяться суммой составляющих времени на его обнаружение, разборку агрегатов, восстановление деталей,

доставку запасных частей, сборку агрегатов и т. п. Отсюда среднее время устранения последствий отказов для каждой категории определяется по следующей зависимости [7; 24]:

$$t_{\text{ср. п. ш}} = \left(\sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n t_{\text{оо}_i} + t_{\text{пю}_i} + t_{\text{с}_j} + t_{\text{д}_j} + t_{\text{дрм}_j} + t_{\text{рм}_j} + t_{\text{в}_j} + t_{\text{р}_j} + t_{\text{п}_j} \right) \right) / N, \quad (1)$$

где $t_{\text{оо}_i}$ – время обнаружения последствий i -го отказа, ч; $t_{\text{пю}_i}$ – время передачи оперативной информации о местонахождении i -го отказа, ч; $t_{\text{с}_j}$ – время демонтажа j -го неисправного агрегата, ч; $t_{\text{д}_j}$ – время доставки запасных частей и материалов для j -го неисправного агрегата, ч; $t_{\text{дрм}_j}$ – время доставки на предприятие технического сервиса j -го неисправного агрегата (вторая и третья категории тяжести последствий отказа), ч; $t_{\text{рм}_j}$ – время восстановления деталей (после отказа) и ремонта агрегата (вторая и третья категории тяжести последствий отказа), ч; $t_{\text{в}_j}$ – время установки j -го неисправного агрегата, ч; $t_{\text{р}_j}$ – время регулировки и проверки работоспособного состояния j -го агрегата после ремонта, ч; $t_{\text{п}_j}$ – время доставки j -го агрегата к месту использования по назначению после устранения последствий отказа, ч.

Методика статистической обработки оценочных показателей надежности комбайнов позволяет получить основные характеристики рассматриваемой выборки $A(N)$ с учетом трех категорий тяжести последствий отказов [17].

Некоторая часть отказов объектов исследования в процессе гарантийной эксплуатации может быть связана с конструктивными недоработками. Поэтому для создания точного и современного инструмента решения конструктор-

ских задач в работе используется среда «КОМПАС-3D». Она позволяет создать пространственные геометрические модели деталей сложных конфигураций с последующим компьютерным решением на основе программного обеспечения системы автоматизированного проектирования [26; 27].

Одним из мощных пакетов программ по определению напряженно-деформированного состояния деталей и узлов является ANSYS. В работе проводится исследование некоторых деталей, обеспечивающих надежность агрегатов, с использованием конечно-элементного анализа опасных сечений в блоке программ ANSYS 14.5 [26; 27].

Результаты исследования

В хозяйствах Приволжского федерального округа в период с 2018 по 2020 гг. были проведены исследования по выявлению отказов комбайнов зарубежного и российского производства в гарантийный период.

Всего под наблюдением находились 66 комбайнов трех зарубежных («Десна-Полесье GS12», Claas Lexion 770 и John Deere W650) и трех отечественных (Acros-585, Acros-595 Plus и RSM-161) марок (по 11 каждой модели). Информация об устранении последствий отказов была получена благодаря непрерывному наблюдению за эксплуатацией комбайнов и из документов бухгалтерской отчетности. Основные внешние проявления отказов комбайнов, обнаруженные в период гарантийной эксплуатации, представлены на рисунках 2–5.

В таблицах 1 и 2 представлены основные характеристики отказов комбайнов по категориям тяжести последствий (категория I – отказ с пренебрежительно малыми последствиями, категория II – некритический отказ, категория III – критический отказ)⁴.

⁴ Там же.



a)

b)

Р и с. 2. Внешние проявления отказов комбайнов Claas: а) обрыв цепочно-планчатого транспортера; б) сворачивание валов в шлицевых соединениях

Fig. 2. External manifestations of failures of the Claas combine: a) breakage of the chain-slat conveyor; b) collapse of the shafts in the spline joints



a)

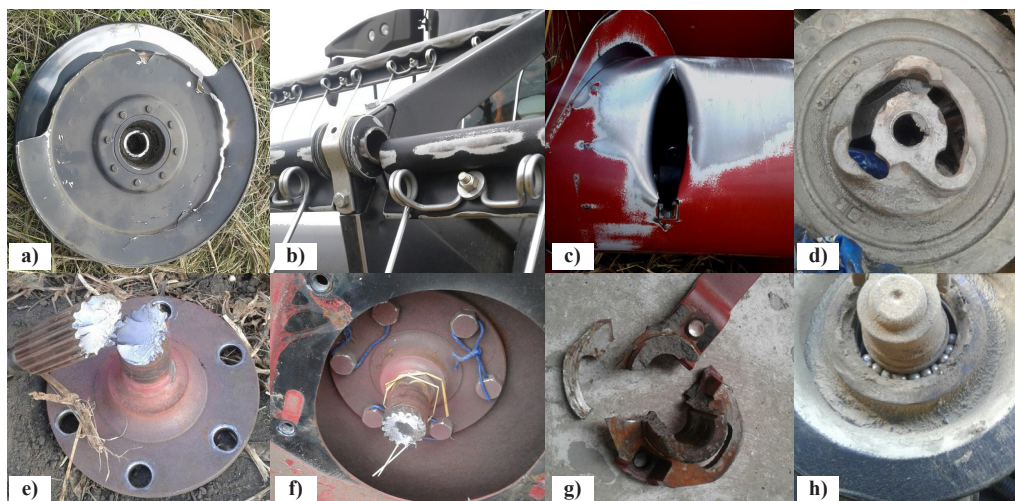
b)

c)

d)

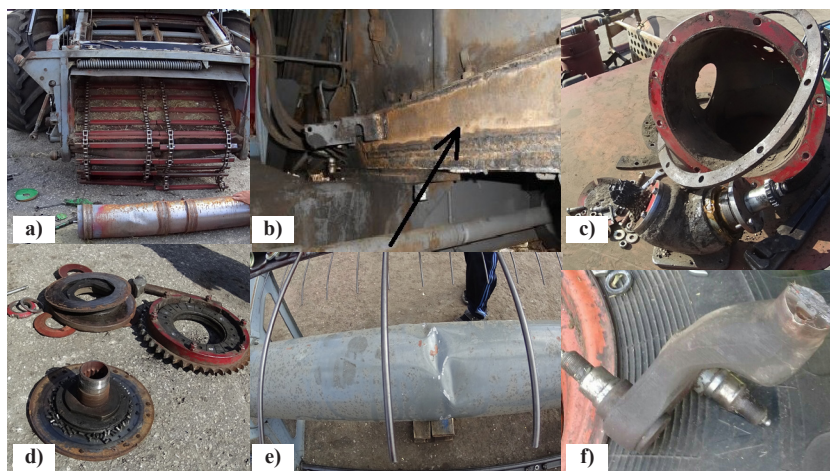
Р и с. 3. Внешние проявления отказов комбайнов John Deere: а) разрушение шкива привода режущего механизма; б) излом крышки КП; в) выход из строя подшипников и излом шнека жатки; д) выход из строя пальцевого механизма и шнека

Fig. 3. External manifestations of failures of the John Deere combine: a) destruction of the cutter drive pulley; b) break in the gearbox cover; c) failure of the bearings and the screw of the header; d) failure of the finger mechanism and the screw



Р и с. 4. Внешние проявления отказов комбайнов Acros-595 Plus: а) разрушение шкива привода режущего механизма; б) излом граблины мотовила; с) выход из строя пальцевого механизма шнека жатки и разрыв шнека; д) излом шкивов привода зерновой группы; е), ф) излом вала шнека жатки в двух проекциях; г) излом рычага регулировки шнека жатки; х) выход из строя подшипников шкива леникса

F i g. 4. External manifestations of failures of the Acros-595 Plus combine а) destruction of the cutter drive pulley; б) fracture tines of the reel; с) the failure of the finger mechanism of the auger of the header, the gap of the screw; д) fracture of the pulleys of the drive grain group; е), ф) fracture of the shaft of the screw headers in two projections; г) a jog lever adjustment screw headers; х) the failure of the bearings of the pulley leniks



Р и с. 5. Внешние проявления отказов комбайнов «Десна-Полесье GS12»: а) излом нижнего вала транспортера наклонной камеры; б) трещина левой стороны рамы молотилки (по стрелке наложенная усиливающая пластина); с) выход из строя редуктора выгрузного шнека; д) выход из строя подшипников предохранительной муфты; е) излом вала мотовила; ф) излом поворотного рычага

F i g. 5. External manifestations of failures of combine Desna-Polesie GS12: а) break of the lower shaft of the inclined chamber conveyor; б) crack on the left side of the threshing frame (in the direction of the arrow, a reinforcing plate applied); с) failure of the discharge screw reducer; д) failure of the bearings of the pre-storage clutch; е) break of the reel shaft; ф) break of the rotary lever

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Основные характеристики отказов комбайнов зарубежного производства
The main characteristics of failures of foreign-made combines

Признак классификации отказа / Failure classification sign	Количество, ед. / Amount, units	Распределение отказов по тяжести последствий, % / Distribution of failures by severity of consequences, %			Доля, % / Share, %
		категория I / category I	категория II / category II	категория III / category III	
Причина возникновения / Causes of failures					
Конструктивная / Constructive	52	57,7	25,0	17,3	28,0
Производственная / Production	28	28,6	53,6	17,8	15,0
Эксплуатационная / Operational	106	53,8	29,2	17,0	57,0
Характер проявления / The nature of the manifestation					
Внезапный / Sudden	158	42,4	37,3	20,3	84,9
Постепенный / Gradual	—	—	—	—	—
Перемежающийся / Intermittent	28	100,0	—	—	15,1
Взаимосвязь / Interconnection					
Независимый / Independent	116	53,4	30,2	16,4	62,4
Зависимый / Dependent	70	47,1	34,3	18,6	37,6
Всего	186	51,1	31,7	17,2	100,0

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Основные характеристики отказов комбайнов российского производства
Main characteristics of failures of russian-manufactured combines

Признак классификации отказа / Failure classification sign	Количество, ед. / Amount, units	Распределение отказов по тяжести последствий, % / Distribution of failures by severity of consequences, %			Доля, % / Share, %
		категория I / category I	категория II / category II	категория III / category III	
1	2	3	4	5	6

Причина возникновения /
Causes of failures

Конструктивная / Constructive	72	56,9	25,0	18,1	26,7
Производственная / Production	47	29,8	48,9	21,3	17,4
Эксплуатационная / Operational	151	51,6	30,5	17,9	55,9

Окончание таблицы 2 / End of table 2

1	2	3	4	5	6
Характер проявления / The nature of the manifestation					
Внезапный / Sudden	235	41,7	37,0	21,3	87,0
Постепенный / Gradual	–	–	–	–	–
Перемежающийся / Intermittent	35	100,0	–	–	13,0
Взаимосвязь / Interconnection					
Независимый / Independent	181	49,7	32,1	18,2	67,0
Зависимый / Dependent	89	48,3	32,6	19,1	33,0
Всего	270	49,3	32,2	18,5	100,0

Из таблиц 1 и 2 видно, что наибольшее количество отказов комбайнов как зарубежного, так и российского производства связано с эксплуатационными причинами возникновения – 57,0 (55,9) %⁵. Отказы комбайнов носят в основном внезапный характер – 84,9 (87,0) %. При этом примерно две трети от общего количества отказов комбайнов являются независимыми, 62,4 (67,0) %, и одна треть становится причиной возникновения целой цепочки других отказов агрегатов.

Наибольшее число конструктивных отказов комбайнов в гарантийный период относится к первой категории тяжести – 57,7 (56,9) %; производственных – ко второй категории тяжести – 53,6 (48,9) %; эксплуатационных – к первой категории тяжести – 53,8 (51,6) %; внезапных – к первой и второй категориям тяжести – 79,7 (78,7) %; перемежающихся – к первой категории тяжести – 100,0 (100,0) %.

Таким образом, наибольшее число отказов всех видов относится к первой и второй категориям тяжести – 82,8 (81,5) %.

Из таблицы 3 видно, что у комбайнов российского производства доля

отказов от общего их числа составила 59,2 %, а у зарубежных – 40,8 %. Наиболее весомые (по стоимости и продолжительности устранения) отказы третьей категории тяжести составили 17,2 (18,5) % от общего количества.

При этом катастрофических отказов (IV категория тяжести) за период наблюдений не выявлено.

Для проведения полного статистического анализа исследуемой выборки по каждой из трех категорий тяжести последствий отказов использовался пакет программ⁶. Результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 4.

Получены величины коэффициента вариации среднего времени устранения последствий отказов комбайнов каждой категории, а именно: $V_I = 26,88$ (27,03) %; $V_{II} = 28,74$ (22,77) %; $V_{III} = 15,00$ (17,75) %. Полученные значения указывают на однородность исследуемой совокупности, так как полученные величины коэффициентов вариации менее 33 %.

Выявлено, что одной из деталей, имеющих низкую долговечность, является вал шнека жатки РСМ-081.27 (Power Stream 700) (27 % отказов комбайнов российского производства).

⁵ Здесь и далее информация об отечественных комбайнах дается в скобках.

⁶ Статистика. Онлайн калькулятор [Электронный ресурс]. URL: <https://allcalc.ru/node/883> (дата обращения: 16.02.2021).

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Количество отказов зерноуборочных комбайнов

Number of failures of grain harvesters

Марки зерноуборочных комбайнов / Grain harvester brands	Общее количество, ед. / Total, units	Распределение отказов по тяжести последствий, ед. / Distribution of failures by severity of consequences, units			Доля отказов, % / Bounce rate, %
		категория I / category I	категория II / category II	категория III / category III	
Зарубежные: все марки / Foreign: all brands	186	95	59	32	40,80
«Десна-Полесье GS12» / Desna-Polesie GS12	82	39	26	17	17,99
Claas Lexion 770	58	30	18	10	12,72
John Deere W650	46	26	15	5	10,09
Российского производства: все марки / Russian-manufactured: all brands	270	133	87	50	59,20
Acros-595 Plus	94	43	29	22	20,61
Acros-585	112	56	35	21	24,56
RSM-161	64	34	23	7	14,03
Всего отказов, ед. (%) / Total bounce rate, units (%)	456 (100)	228 (50)	146 (32)	82 (18)	100,00

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

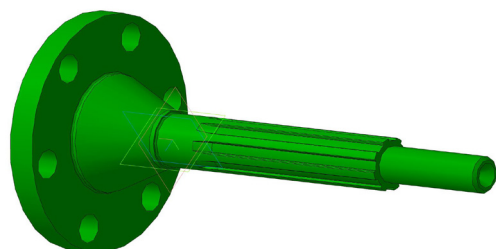
Статистический анализ времени устранения последствий отказов комбайнов
Statistical analysis of the time for troubleshooting the consequences of combine failures

Наименование статистического параметра / Statistical parameter name	Категории тяжести последствий отказов / Failure severity categories					
	I		II		III	
	Зарубежные / Foreign	Российские / Russian	Зарубежные / Foreign	Российские / Russian	Зарубежные / Foreign	Российские / Russian
1	2	3	4	5	6	7
Среднее значение выборки A_{cp} , ч/отказ / Sample mean A_{cp} , h/refusal	20,17	23,83	41,04	46,29	63,70	68,05
Дисперсия выборки σ^2 , ч/отказ / Sample variance σ^2 , h/refusal	29,41	41,50	139,07	111,14	91,26	145,94
Среднеквадратическое отклонение S_B , ч/отказ / Standard deviation S_B , h/refusal	5,42	6,44	11,79	10,54	9,55	12,08

Окончание таблицы 4 / End of table 4

1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент вариации v , % / The coefficient of variation v , %	26,88	27,03	28,74	22,77	15,00	17,75
Ошибка среднего значения S_p , ч/отказ / Mean error S_p , h/refusal	0,81	0,93	1,18	1,24	1,56	1,63
Относительная ошибка среднего значения ε , % / The relative error of the mean ε , %	1,76	1,81	2,36	2,42	2,91	3,06
Ошибка среднеквадратического отклонения S_s , ч/отказ / Standard deviation error S_s , h/refusal	0,38	0,40	1,09	0,80	1,19	1,21
Ошибка коэффициента вариации S_v , % / Coefficient of variation error S_v , %	2,02	1,73	2,72	1,77	1,89	1,81
Коэффициент асимметрии A_s / Asymmetry coefficient A_s	-0,74	-1,17	-2,16	-1,13	-1,47	-0,70
Коэффициент эксцесса E_s / Kurtosis coefficient E_s	-1,88	-1,20	-0,19	-0,19	-0,01	-1,51
Среднее квадратическое значение S^2 , ч/отказ / Root mean square S^2 , h/refusal	20,87	24,66	42,62	47,87	64,19	69,06
Среднее гармоническое значение S_R , ч/отказ / Harmonic mean value S_R , h/refusal	19,77	22,69	35,53	44,56	61,49	65,10
Среднее линейное отклонение выборки $S_{\text{лин}}$, ч/отказ / Sample linear deviation $S_{\text{лин}}$, h/refusal	4,83	5,52	8,80	8,03	7,29	10,42
Коэффициент вариации по среднему линейному отклонению $v_{\text{лин}}$, % / Coefficient of variation for the mean linear deviation $v_{\text{лин}}$, %	23,94	23,16	21,44	17,35	11,44	15,31
Размах вариации R , ч/отказ / Swipe variation R , h/refusal	9,00	14,00	18,00	22,00	21,00	24,00
Максимальный элемент выборки B , ч/отказ / Maximum sample unit B , h/refusal	24,00	32,00	54,00	56,00	72,00	82,00
Минимальный элемент выборки C , ч/отказ / Minimum sample unit C , h/refusal	15,00	18,00	36,00	34,00	51,00	60,00

Для исследования напряженно-деформированного состояния вала шнека жатки была создана геометрическая модель в программе «КОМПАС-3D» (рис. 6).



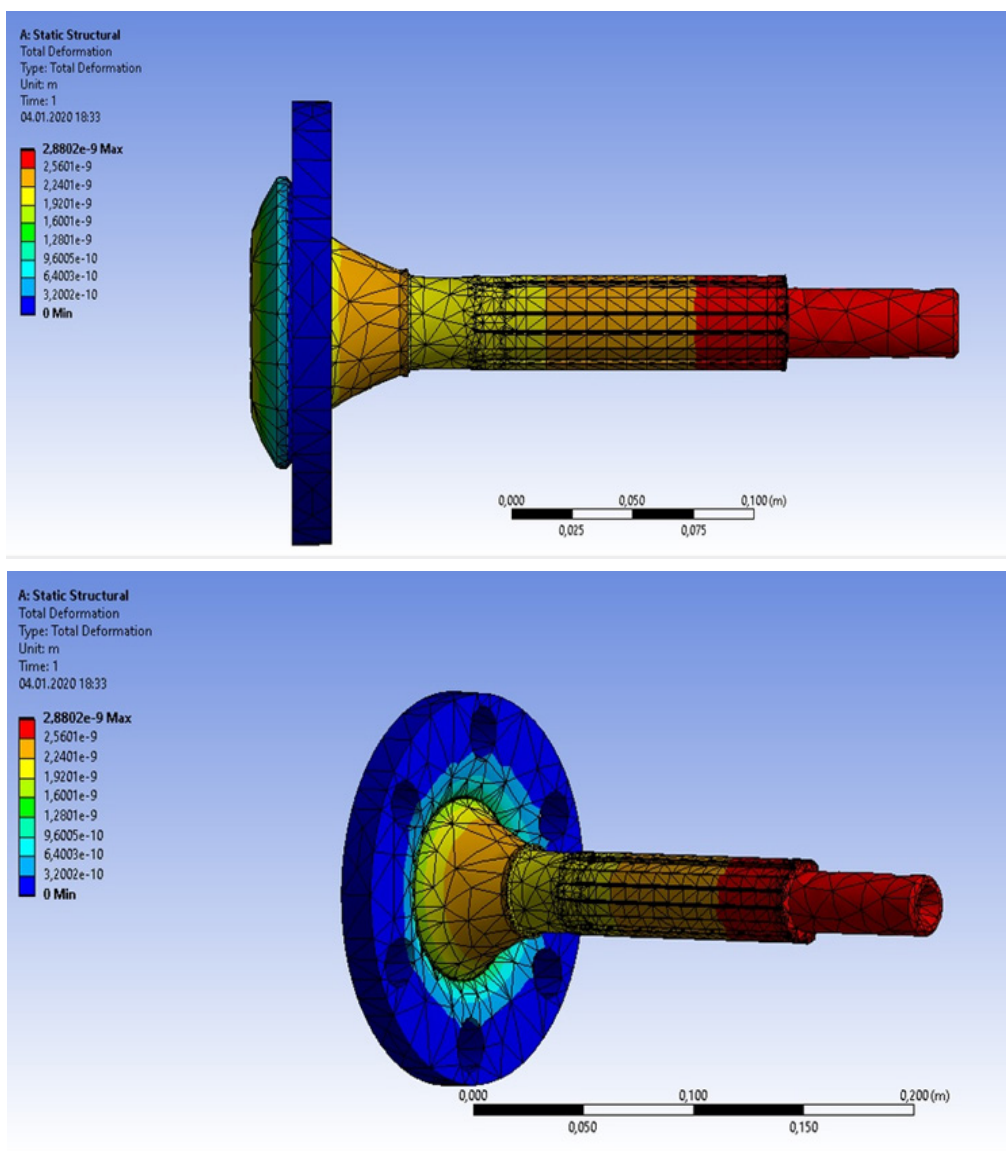
Р и с. 6. Геометрическая модель вала шнека жатки

F i g. 6. Geometric model of the header auger shaft

Technologies and means of maintenance in agriculture

Данная модель была объединена и использована в блоке программ конечно-элементного анализа ANSYS 14.5. Численная процедура статического анализа проводилась в рамках пакета ANSYS WorkBench. Для расчета напряженно-деформированного состояния вала шнека жатки Power Stream 700 под действием статических нагрузок использовался модуль Static Structural (рис. 7).

На данном этапе расчета были определены механические свойства материала Structural steel (для металлопродукции (круг, материал – сталь 40X), термически обработанной (закалка с отпуском), предел текучести $\sigma_T = 785 \text{ Н/мм}^2$, ударная вязкость KCV^{+20}



Р и с. 7. Распределение напряжений и деформаций в сечениях вала шнека жатки
F i g. 7. Distribution of stresses and deformations in the sections of the header auger shaft

не менее 111 Дж/см², КСV⁻²⁰ не менее 68 Дж/см², КСУ⁻⁷⁰ не менее 49 Дж/см²), рабочая нагрузка ($M_{Kpmax} = 660 \text{ Н} \cdot \text{м}$), основные параметры детали (масса 3,5 кг,

длина 240 мм, диаметр первой ступени 20 мм, диаметр шлицевой части 35 мм), граничные и начальные условия задачи и требуемая точность расчета⁷.

⁷ ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. М., 2019. 53 с.; Жатка РСМ-081.27. Руководство [Электронный ресурс]. URL: https://zinref.ru/000_uchebniki/04800selskoe_kombaini/003_20_00_zhatka_RSM-081_27_manual_zapchasti/000.htm (дата обращения: 16.02.2021).

С помощью модулей Meshing и ICEM CFD генерировалась сетка конечных элементов. Она представляет собой по большей части гексаэдр. Там, где гексаэдр построить невозможно, были использованы тетраэдры. Сетка имеет два характерных параметра – наибольший и наименьший размеры элементов. В данном случае они равны 0,001 и 0,0006 м соответственно. Сетка конечных элементов состояла из 76 191 компонента. В ходе проведения серии вариативных расчетов исследовано распределение прочностных нагрузок в целевой зоне [26; 27].

В результате расчета в программе ANSYS 14.5 были получены распределения напряжений и деформаций вала шнека жатки, выявлены участки, подвергающиеся максимальной прочностной нагрузке. На рисунке 7 красным цветом показана область максимальной деформации ($2,8802 \times 10^{-9}$ м). В этих местах в период гарантийной эксплуатации комбайнов происходило разрушение вала шнека жатки Power Stream 700 (рис. 4е, 4ф).

Обсуждение и заключение

Проведенные трехлетние исследования на предприятиях сельхозпроизводителей Приволжского федерального округа позволили выявить детали и агрегаты, оказывающие наибольшее влияние на надежность и качество работы комбайнов в гарантийный период. При этом были выявлены детали и узлы, выходящие из строя в результате конструктивно-технологических недоработок заводов-изготовителей.

Большая доля отказов комбайнов приходится на агрегаты российского производства – 59,2 %; на зарубежные – 40,8 %. При этом отказы третьей категории тяжести составляют 17,2 (18,5) % от общего количества отказов.

Большинство отказов комбайнов связано с эксплуатационными причинами – 57,0 (55,9) %. Признак проявления отказов комбайнов носит в основном внезапный характер – 84,9 (87,0) %. При этом примерно две трети от общего количества отказов комбайнов являются независимыми – 62,4 (67,0) %.

По результатам статистической обработки отказов, с учетом категорий тяжести, получены значения среднего времени устранения последствий отказов комбайнов: $t_{\text{срI}} = 20,17$ (23,83) ч, $t_{\text{срII}} = 41,04$ (46,29) ч, $t_{\text{срIII}} = 63,70$ (68,05) ч. Значительная продолжительность устранения отказов всех категорий тяжести свидетельствует о низком уровне организации технического сервиса комбайнов и отсутствии развитой сети современных сервисных предприятий.

Большое количество отказов (27 % от общего числа отказов комбайнов российского производства) по причине излома вала шнека жатки РСМ-081.27 (Power Stream 700) требует проведения срочных конструктивно-технологических мероприятий (по совершенствованию устройства регулировки муфты шнека, по изменению размеров вала в опасных сечениях, по замене конструкционного материала или совершенствованию технологии изготовления вала) на заводе-изготовителе.

Поэтому в дальнейшем необходимо рассмотреть вопросы оптимального размещения сети предприятий по оказанию широкой номенклатуры сервисных услуг в Приволжском федеральном округе, совершенствования организации технического сервиса и расширения прямых связей с заводами-изготовителями техники с целью быстрого реагирования и принятия конструктивно-технологических решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Шепелёв, С. Д.** Обоснование времени простоя для устранения последствий технического отказа / С. Д. Шепелёв, Ю. Б. Черкасов, В. Д. Шепелёв // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 5. – С. 45–51. – URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2017_5/content/8.pdf (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
2. Analysis and Forecast of Performance Characteristics of Combine Harvesters / V. Zubko, H. Roubik, O. Zamora, T. Khvorost. – DOI 10.15159/AR.18.212 // Agronomy Research. – 2018. – Vol. 16, Issue 5. – Pp. 2282–2302. – URL: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4538> (дата обращения: 14.02.2021).
3. **Королев, А. Е.** Сравнительная безотказность зерноуборочных комбайнов / А. Е. Королев // NovaUm.Ru. – 2019. – № 17. – С. 26–28. – URL: <http://novaum.ru/wp-content/uploads/2019/03/Выпуск-17.pdf> (дата обращения: 14.02.2021).
4. **Смелик, В. А.** Оценки технической и технологической надежности зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов / В. А. Смелик, Ф. А. Киприянов, А. Н. Водолазко // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – Вып. 41, № 1. – С. 49–55. – URL: <https://maaurus.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-41-tom-1.pdf> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
5. **Беломестных, В. А.** Надежность зерноуборочных комбайнов ACROS-580 при эксплуатации в условиях Иркутской области / В. А. Беломестных, В. М. Перевалов, Л. В. Лосев // Вестник ИрГСХА. – 2017. – № 79. – С. 139–144. – URL: <http://www.igsha.ru/science/files/v79.pdf> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
6. **Беломестных, В. А.** Оценка надежности элементов зерноуборочного комбайна «Вектор 410» при эксплуатации в гарантийный период / В. А. Беломестных, П. И. Ильин, Д. М. Рожков // Вестник ИрГСХА. – 2017. – № 80. – С. 61–68. – URL: <http://vestnik.irsau.ru/files/v80.pdf> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
7. Исследование возникающих отказов между основными системами зерноуборочных комбайнов и времени их устранения / А. Т. Лебедев, Р. В. Павлюк, А. В. Захарин, П. А. Лебедев // Технический сервис машин. – 2019. – № 3. – С. 33–39. – URL: <http://vimtsm.ru/?p=234> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
8. **Крюкова, Н. С.** Оценка надежности систем зерноуборочных комбайнов / Н. С. Крюкова, В. Н. Острцов. – DOI 10.34286/1995-4646-2020-70-1-22-28 // Международный технико-экономический журнал. – 2020. – № 1. – С. 22–28. – URL: <http://www.tite-journal.com/content/2020/vypusk-no1/#c12436> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
9. **Субочев, С. В.** Влияние основных показателей надежности на эффективность зерноуборочных комбайнов / С. В. Субочев, А. Е. Немцев, И. В. Коптева // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2014. – Т. 2, № 31. – С. 157–164. – URL: <https://vestngau.elpub.ru/jour/article/view/245/62#> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
10. **Ерохин, Г. Н.** О надежности работы современных зерноуборочных комбайнов / Г. Н. Ерохин, С. Н. Сазонов, В. В. Коновский // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2013. – № 6. – С. 59–63. – URL: http://www.mgau.ru/science/journal/PDF_files/6-2013.pdf (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
11. **Шепелёв, С. Д.** Влияние срока службы и сезонной наработки на показатели эксплуатационной надежности зерноуборочных комбайнов / С. Д. Шепелёв, А. М. Плаксин, Ю. Б. Черкасов // АПК России. – 2016. – Т. 75, № 1. – С. 122–126. – URL: <https://rusapk.sursau.ru/upload/iblock/dc9/apk-75.pdf> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
12. **Комаров, В. А.** Исследование процесса постановки на хранение комбайновой и самоходной техники в региональном агропромышленном комплексе / В. А. Комаров, Е. А. Нуянзин, М. И. Курашкин. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-5-32-36 // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 5. – С. 32–36. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-263-6> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
13. **Комаров, В. А.** Хранение сложной сельскохозяйственной техники в Мордовии / В. А. Комаров, Е. А. Нуянзин, М. И. Курашкин // Сельский механизатор. – 2019. – № 9. – С. 38–40. – URL: <http://selmech.msk.ru/919.html> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.



14. **Комаров, В. А.** Исследование отказов комбайнов «ACROS-595» в гарантийный период / В. А. Комаров, М. И. Курашкин // Сельский механизатор. – 2018. – № 6. – С. 38–39. – URL: <http://selmech.msk.ru/618.html> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
15. **Комаров, В. А.** Исследование предприятий технического сервиса для обеспечения показателей надежности машин (на примере агропромышленного комплекса Республики Мордовия) / В. А. Комаров. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201802.222-238 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 222–238. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/60-18-2/405-10-15507-0236-2910-028-201802-7> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
16. **Комаров, В. А.** Исследование генеральных планов предприятий технического сервиса в агропромышленном комплексе / В. А. Комаров, В. В. Салмин, М. И. Курашкин. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201904.560-577 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 560–577. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/86-19-4/739-10-15507-0236-2910-029-201904-6> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
17. **Shepelev, S.** Differentiation of the Seasonal Loading of Combine Harvester Depending on Its Technical Readiness / S. Shepelev, V. Shepelev, Yu. Cherkasov. – DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.026 // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 161–165. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039107#aep-article-footnote-id2> (дата обращения: 14.02.2021).
18. **Pristavka, M.** Reliability Monitoring of Grain Harvester / M. Pristavka, K. Kristof, P. Findura // Agronomy Research. – 2017. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 817–829. – URL: https://www.researchgate.net/profile/Koloman_Kristof/publication/317304867_Reliability_monitoring_of_grain_harvester/links/593138640f7e9bee76dec1c/Reliability-monitoring-of-grain-harvester.pdf (дата обращения: 16.02.2021).
19. **Егоров, А. В.** Оценка показателей надежности силовой передачи зерноуборочного комбайна John Deere 9600 / А. В. Егоров, Е. В. Зубова, В. В. Вахрушев // АПК России. – 2015. – Т. 73. – С. 41–48. – URL: <https://rusapk.sursau.ru/upload/iblock/87c/apk-73.pdf> (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.
20. **Крупин, А. Е.** Расчет показателей надежности зерноуборочных комбайнов ДОН-1500Б / А. Е. Крупин, Е. А. Лисунов, А. А. Калашов // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 2 (81). – С. 42–53. – URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1601 (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.
21. **Чепурин, Г. Е.** Принцип идентичности условий при зональных испытаниях зерноуборочных комбайнов / Г. Е. Чепурин. – DOI 10.26898/0370-8799-2020-3-9 // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2020. – Т. 50, № 3. – С. 83–93. – URL: <https://sibvest.elpub.ru/jour/article/view/687> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
22. **Ломакин, С. Г.** Анализ технического уровня зерноуборочных комбайнов «Ростсельмаш» / С. Г. Ломакин, В. Е. Бердышев // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2017. – № 6 (82). – С. 34–42. – URL: <https://clck.ru/UajXC> (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.
23. **Шепелев, С. Д.** Коэффициент простоя зерноуборочных комбайнов как комплексный показатель технических отказов / С. Д. Шепелев, Ю. Б. Черкасов // Аграрный вестник Урала. – 2017. – № 7. – С. 52–57. – URL: <http://avu.usaca.ru/media/BAhbBlsHOGZmSSIoMjAxNy8xMS8xNS8xNF8zMF81Ni83MDJfXj19fMjAxNy5wZGYGOgZFVA> (дата обращения: 14.02.2021). – Рез. англ.
24. The Reliability Analysis of Combined Harvesters in the Usual Conditions of Operation / R. V. Pavlyuk, A. T. Lebedev, Y. I. Zhevora, E. V. Zubenko. – DOI 10.1088/1755-1315/488/1/012033. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 488. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/488/1/012033> (дата обращения: 14.02.2021).
25. The Experimental Research of Combine Harvesters / L. Špokas, V. Adamčuk, V. Bulgakov, L. Nozdrovický. – DOI 10.17221/16/2015-RAE // Research in Agricultural Engineering. – 2016. – Vol. 62, Issue 3. – Pp. 106–112. – URL: <https://www.agriculturejournals.cz/web/rae.htm?volume=62&firstPage=106&type=publishedArticle> (дата обращения: 16.02.2021).
26. **Ткачев, Д. А.** Импорт твердотельной модели из CAD-системы КОМПАС-3D в САЕ-систему ANSYS / Д. А. Ткачев, К. Ю. Труханов, М. И. Шаталов. – Текст : электронный // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2017. – № 4. – URL: <http://nto-journal.ru/search/keywords/1392/> (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.

27. Аббасов, А. Э. Конвертирование трехмерных компьютерных геометрических моделей для оптимизации параметров моделируемых устройств / А. Э. Аббасов. – DOI [10.20537/2076-7633-2015-7-1-81-91](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-81-91) // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 81–91. – URL: <http://crm.ics.ru/journal/article/2231/> (дата обращения: 16.02.2021). – Рез. англ.

Поступила 02.03.2021; одобрена после рецензирования 01.04.2021; принята к публикации 12.04.2021

Об авторах:

Комаров Владимир Александрович, профессор кафедры технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), доктор технических наук, Researcher ID: G-8673-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1910-2923>, komarov.v.a2010@mail.ru

Курашкин Михаил Иванович, аспирант кафедры технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), Researcher ID: B-1295-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081>, mishakurashkin@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Комаров – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ.

М. И. Курашкин – подготовка начального варианта статьи, проведение мониторинга надежности зерноуборочных комбайнов, обработка результатов исследований, визуализация.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shepelyov S.D., Cherkasov Yu.B., Shepelyov V.D. The Justification of Idle Time for Elimination of Consequences of Combine Harvesters Technical Failure. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of KrasGAU. 2017; (5):45-51. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2017_5/content/8.pdf (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Zubko V., Roubik H., Zamora O., Khvorost T. Analysis and Forecast of Performance Characteristics of Combine Harvesters. *Agronomy Research*. 2018; 16(5):2282-2302. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.18.212>
3. Korolev A.Ye. [Comparative Reliability of Grain Harvesters]. *NovaUm.Ru*. 2019; (17):26-28. Available at: <http://novaum.ru/wp-content/uploads/2019/03/Выпуск-17.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ.)
4. Smilik V.A., Kipriyanov F.A., Vodolasko A.N. Assessments of Technical and Technological Reliability of Combine Harvesters and Self-Propelled Foragers. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya* = News of the International Academy of Public Education. 2018; 41(1):49-55. Available at: <https://maaurus.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-41-tom-1.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Belomestnykh V.A., Perevalov V.M., Losev L.V. Reliability of Grain Combine Harvesters ACROS 580 at Operation under the Conditions of Irkutsk Region. *Vestnik IrGSHA*. 2017; (79):139-144. Available at: <http://www.igsha.ru/science/files/v79.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Belomestnykh V.A., Ilyin P.I., Rozhkov D.M. Assessment of the Reliability of Grain Corner Elements Combine “Vector 410” at Operation in the Garntian Period. *Vestnik IrGSHA*. 2017; (80):61-68. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v80.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Lebedev A.T., Pavlyuk R.V., Zakharin A.V., Lebedev P.A. Research of the Emerging Failures and the Time of Their Elimination Between the Main Systems of Grain Harvesting Combines. *Tekhnicheskiiy*

servis mashin = Technical Service of Machines. 2019; (3):33-39. Available at: <http://vimtsm.ru/?p=234> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

8. Kryukova N.S., Ostretsov V.N. Grain Combine Reliability Assessment Systems. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskij zhurnal* = The International Technical-Economic Journal. 2020; (1):22-28. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2020-70-1-22-28>

9. Subochev S.V., Nemtsev A.Ye., Kopteva I.V. The Influence of Basic Indexes of Reliability on the Efficiency of Grain Harvesters. *Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet)* = Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2014; 2(31):157-164. Available at: <https://vestngau.elpub.ru/jour/article/view/245/62#> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

10. Erokhin G.N., Sazonov S.N., Konovsky V.V. On the Reliability of Modern Combine Harvester. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Michurin State Agrarian University Bulletin. 2013; (6):59-63. Available at: http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/6-2013.pdf (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

11. Shepelev S.D., Plaksin A.M., Cherkasov Yu.B. Service Life and Seasonal Loading Influencing the Indicators of Operational Reliability of Combine Harvesters. *APK Rossii* = Agro-Industrial Complex of Russia. 2016; 75(1):122-126. Available at: <https://rusapk.sursau.ru/upload/iblock/dc9/apk-75.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

12. Komarov V.A., Nuyanzin E.A., Kurashkin M.I. Study of the Process of Putting into Storage of Combine and Self-Propelled Machinery in the Regional Agribusiness. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2019; (5):32-36. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-5-32-36>

13. Komarov V.A., Nuyanzin Ye.A., Kurashkin M.I. Storage of Complex Agricultural Machinery in Mordovia. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2019; (9):38-40. Available at: <http://selmech.msk.ru/919.html> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

14. Komarov V.A., Kurashkin M.I. [Study of Failures of Acros-595 Harvesters during the Warranty Period]. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2018; (6):38-39. Available at: <http://selmech.msk.ru/618.html> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

15. Komarov V.A. Research of Technical Service Enterprises for Promoting Equipment Reliability (Case Study of Agro-Industrial Complex of the Republic of Mordovia). *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):222-238. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.222-238>

16. Komarov V.A., Salmin V.V., Kurashkin M.I. Study of Master Plans of Technical Service Enterprises in Agricultural Sector. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):560-577. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.560-577>

17. Shepelev S., Shepelev V., Cherkasov Yu. Differentiation of the Seasonal Loading of Combine Harvester Depending on Its Technical Readiness. *Procedia Engineering*. 2015; 129:161-165. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.026>

18. Pristavka M., Kristof K., Findura P. Reliability Monitoring of Grain Harvester. *Agronomy Research*. 2017; 15(3):817-829. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Koloman_Kristof/publication/317304867_Reliability_monitoring_of_grain_harvester/links/593138640f7e9beec76dec1c/Reliability-monitoring-of-grain-harvester.pdf (accessed 16.02.2021). (In Eng.)

19. Egorov A.V., Zubova E.V., Vakhrushev V.V. Assessing the Power Transmission Reliability Indicators of a John Deere 9600 Combine Harvester. *APK Rossii* = Agro-Industrial Complex of Russia. 2015; 73:41-48. Available at: <https://rusapk.sursau.ru/upload/iblock/87c/apk-73.pdf> (accessed 16.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

20. Krupin A.Ye., Lisunov Ye.A., Kalashov A.A. The Reliability Analysis of Combine Harvester Don-1500 B. *Vestnik NGIEI* = Bulletin NGIEI. 2018; (2):42-53. Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1601 (accessed 16.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

21. Chepurin G.E. The Principle of Identity of Conditions for Zonal Tests of Grain Harvesters. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2020; 50(3):83-93. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-3-9> (accessed 14.02.2021).

22. Lomakin S.G., Berdyshev V.Ye. Assessing Technical Performance Level of Russian “Rostselmash” Combines. *Vestnik FGOU VPO “Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina”* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2017; (6):34-42. Available at: <https://clck.ru/UAJXC> (accessed 16.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Shepelev S.D., Cherkasov Yu.B. Idle Time Coefficient of Grain Collectors as an Integrated Indicator of Technical Failure. *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Ural. 2017; (7):52-57. Available at: <http://avu.usaca.ru/media/BAhbBlSHOGZmSSIoMjAxNy8xMS8xNS8xNF8zMF81NI83MDJfX19fMjAxNy5wZGYGOgZFVA> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Pavlyuk R.V., Lebedev A.T., Zhevora Y.I., Zubenko E.V. The Reliability Analysis of Combined Harvesters in the Usual Conditions of Operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 488. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012033>
25. Špokas L., Adamčuk V., Bulgakov V., Nozdrovický L. The Experimental Research of Combine Harvesters. *Research in Agricultural Engineering*. 2016; 62(3):106-112. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/16/2015-RAE>
26. Tkachev D.A., Trukhanov K.Yu., Shatalov M.I. Import of a Solid Model from the Compas-3D CAD-System to an ANSYS CAE-System. *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovanie* = Electronic Journal: Science, Technology, and Education. 2017; (4). Available at: <http://nto-journal.ru/search/keywords/1392/> (accessed 16.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
27. Abbasov A.E. Converting Three-Dimensional Computer Geometric Models for Optimization of Simulated Devices’ Parameters. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* = Computer Research and Modeling. 2015; 7(2):81-91. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-81-91>

Received 02.03.2021; approved after reviewing 01.04.2021; accepted for publication 12.04.2021

About the authors:

Vladimir A. Komarov, Professor of the Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [G-8673-2018](https://orcid.org/0000-0003-1910-2923), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1910-2923>, komarov.v.a2010@mail.ru

Mihail I. Kurashkin, Postgraduate Student of the Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Researcher ID: [B-1295-2019](https://orcid.org/0000-0003-3473-8081), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081>, mishakurashkin@gmail.com

Contribution of the authors:

V. A. Komarov – scientific guidance, formulating the main directions of the study, developing the theoretical background, finalizing the text, drawing general conclusions and literary analysis.

M. I. Kurashkin – preparing the initial version of the article, monitoring the reliability of combine harvesters, processing the study results, visualization.

All authors have read and approved the final manuscript.



Оценка технического состояния электроуправляемых форсунок дизелей по характеристике топливоподачи

И. И. Габитов¹, А. В. Неговора¹, Ф. Р. Сафин¹,
Р. Ж. Магафуров¹, Н. В. Раков^{2*}

¹ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Российская Федерация)

*nikolaymgu@yandex.ru

Введение. В настоящее время на станциях техобслуживания и ремонтных предприятиях отсутствуют доступные для широкого использования технологии и оборудование для точной оценки технического состояния форсунок аккумуляторных топливоподающих систем типа Common Rail. Реализованные на практике методы в основном дают обобщенную оценку работоспособности форсунки без выявления конкретного дефекта, что влечет за собой необоснованную замену еще работоспособных деталей электроуправляемых форсунок. Целью данной статьи является знакомство широкого круга специалистов с новым безмензурочным методом испытания форсунок с электронным управлением на основе оценки характеристик топливоподачи. Он позволяет выявить конкретные неисправности форсунок при безразборном диагностировании.

Материалы и методы. Работа основана на системном анализе заводских методик испытания форсунок, обзоре современных научных публикаций, использовании компьютерного моделирования в специализированных программах, а также экспериментальной проверке полученных результатов.

Результаты исследования. Предложенная авторами методика диагностирования дизельных форсунок с возможностью оценки технического состояния каждого элемента по топливоподаче позволяет существенно повысить информативность протокола проверки и на 24 % снизить трудоемкость ремонта электроуправляемых форсунок.

Обсуждение и заключение. Итогом исследования являются разработанные и апробированные авторами измерительный модуль и методика испытания форсунок дизелей с возможностью оценки технического состояния деталей, что позволяет выявить и устранить конкретные неисправности форсунок без разборки и избежать необоснованной замены исправных элементов при ремонте. Результаты исследования внедрены в центре по ремонту топливной аппаратуры Bosch Diesel Service ООО «Башдизель».

Ключевые слова: характеристика топливоподачи, ремонт форсунок, измерительный модуль, Common Rail, электронное управление

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка технического состояния электроуправляемых форсунок дизелей по характеристике топливоподачи / И. И. Габитов, А. В. Неговора, Ф. Р. Сафин [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.207-226](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.207-226) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 207–226.

Original article

Assessment of the Technical Condition of Electric-Controlled Diesel Injectors According to the Fuel Supply Characteristics

I. I. Gabitov^a, A. V. Negovora^a, F. R. Safin^a, R. Zh. Magafurov^a,
N. V. Rakov^{b*}

^a*Bashkir State Agrarian University (Ufa, Russian Federation)*

^b*National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)*

**nikolaymgu@yandex.ru*

Introduction. Currently, there are no widely available technologies and equipment available at service stations and repair facilities to accurately assess the technical condition of Common Rail battery fuel supply system injectors. The methods implemented in practice mainly give a generalized assessment of the nozzle performance without identifying a specific defect, which entails an unjustified replacement of still working parts of electrically controlled injectors. The purpose of this article is to familiarize a wide range of specialists with a new non-slip test method for injectors with electronic control based on the evaluation of their fuel supply characteristics, which allows identifying specific malfunctions of the nozzle during the procedure of diagnostic without disassembling.

Materials and Methods. The study is based on a systematic analysis of the factory methods for testing injectors, a review of modern scientific publications, the use of computer simulation in specialized programs, and experimental testing of the obtained results.

Results. A method for testing and evaluating the technical condition of diesel injectors based on the fuel supply characteristics has been developed and tested that can significantly increase the information content of the diagnostic and reduce the overall labor intensity of repairing electronically controlled injectors by 24%.

Discussion and Conclusion. The authors have developed and tested a measurement module and a test procedure for diesel injectors with the ability to assess the technical condition of their parts, which allows identifying and eliminating specific malfunctions of injectors without disassembling them and avoid unjustified replacement of serviceable elements during repair. The results of the study have been implemented in the Bosch Diesel Service fuel equipment repair center of Bashdiesel LLC.

Keywords: fuel supply characteristics, injector repair, measuring module, Common Rail, electronic control

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

For citation: Gabitov I.I., Negovora A.V., Safin F.R., et al. Assessment of the Technical Condition of Electric-Controlled Diesel Injectors According to the Fuel Supply Characteristics. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):207-226. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.207-226>

Введение

Выполнение современных требований к технико-экономическим и экологическим показателям дизельных

двигателей невозможно обеспечить без электронного управления процессом топливоподачи. Изменение технического состояния любого элемента форсунки

приводит к ухудшению экологических и эксплуатационных показателей двигателя, поэтому все форсунки должны проходить регулярное тестирование в рамках планового техобслуживания. Конструкция электроуправляемых форсунок постоянно совершенствуется, соответственно, меняются методы и оборудование для их диагностирования и регулировки. Даже специализированные центры по ремонту топливной аппаратуры не владеют в полном объеме технологиями ремонта форсунок типа Common Rail вследствие отсутствия технической информации от заводов-производителей. Производители оборудования для диагностики и ремонта в настоящее время не предлагают методики и устройства для документального подтверждения соответствия отремонтированных форсунок заводским требованиям в условиях производства, например, путем фиксации и оценки характеристики топливоподачи, которая является наиболее информативным показателем качества работы форсунок дизелей с электронным управлением.

Отдельные образцы научно-исследовательских стендов фиксируют характеристики топливоподачи или измеряют цикловые подачи в достаточно узком диапазоне и требуют тщательной настройки и высокой квалификации персонала, что возможно только в исследовательских центрах. Концепция научного развития агропромышленного комплекса Российской Федерации до 2025 года утверждает необходимость «разработать технологии эффективного использования техники в отрасли»¹. В связи с этим исследования, направленные на совершенствование средств и способов контроля технического состояния электроуправляемых форсунок

дизелей, повышение точности диагностики и снижение трудоемкости ремонта, в настоящее время являются весьма актуальными и востребованными. Цель исследования – описание нового безмензурочного метода испытания форсунок с электронным управлением на основе оценки топливоподачи. Он позволяет выявить конкретные неисправности форсунок при безразборном диагностировании.

Обзор литературы

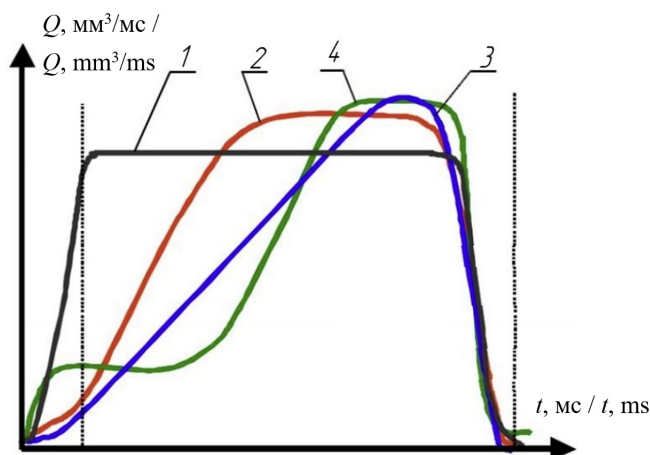
Авторами выполнен анализ работ, в ходе которого установлено, что на фоне изучения отдельных вопросов технического сервиса топливной аппаратуры в исследованиях отсутствуют доступные для широкого использования средства и технологии точной оценки технического состояния. Разработки в основном носят общий характер и не затрагивают вопросы технического сервиса конкретных агрегатов, в частности электроуправляемых форсунок.

В автотракторных дизельных двигателях используются разнообразные законы топливоподачи: треугольный, прямоугольный, трапециевидный, двухступенчатое или пятиступенчатое впрыскивание за цикл, при этом каждый впрыск имеет свою функцию (рис. 1). Характеристика выбирается в связи с условиями работы дизельного двигателя и режимом его эксплуатации.

Серийно выпускаемые топливоподающие системы с электронным управлением рассчитаны на гибкое управление характеристикой топливоподачи. В таблице 1 рассмотрены топливоподающие системы, в которых применяется регулирование давления при впрыскивании².

¹ О Концепции развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года [Электронный ресурс] // Утв. приказом Минсельхоза России от 25 июня 2007 года № 342. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902099525> (дата обращения: 18.02.2021).

² Магафуров Р. Ж. Разработка методики испытания форсунок автотракторных дизелей с электронным управлением: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2020. 163 с.



Р и с. 1. Разновидности характеристик основного впрыска: 1 – прямоугольная форма; 2 – форма с крутым передним фронтом; 3 – форма с пологим передним фронтом; 4 – ступенчатая форма

F i g. 1. Types of characteristics of the main injection: 1 – rectangular shape; 2 – shape with a steep front; 3 – shape with a flat front; 4 – step shape

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Электроуправляемые топливоподающие системы с регулированием давления впрыскивания
Electrically controlled fuel supply systems with injection pressure regulation

Параметр / Parameter	Тип системы питания / Type of power system					
	UIS, UPS	Common Rail	Common Rail с двумя рампами / Common Rail with two ramps	AVL	Bosch APCRS	ITV Twin-CR
Характеристика топливоподдачи / Characteristics of fuel supply	Изменение переднего фронта / Changing the leading edge	Прямоугольная / Rectangular	Прямоугольная, изменение переднего фронта, ступенчатая / Rectangular, frontal change, stepped			
Максимальное давление впрыска, МПа / Maximum injection pressure, MPa	210	165	180	135	250	180
Максимальная скорость нарастания давления, МПа/мс / Maximum pressure rise rate, MPa/ms	50	–	80	140	80	150
Гибкость / Flexibility	Низкая / Low	Средняя / Medium	Высокая / High		Очень высокая / Very high	

Как видно из таблицы 1, современные электроуправляемые топливopодающие системы развиваются в сторону управления величиной цикловой подачи не только за счет продолжительности впрыска, но и путем корректировки характеристик топливopодачи. Отсюда следует, что для полного диагностирования и испытания форсунок с электронным управлением необходимо фиксировать и анализировать характеристики топливopодачи при разных режимах работы [1–4].

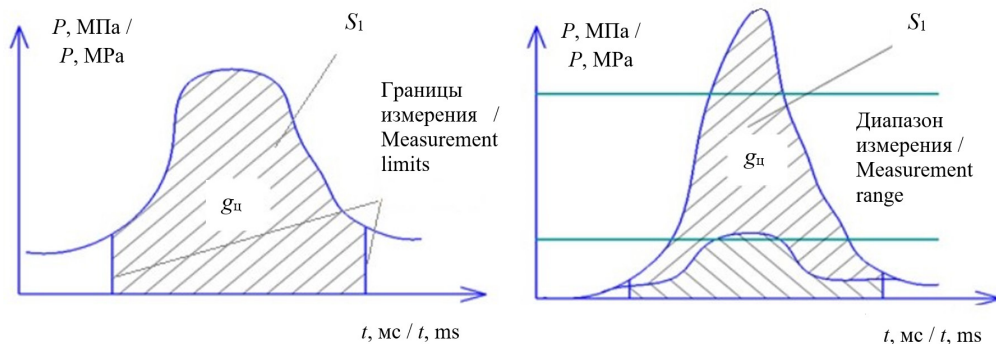
Изучение опубликованных работ и соответствующих патентов Р. М. Баширова, Л. В. Грехова, С. Н. Девянина, С. Н. Кривцова, В. А. Маркова, Б. Н. Файнлейба и др. позволило выявить наиболее эффективные способы испытания форсунок с электронным управлением [5–9]. Проанализированы промышленные методы и средства фиксации характеристики топливopодачи, использующиеся фирмами Robert Bosch GmbH, Hartridge, Moehwald GmbH, IAV GmbH, EFS, Loccioni Group, Ono Sokki [10–13]. Способ впрыска топлива в длинный трубопровод является наиболее перспективным для разработки измерительного модуля и для фиксации характеристики топливopодачи [14]. Метод предложен

фирмой Bosch и применяется в ряде исследований. Цикловой подачей здесь является площадь под кривой давления в адаптере впрыска. Основные недостатки – размытые границы начала и конца рабочего цикла и узкий диапазон давления (рис. 2). Это существенно ограничивает пределы подачи топлива [15].

Анализ научно-исследовательских работ позволил объединить актуальные вопросы технического сервиса топливной аппаратуры. В основе новой методики испытания форсунок с электронным управлением лежат расширение диапазона, повышение точности измеряемых цикловых подач и информативности диагноза.

Материалы и методы

Для реализации предложенной методики был проведен патентный поиск с всесторонним анализом преимуществ и недостатков подходящих устройств [16–20]. На этой основе разработан измерительный модуль с возможностью автоматической фиксации характеристики впрыскивания и оценки величины цикловых подач топлива (рис. 3). При работе топливо впрыскивается форсункой в длинный трубопровод, сглаживающий отраженные от препятствий волны давления.



Р и с. 2. Границы измерения цикловой подачи по характеристике впрыска и диапазон давлений, фиксируемых датчиком давления

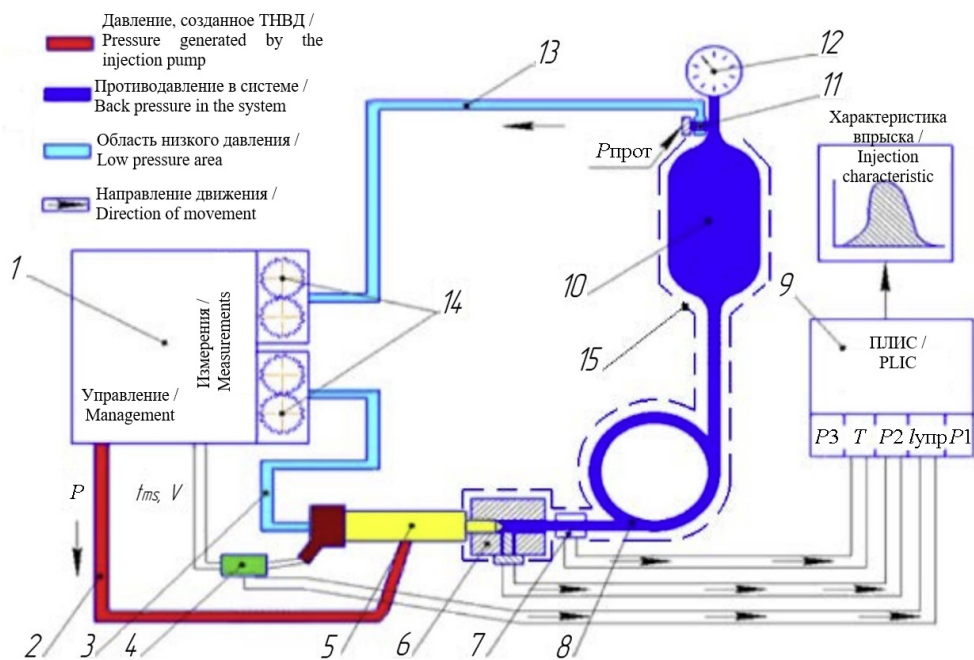
F i g. 2. The measurement limits of the cyclic supply according to the injection characteristic and the range of pressures recorded by the pressure sensor

Мгновенное изменение давления топлива регистрируется датчиком непосредственно около форсунки и преобразуется в программируемой логической интегральной схеме в характеристику топливоподачи.

Точность измерения величины цикловых подач, как и возможность фиксации характеристики топливоподачи измерительным модулем, определяется диапазоном давления тестовой жидкости, регистрируемого датчиком в адаптере впрыска. Данный диапазон можно корректировать, воздействуя на температуру тестовой жидкости и остаточное давление в трубопроводе в процессе испытания форсунки,

и таким образом расширить диапазон цикловых подач [21].

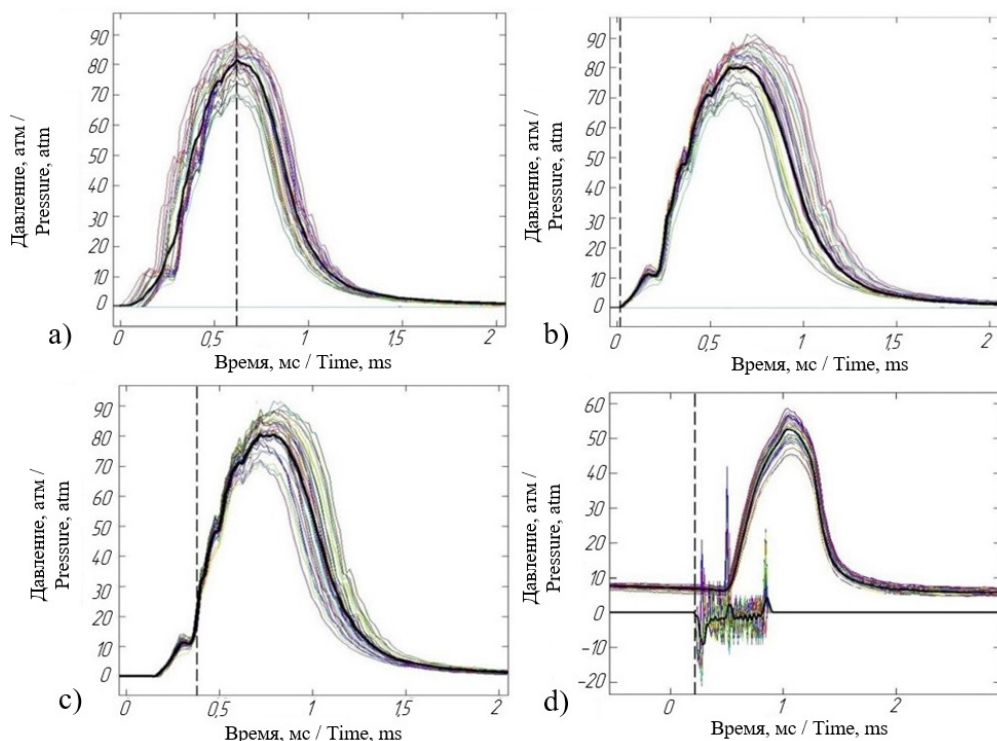
Регистрация сигналов с датчиков измерительного модуля позволяет автоматизировать фиксацию характеристик последовательных впрысков с возможностью их осреднения в LabVIEW. Для этого авторами разработан алгоритм и оригинальный продукт «Программа для обработки полученных данных с устройства для определения характеристики впрыскивания дизельных форсунок»³. В основе программы лежит новый алгоритм усреднения последовательно записанных характеристик топливоподачи, полученный путем исследования различных способов их наложения (рис. 4).



Р и с. 3. Функциональная схема измерительного модуля: 1 – блок управления; 2, 3, 8, 13 – топливопроводы; 4 – датчик тока сигнала управления; 5 – форсунка; 6 – адаптер впрыска с датчиком давления; 7 – термодатчик; 9 – программируемая логическая интегральная схема; 10 – ресивер; 11 – устройство регулировки давления; 12 – манометр; 14 – расходмеры

F i g. 3. Functional diagram of the measuring module: 1 – control unit; 2, 3, 8, 13 – fuel lines; 4 – current sensor of the control signal; 5 – nozzle; 6 – injection adapter with pressure sensor; 7 – thermal sensor; 9 – programmable logic integrated circuit; 10 – receiver; 11 – pressure adjustment device; 12 – pressure gauge; 14 – flow meters

³ Там же.



Р и с. 4. Усредненные характеристики топливоподачи (жирная линия), полученные по точкам: а) максимального давления впрыска; б) начала нарастания давления впрыска; в) перегиба переднего фронта характеристики; д) начала подачи управляющего импульса

Fig. 4. Averaged fuel supply characteristics (bold line) obtained from the points: a) the maximum injection pressure; b) the beginning of the increase in injection pressure; c) the inflection of the leading edge of the characteristic; d) the beginning of the supply of the control pulse

Установлено, что точное усреднение последовательных впрысков требует фиксации характеристик как минимум 30 последовательных впрысков, а их наложение следует производить по точкам, соответствующим началу управляющего импульса.

Результаты исследования

Гидродинамическая модель процесса работы измерительного модуля основана на решении уравнений движения и неразрывности изотермичного течения вязкой и сжимаемой жидкости в длинном трубопроводе. Датчик давления находится в самом начале трубопровода измерительного модуля,

значит можно принять, что $P_{x=0} = P_1$. Для надежной работы модуля необходимо, чтобы отраженные волны давления не возвращались к датчику до окончания измерения единичного впрыска, то есть априори $W_{x=0} = 0$. Учитывая данные условия для точки, соответствующей началу трубопровода, можно записать волновое уравнение в форме Д'Аламбера:

$$\begin{cases} P_1 = P_0 + F_{x=0}, \\ U_{x=0} = (P_1 - P_0) / \alpha \rho. \end{cases} \quad (1)$$

Характеристика топливоподачи при этом определится выражением:

$$Q(t) = \frac{f \cdot (P(t) - P_{\text{ост}})}{\alpha \cdot \rho}. \quad (2)$$

И текущее давление вблизи форсунки можно представить как

$$P(t) = Q(t) \frac{\alpha \cdot \rho}{f} + P_{\text{ост}}. \quad (3)$$

Анализ формулы 3 показывает, что давление $P(t)$ в начале трубопровода, с учетом остаточного давления $P_{\text{ост}}$ в трубопроводе, прямо пропорционально цикловой подаче $Q(t)$, плотности ρ тестовой жидкости, скорости α движения волны давления и обратно пропорционально площади f поперечного сечения трубопровода. Так как в нашем случае трубопровод имеет постоянный диаметр, а остаточное давление тоже устанавливается оператором, то давление у датчика впрыска при заданной цикловой подаче будет определяться только скоростью звука и плотностью тестовой жидкости.

Далее было проанализировано влияние температуры и остаточного давления тестовой жидкости на скорость распространения волны давления в трубопроводе. Учитывая, что коэффициент сжимаемости взаимосвязан с плотностью среды, они рассматривались совместно. Поскольку скорость звука определяется функцией $\alpha = f(P, T, \rho)$, то результаты измерений также зависят от температуры и плотности тестовой жидкости и ее вязкости.

Решение выражения (3) возможно только после определения фактической скорости распространения волны давления в трубопроводе и вязкости среды с учетом связи температуры и плотности тестовой жидкости:

$$\rho = \rho_{0t} \cdot \sqrt[n]{\frac{B + P_{\text{ост}}}{B}}, \quad (4)$$

где ρ_{0t} – плотность при температуре t и атмосферном давлении $P_{\text{атм}}$.

Аналогично вывели формулу для коэффициента сжимаемости:

$$\beta = \frac{1}{nB} \cdot \left(\frac{P + B}{B} \right)^{\frac{1-n}{n}}. \quad (5)$$

Скорость распространения волны давления определится как

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta}} = \sqrt{\frac{n}{\rho_0} B^{\frac{1}{n}} (P + B)^{\frac{n-1}{n}}}. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (3) можно представить в пригодном для анализа виде:

$$P = \frac{Q \cdot \rho_{0t}}{f} \cdot \sqrt[n]{\frac{B + P_{\text{ост}}}{B}} \times \sqrt[n]{\frac{n}{\rho_0} B^{\frac{1}{n}} (P_{\text{ост}} + B)^{\frac{n-1}{n}}} + P_{\text{ост}}. \quad (7)$$

Константы B и n приняты из эмпирических зависимостей, определенных для конкретной тестовой жидкости. Например, для дизельного топлива, наиболее близкого по свойствам к тестовой жидкости, приняты следующие значения⁴:

$$\begin{cases} B = 10^6 [222,3 - 1,26(t - 20) + 0,62(\rho_{20} - 825)], \\ n = 7,49 + 0,0086(t - 20). \end{cases} \quad (8)$$

Уравнение (8) явно показывает, что изменение остаточного давления в трубопроводе и температуры тестовой жидкости оказывает прямое влияние на давление в трубопроводе, что доказывает возможность его корректировки путем изменения данных режимных параметров при оценке характеристики топливоподачи. Для того чтобы

⁴ Там же.

расчетная характеристика топливоподачи соответствовала текущему графику, к выражению (2) был добавлен поправочный коэффициент k , который учитывает фактическое изменение скорости движения волны давления и плотности среды из-за скорректированных значений температуры и остаточного давления тестовой жидкости в трубопроводе:

$$Q(t) = k \cdot \frac{f \cdot (P(t) - P_{\text{ост}})}{\alpha \cdot \rho}. \quad (9)$$

С помощью поправочного коэффициента k возможно привести расчетные значения давления в трубопроводе к фактическим данным, соответствующим стандартным условиям. Это позволяет компенсировать изменение физических свойств тестовой жидкости, а также прочих факторов, в том числе остаточного давления и температуры тестовой жидкости [22].

Указанный алгоритм гидродинамического расчета реализован в разработанном профессором Л. В. Греховым специализированном программном продукте «Впрыск», дополненном отдельным модулем, позволяющим исследовать процессы в трубопроводе за форсункой соответствующему измерительному модулю. Из всего диапазона возможных измерений при расчетах мы ограничились режимами «максимальная подача» и «предварительный впрыск». Далее был сформирован план численных исследований с диапазоном остаточного давления 0,1–2,5 МПа и температурой тестовой жидкости 40–90 °С. Расчеты производились в рамках однофакторного и двухфакторного экспериментов. Пример одного из вариантов расчета характеристики топливоподачи для разных значений остаточного давления показан на рисунке 5.

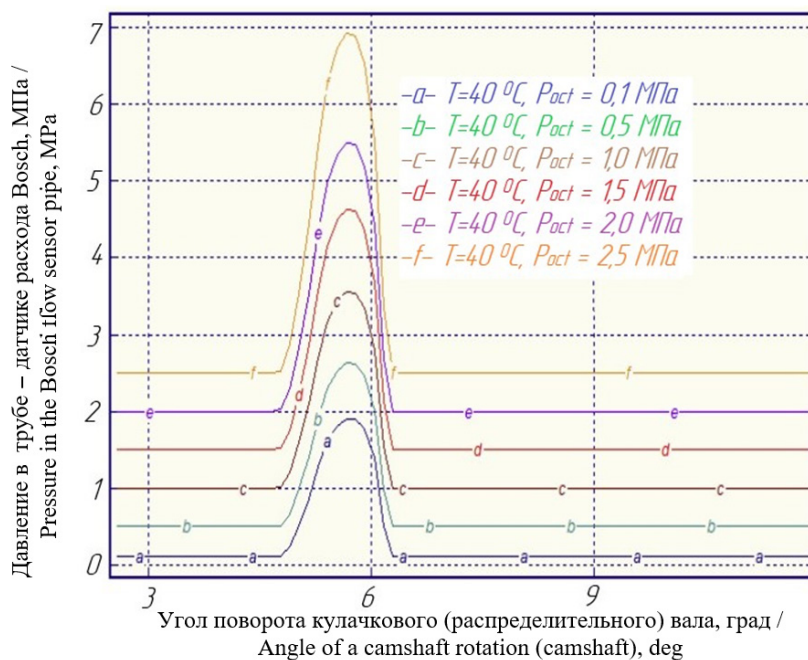
На графиках (рис. 6) видно, что повышение остаточного давления до 2,5 МПа приводит к увеличению площади S_1 более чем в 2 раза, что повышает точность при измерении малых цикловых подач. Необходимый для ее корректировки поправочный коэффициент при этом линейно возрастает с 1,0 до 0,466.

Анализ полученных результатов при изменении температуры тестовой жидкости показывает (рис. 6), что ее влияние на характеристику топливоподачи заметнее и приводит к снижению давления в трубопроводе в два раза (с 11,6 до 6,0 МПа). Используя данный факт, можно существенно расширить диапазон измеряемых модулем цикловых подач. При этом поправочный коэффициент изменяется в прямо пропорциональной зависимости с 1,0 до 1,943.

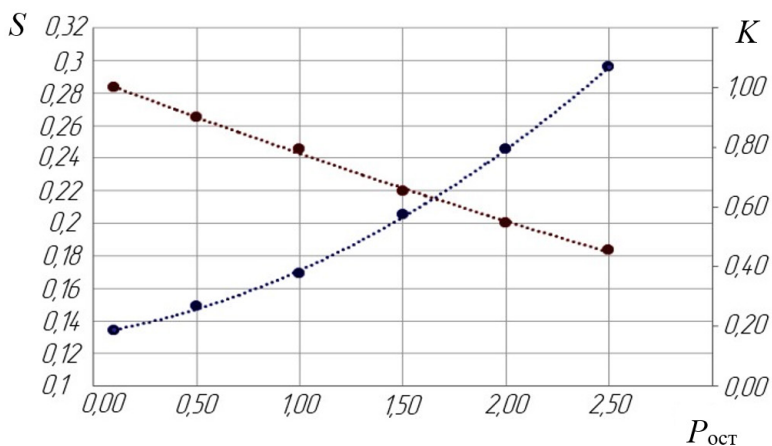
Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили рабочую гипотезу: расширить диапазон измеряемых цикловых подач возможно путем управляемого воздействия на величину остаточного давления и температуру тестовой жидкости в трубопроводе. Для минимальных цикловых подач (менее 10 мм³/цикл) площадь S_1 под характеристикой топливоподачи необходимо увеличивать за счет повышения остаточного давления, а при максимальных подачах (свыше 75 мм³/цикл) – снижать за счет подогрева трубопровода и тестовой жидкости в нем.

Для испытания электронных форсунок в лаборатории ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» была создана опытная установка на базе стенда ВТС-101⁵. В ходе экспериментов на разработанном измерительном модуле были экспериментально проверены полученные расчетным путем закономерности.

⁵ Там же.



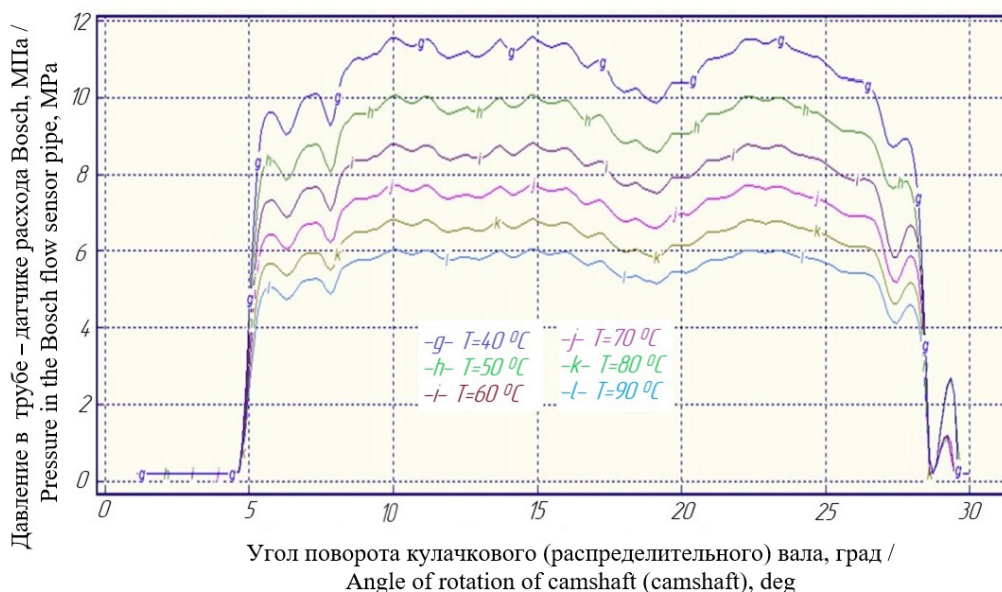
a)



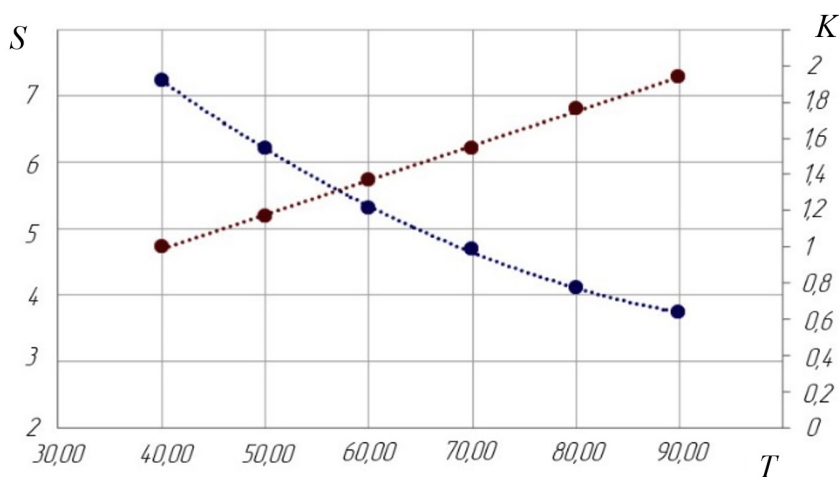
b)

Р и с. 5. Пример расчета характеристики топливоподачи для разных значений остаточного давления: а) расчетные графики давления в адаптере впрыска на режиме «предварительный впрыск»; б) расчетные значения поправочного коэффициента и площади под кривой при разном остаточном давлении ($g_{\text{и}} = 0,002 \text{ г}$ при $P_{\text{акк}} = 110 \text{ МПа}$)

Fig. 5. Example of calculating the fuel supply characteristic for different values of residual pressure: а) calculation graphs of the pressure in the injection adapter in the “pre-injection” mode; б) the calculated values of the area under the curve and the correction factor when the residual pressure changes ($g_{\text{и}} = 0.002 \text{ g}$ at $P_{\text{акк}} = 110 \text{ MPa}$)



a)



b)

Р и с. 6. Пример расчета характеристики топливоподачи для разных значений температуры тестовой жидкости: а) графики изменения давления в адаптере впрыска при изменении температуры топлива с 40 до 90 °С; б) Расчетные значения площади под кривой и поправочного коэффициента при изменении температуры тестовой жидкости⁶

Fig. 6. Example of calculating the fuel supply characteristic for different values of the test fluid temperature: a) graphs of the pressure change in the injection adapter when the fuel temperature changes from 40 to 90°C; b) the calculated values of the area under the curve and the correction factor when the temperature of the test liquid changes

⁶ Там же.

Обработка результатов позволила определить закономерности влияния отраженной волны, остаточного давления и температуры тестовой жидкости в трубопроводе на характеристику топливоподачи. Для исключения воздействия температуры тестовой жидкости на рабочий процесс форсунки испытание проводилось при стабильной температуре тестовой жидкости, равной 50 °С, а управление параметрами измерительного модуля выполнялось только регулировкой температуры измерительного трубопровода и ресивера.

Для исследования процесса влияния температуры тестовой жидкости на максимальное давление в трубопроводе была разработана специальная методика [23]. Экспериментально полученные данные позволили сравнить лабораторные и расчетные исследования и проверить адекватность аналитических выражений, полученных для корректировки зафиксированных измерительным модулем результатов (табл. 2).

Видно, что эмпирический критерий $F_{\text{эмп}}$ меньше критического $F_{\text{крит}}$, значит, проверка адекватности подтверждает однородность данных выборки и сходимость результатов, что доказывает точность полученной математической модели и подтверждает выявленные закономерности воздействия температуры тестовой жидкости

на максимальное давление и площадь под кривой⁷.

Анализ полученных экспериментально данных показывает (рис. 7), что повышение температуры тестовой жидкости с 40 до 90 °С неизменно ведет к снижению давления в измерительном трубопроводе, что позволяет расширить границы диапазона измерения цикловых подач до величины 120 мм³/цикл, соответствующей максимальной цикловой подаче основных моделей парка автотракторной техники.

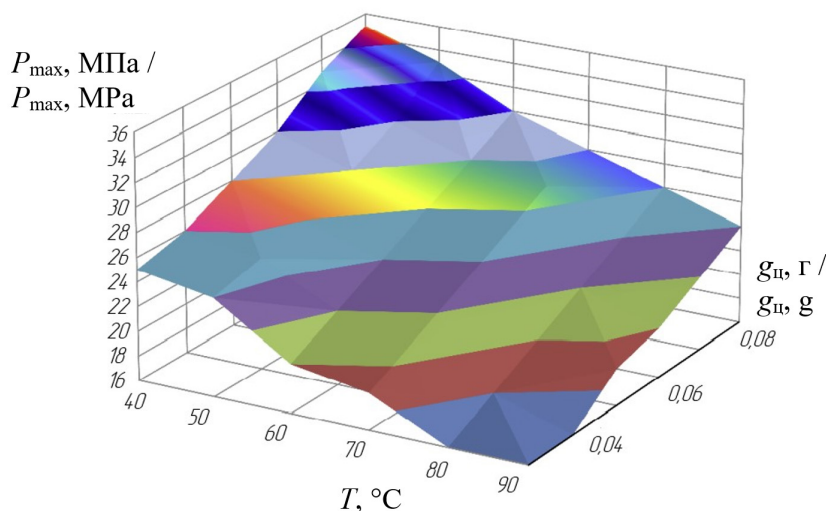
В ходе экспериментальных исследований форсунки на измерительном модуле было установлено, как влияет остаточное давление в трубопроводе измерительного модуля на максимальное давление в трубопроводе и на характеристику впрыска. Эксперименты проводились в режиме «предварительный впрыск» при работе форсунки с цикловой подачей 0,002 г, так как повышать давление в трубопроводе необходимо только на режимах малых цикловых подач. Также для выявления всех особенностей рабочего процесса измерительного модуля эксперименты были выборочно продолжены на разных режимах работы форсунки (табл. 3). Для управления были выбраны следующие параметры: $P_{\text{ост}}$ – остаточное давление в трубопроводе; $t_{\text{впр}}$ – продолжительность управляющего сигнала; $g_{\text{ц}}$ – цикловая подача.

Т а б л и ц а 2
Table 2

Проверка адекватности расчетных данных
Checking the adequacy of analytical expressions

Выборочная дисперсия (σ^2) / Sampling variance (σ^2)		F-критерий (критерий Фишера) / F-criterion (Fisher's criterion)	
1-я выборка / 1 st sample	2-я выборка / 2 nd sample	Эмпирический / Empirical	Критический (теоретический) / Critical (theoretical)
3,00	3,17	1,05	1,61 ($\alpha = 0,10$) 1,84 ($\alpha = 0,05$) 2,66 ($\alpha = 0,01$)

⁷ Там же.



Р и с. 7. Зависимость максимального давления в адаптере измерительного модуля от температуры тестовой жидкости при различной цикловой подаче

Fig. 7. The dependence of the maximum pressure in the adapter of the measuring module on the temperature of the test liquid at different fuel delivery

Т а б л и ц а 3

Table 3

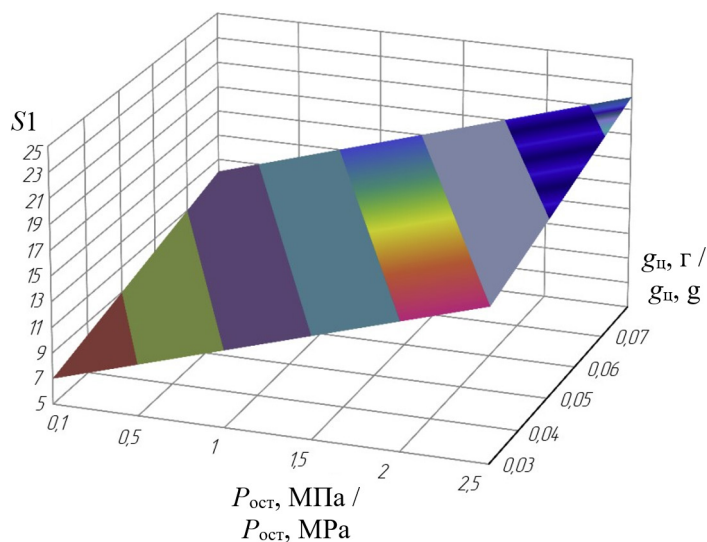
Данные экспериментальных исследований
Experimental study data

$\frac{P_{ост}^*, \text{ МПа}}{P_{ост}, \text{ МПа}}$	$\frac{g_{ц}, \text{ мм}^3/\text{цикл}}{g_{ц}, \text{ мм}^3/\text{cycle}}$	Слив, мм ³ / цикл / Drain, mm ³ / cycle	$t, ^\circ\text{C}$	$\frac{S1, \text{ мм}^2}{S1, \text{ мм}^2}$	$\frac{T_{впр}^*, \text{ мс}}{T_{впр}, \text{ ms}}$	$\frac{T_{P_{max}}^*, \text{ мс}}{T_{P_{max}}, \text{ ms}}$	$\frac{P_{max}^*, \text{ МПа}}{P_{max}, \text{ МПа}}$	dP_{max}
0,1	30,6	16,2	44,0	114,059	1,7460	0,9822	9,4516	29,398
0,5	30,3	16,5	44,1	112,935	1,7059	0,9468	9,5227	26,984
1,0	30,0	16,4	44,3	109,648	1,6864	0,9630	9,6203	24,608
1,5	29,5	16,4	44,2	106,472	1,6708	0,9377	9,7617	20,067
2,0	29,3	16,5	44,5	104,336	1,6484	0,9136	9,8198	17,606
2,5	29,0	16,3	44,4	101,556	1,6334	0,8836	9,9819	16,389

При анализе данных экспериментов (рис. 8) видно, что увеличение остаточного давления в трубопроводе с 0,1 до 2,5 МПа позволяет значительно поднять давление в трубопроводе в процессе впрыска и тем самым повысить точность измерения малых цикловых подач⁸. Такой способ управления

можно рекомендовать тем, кто разрабатывает стенды для испытания топливной аппаратуры с целью расширения диапазона измеряемых стендом подач, при этом для определения фактического значения цикловой подачи требуется применять соответствующие поправочные коэффициенты.

⁸ Там же.



Р и с. 8. Зависимость площади под кривой от остаточного давления тестовой жидкости в измерительном модуле при различной цикловой подаче⁹

F i g. 8. The dependence of the area under the curve on the residual pressure of the test liquid in the measuring module at different fuel delivery

Обсуждение и заключение

На основании анализа проведенных расчетных и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для современных топливopодачующих систем с электронным управлением характеристика топливopодачи является наиболее информативным показателем качества работы форсунок, при этом использующиеся методы и оборудование для их технического обслуживания не рассчитаны на ее фиксацию и последующий анализ.

2. Разработана и апробирована методика диагностирования электронно-управляемых форсунок дизелей по характеристике топливopодачи, которая позволяет определить конкретные неисправности и сократить общую трудоемкость ремонта форсунок на 24 %.

3. Разработан и в производственных условиях апробирован новый измерительный модуль для оценки технического состояния форсунок дизелей по характеристике топливopодачи на разных режимах работы¹⁰.

4. Установлены закономерности, раскрывающие влияние режимных параметров на гидродинамические процессы в измерительном модуле, что позволило обосновать пути расширения диапазона измеряемых стендом цикловopодач с одновременным повышением точности. Увеличение диапазона измерения цикловopодач до 120 мм³/цикл обеспечивалось изменением температуры тестовой жидкости с 40 до 90 °С, а повышение точности измерения цикловopодач величиной менее 5 мм³ на режиме предварительного впрыска – за счет увеличения

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.



остаточного давления в адаптере форсунки до 2,5 МПа.

5. Разработанный алгоритм автоматизации процесса измерения характеристики топливopодaчи зарегистрирован в виде программы для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019663873).

Перспективным направлением дальнейшей разработки темы является исследование влияния каждого структурного параметра форсунки на параметры топливopодaчи с целью формирования алгоритмов для автоматического распознавания дефектных элементов форсунки

в процессе диагностирования. Применение разработанной методики и измерительного модуля за счет увеличения полноты диагностирования позволяет преждевременно выявлять конкретные неисправности форсунок, снижать трудоемкость диагностирования и ремонта.

Разработанный авторами подход позволяет приблизиться к решению задачи безразборного диагностирования любого компонента топливной аппаратуры с точной оценкой технического состояния отдельных деталей, что предполагается осуществить в дальнейших исследованиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грехов, Л. В. Выбор и обоснование типа и параметров топливopодaющей аппаратуры перспективных дизелей / Л. В. Грехов, А. А. Денисов, Е. Е. Старков // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – № 18. – С. 11–14. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22621658> (дата обращения: 18.02.2021).

2. Баширов, Р. М. Совершенствование методики регулирования топливной аппаратуры тракторных дизелей / Р. М. Баширов, Ф. Р. Сафин, С. З. Инсафуддинов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3 (31). – С. 60–64. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22479459> (дата обращения: 18.02.2021). – Рез. англ.

3. Тырловой, С. И. Учет волновых явлений в канале электрогидравлической форсунки при моделировании процесса впрыска в аккумуляторной системе питания / С. И. Тырловой // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 25–29. – URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/83> (дата обращения: 18.02.2021).

4. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System / L. V. Grekhov, Yu. E. Dragan, A. A. Denisov, E. E. Starkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, Issue 5. – Pp. 3979–3986. – URL: https://www.researchgate.net/publication/304306489_Injection_Rate_Shaping_with_Possibilities_of_Conventional_Design_Common_Rail_System (дата обращения: 18.02.2021).

5. Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems / M. T. Jcanović, V. V. Karanović, D. M. Knežević, M. D. Orošnjak. – DOI 10.5937/vojtehg65-11577 // Military Technical Courier. – 2017. – Vol. 65, Issue 4. – Pp. 968–993. – URL: <http://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=0042-84691704968J> (дата обращения: 18.02.2021).

6. Temperature and Frequency Dependence of Electrical Iron Effects on Electromagnetic Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Common Rail Injector / J. Zhao, P. Yue, L. Grekhov [et al.]. – DOI 10.3233/JAE-180022 // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2019. – Vol. 60, no. 2. – Pp. 173–185. – URL: <https://content.iospress.com/articles/international-journal-of-applied-electromagnetics-and-mechanics/jae180022> (дата обращения: 18.02.2021).

7. Kuleshov, A. S. Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NO_x Formation Model / A. S. Kuleshov, L. V. Grekhov. – DOI 10.4271/2013-01-0882. – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 2013. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2013-01-0882/> (дата обращения: 18.02.2021).

8. **Belchev, S. G.** Method for Determining the Parameters of Injection of Common Rail Injectors / S. G. Belchev. – DOI [10.1088/1757-899X/614/1/012003](https://doi.org/10.1088/1757-899X/614/1/012003). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 614. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/614/1/012003> (дата обращения: 18.02.2021).
9. Beyond Euro VI – Development of a Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles / M. S. Graham, S. Crossley, T. Harcombe [et al.]. – DOI [10.4271/2014-01-1435](https://doi.org/10.4271/2014-01-1435). – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 2014. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2014-01-1435/> (дата обращения: 18.02.2021).
10. **Баширов, Р. М.** Совершенствование способа регулирования топливной аппаратуры дизелей / Р. М. Баширов, Ф. Р. Сафин Р. Ж. Магафуров // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 6 (152). – С. 158–163. – URL: <http://www.asau.ru/vestnik/2017/6/158-163.pdf> (дата обращения: 18.02.2021). – Рез. англ.
11. **Козеев, А. А.** Повышение эффективности диагностирования электрогидроуправляемых форсунок / А. А. Козеев, Ш. Ф. Нигматуллин // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 2. – С. 50–54. – URL: https://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/45/2016_2 (дата обращения: 18.02.2021). – Рез. англ.
12. Neue Messtechnik für Direkteinspritzsysteme von Diesel- und Ottomotoren / R. Henzinger, H. Kammerstetter, F. B. Radke, M. Werner. – DOI [10.1007/BF03225407](https://doi.org/10.1007/BF03225407) // MTZ – Motortechnische Zeitschrift. – 2006. – Vol. 67. – Pp. 524–529. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03225407#citeas> (дата обращения: 20.02.2021).
13. **Seebode, J.** Dieselmotorische Einspritzratenformung unter dem Einfluss von Druckmodulation und Nadelstößdrosselung / J. Seebode. – DOI [10.15488/6452](https://doi.org/10.15488/6452). – Hannover : Universität, Diss., 2004. – 124 p. – URL: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6504> (дата обращения: 20.02.2021).
14. **Merker, G. P.** Dieselmotorische Einspritzverlaufsformung mit Hilfe optischer Messsysteme / G. P. Merker, T. Delebinski. – DOI [10.1007/BF03227435](https://doi.org/10.1007/BF03227435) // MTZ – Motortechnische Zeitschrift. – 2007. – Vol. 68. – Pp. 726–733. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03227435> (дата обращения: 20.02.2021).
15. **Нигматуллин, Ш. Ф.** Исследование влияния температуры технологической жидкости на цикловую подачу электрогидроуправляемой форсунки / Ш. Ф. Нигматуллин, К. В. Костарев, Б. Ш. Карачурин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (35). – С. 69–71. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24305109> (дата обращения: 20.02.2021). – Рез. англ.
16. **Bosch, W.** The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument For Display of the Characteristics of Individual Injection / W. Bosch. – DOI [10.4271/660749](https://doi.org/10.4271/660749). – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 1966. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/660749/> (дата обращения: 20.02.2021).
17. Патент № 190615 Российская Федерация, МПК F02M 65/00. Устройство для определения характеристики впрыскивания : № 2019109349 : заявл. 29.03.2019 : опубл. 04.07.2019 / Габитов И. И., Неговора А. В., Магафуров Р. Ж., Самиков Р. Ф. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ». – Текст : электронный. – URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_service?DB=RUPM&DocNumber=190615&TypeFile=html (дата обращения: 20.02.2021).
18. **Bosch, W.** Der Einspritzgesetz-Indikator, ein neues Meßgerät zur Direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Einzeleinspritzungen / W. Bosch. – Текст : непосредственный // Motortechn. – 1964. – № 7. – Pp. 268–282.
19. Patent No. 1954938 Germany, F02 M65/00. Method And Device For Measuring the Injection Quantity and the Injection Rate of an Injection Valve for Liquids : No. 06807073 : appl. 09.10.2006 : publ. 13.08.2006 / Abt J., Kuhn U., Marx K. [et al.]. – Текст : электронный. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=EP14978973&tab=NATIONALBIBLIO> (дата обращения: 20.02.2021).
20. Patent No. 5801308 USA. Measuring Apparatus for Measuring an Injected Quantity of Liquid : No. 08/923270 : appl 09.04.1997 : publ. 09.01.1998 / Hideaki H. – 13 p. – URL: <https://www.freepatentsonline.com/5801308.pdf> (дата обращения: 20.02.2021).



21. **Grekhov, L.** Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software / L. Grekhov, K. Mahkamov, A. Kuleshov. – DOI [10.4271/2015-01-1859](https://doi.org/10.4271/2015-01-1859). – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 2015. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2015-01-1859/> (дата обращения: 20.02.2021).

22. **Неговора, А. В.** Обоснование температуры рабочей жидкости при испытании дизельных инжекторов / А. В. Неговора, Р. Ж. Магафуров, А. И. Низамутдинов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2019. – № 3 (51). – С. 99–106. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41152309> (дата обращения: 20.02.2021). – Рез. англ.

23. The Modern Concept of Thermal Preparation of Automotive Equipment and Tools for Its Implementation / I. I. Gabitov, A. V. Negovora, M. M. Razyapov [et al.]. – DOI [10.1088/1757-899X/632/1/012048](https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012048). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 632. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/632/1/012048>

Поступила 04.03.2021; одобрена после рецензирования 08.04.2021; принята к публикации 14.04.2021

Об авторах:

Габитов Илдар Исмагилович, ректор ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4443-3126>, gabitov@bsau.ru

Неговора Андрей Владимирович, профессор кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>, negovora@bsau.ru

Сафин Филлюс Раилевич, доцент кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>

Магафуров Руслан Жамилович, старший преподаватель кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8821-2769>, magafurov@bsau.ru

Раков Николай Викторович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. И. Габитов – научное руководство, анализ и доработка текста.

А. В. Неговора – формирование структуры статьи, доработка начального текста, составление выводов и заключения.

Ф. Р. Сафин – анализ литературных данных, описание экспериментальных и расчетных исследований, обработка полученных данных, апробация разработанной методики, редактирование текста.

Р. Ж. Магафуров – анализ литературных данных, описание экспериментальных и расчетных исследований, обработка полученных данных, апробация разработанной методики, редактирование текста.

Н. В. Раков – анализ литературных данных, описание экспериментальных и расчетных исследований, обработка полученных данных, апробация разработанной методики, редактирование текста.

Благодарности: авторы благодарят руководителя центра по ремонту топливной аппаратуры Bosch Diesel Service ООО «Башдизель» за предоставленные образцы электроуправляемых форсунок и оборудование для испытания. Авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Grekhov L.V., Denisov A.A., Starkov Ye.Ye. [Selection and Justification of Type and Parameters of Fuel Supplying Equipment of Perspective Diesel Engines]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Volgograd State Technical University Bulletin. 2014; (18):11-14. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22621658> (accessed 18.02.2021). (In Russ.)
2. Bashirov R.M., Safin F.R., Insafuddinov S.Z. Improving Methods of Regulation Fuel Equipment Tractor Diesel. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bashkir State Agrarian University Bulletin. 2014; (3):60-64. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22479459> (accessed 18.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Tyrlovoy S.I. [Consideration of Wave Phenomena in the Electrohydraulic Injector Channel in the Simulation of the Injection Process in the Accumulator Feeding System]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* = Internal Combustion Engines. 2012; (2):25-29. Available at: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/83> (accessed 18.02.2021). (In Russ.)
4. Grekhov L.V., Dragan Yu.E., Denisov A.A., Starkov E.E. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(5):3979-3986. Available at: https://www.researchgate.net/publication/304306489_Injection_Rate_Shaping_with_Possibilities_of_Conventional_Design_Common_Rail_System (accessed 18.02.2021). (In Eng.)
5. Jovanović M.T., Karanović V.V., Knežević D.M., Orošnjak M.D. Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems. *Military Technical Courier*. 2017; 65(4):968-993. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5937/vojtehg65-11577>
6. Zhao J., Yue P., Grekhov L., et al. Temperature and Frequency Dependence of Electrical Iron Effects on Electromagnetic Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Common Rail Injector. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2019; 60(2):173-185. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3233/JAE-180022>
7. Kuleshov A.S., Grekhov L.V. Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NOx Formation Model. *SAE Technical Paper*. 2013. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-0882>
8. Belchev S.G. Method for Determining the Parameters of Injection of Common Rail Injectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 614. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/614/1/012003>
9. Graham M.S., Crossley S., Harcombe T., et al. Beyond Euro VI – Development of a Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles. *SAE Technical Paper*. 2014. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-1435>
10. Bashirov R.M., Safin F.R., Magafurov R.Zh. Improvement of Diesel Engine Fuel Equipment Adjustment Technique. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Altai State Agrarian University. 2017; (6):158-163. Available at: <http://www.asau.ru/vestnik/2017/6/158-163.pdf> (accessed 18.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Kozev A.A., Nigmatullin S.F. Improving the Efficiency of Diagnosis of Injectors. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2016; (2):50-54. Available at: https://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/45/2016_2 (accessed 18.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

12. Henzinger R., Kammerstetter H., Radke F.B., Werner M. Neue Messtechnik für Direkteinspritzsysteme von Diesel- und Ottomotoren. *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*. 2006; 67:524-529. (In Germ.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03225407>
13. Seebode J. Dieselmotorische Einspritzratenformung unter dem Einfluss von Druckmodulation und Nadelstößdrosselung. Hannover: Universität, Diss.; 2004. 124 p. (In Germ.) DOI: <https://doi.org/10.15488/6452>
14. Merker G.P., Delebinski T. Dieselmotorische Einspritzverlaufsformung mit Hilfe optischer Messsysteme. *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*. 2007. 68:726-733. (In Germ.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03227435>
15. Nigmatullin Sh.F., Kostarev K.V., Karachurin B.Sh. Effect of Process Liquid Temperature on Cyclic Supply of the Electric Hydrodynamic Nozzle. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bashkir State Agrarian University Bulletin. 2015; (3):69-71. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24305109> (accessed 20.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Bosch W. The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument For Display of the Characteristics of Individual Injection. *SAE Technical Paper*. 1966. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/660749>
17. Gabitov I.I., Negovora A.V., Magafurov R.Zh., Samikov R.F. [Device for Determining the Injection Characteristic]. Patent 190,615 Russian Federation. 2019 July 04. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=190615&TypeFile=html (accessed 20.02.2021). (In Russ.)
18. Bosch W. Der Einspritzgesetz-Indikator, ein neues Meßgerät zur direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Einzeleinspritzungen. *Motortechn.* 1964; (7):268-282. (In Germ.)
19. Abt J., Kuhn U., Marx K., et al. Method and Device For Measuring the Injection Quantity and the Injection Rate of an Injection Valve for Liquids. Patent 1,954,938 Germany. 2006 August 13. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=EP14978973&tab=NATIONALBIBLIO> (accessed 20.02.2021). (In Eng.)
20. Hideaki H. Measuring Apparatus for Measuring an Injected Quantity of Liquid. Patent 5,801,308 USA. 1998 January 09. Available at: <https://www.freepatentsonline.com/5801308.pdf> (accessed 20.02.2021). (In Eng.)
21. Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software. *SAE Technical Paper*. 2015. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1859>
22. Negovora A.V., Magafurov R.Zh., Nizamutdinov A.I. Substation of the Working Fluid Temperature When Testing Diesel Injectors. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bashkir State Agrarian University Bulletin. 2019; (3):99-106. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41152309> (accessed 20.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Gabitov I.I., Negovora A.V., Razyapov M.M., et al. The Modern Concept of Thermal Preparation of Automotive Equipment and Tools for Its Implementation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 632. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012048>

Submitted 04.03.2021; approved after reviewing 08.04.2021; accepted for publication 14.04.2021

About the authors:

Idar I. Gabitov, Rector of Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4443-3126>, gabitov@bsau.ru

Andrey V. Negovora, Professor of the Chair of Automobiles and Tractor Systems, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>, negovora@bsau.ru

Filyus R. Safin, Associate Professor of the Chair of Automobiles and Tractor Systems, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>

Ruslan Zh. Magafurov, Senior Lecturer of the Chair of Automobiles and Tractor Systems, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8821-2769>, magafurov@bsau.ru

Nikolay V. Rakov, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Contribution of the authors:

I. I. Gabitov – scientific guidance, analysis and revision of the text.

A. V. Negovora – forming the structure of the article, finalizing the initial text, drawing conclusions.

F. R. Safin – analysis of literature data, description of experimental and computational studies, processing the data obtained, approbation of the developed methodology, editing the text.

R. Zh. Magafurov – analysis of literature data, description of experimental and computational studies, processing the data obtained, approbation of the developed methodology, editing the text.

N. V. Rakov – analysis of literature data, description of experimental and computational studies, processing the data obtained, approbation of the developed methodology, editing the text.

Acknowledgments: The authors would like to thank the head of the Bosch Diesel Service LLC “Bash-diesel” center for providing samples of electrically controlled injectors and equipment for testing. The authors express their gratitude to the anonymous reviewers

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА / TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

УДК 631.17:519.8:502.13

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.227-240

Оригинальная статья



Модель прогнозирования комплексного негативного воздействия технологий сельхозпроизводства на водные объекты

И. А. Субботин*, Э. В. Васильев

*Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства – филиал
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)*

**itmo1652@mail.ru*

Введение. Цель исследования – разработка математической модели, позволяющей оценивать и прогнозировать комплексное негативное воздействие на водные объекты технологий сельхозпроизводства. Данная проблема актуальна ввиду необходимости укрупнения сельхозпредприятий. Модель прогнозирования важна для оценки с учетом комплексного влияния машинных технологий сельхозпроизводства и всех биогенных элементов, отрицательно воздействующих на водные объекты.

Материалы и методы. Использован метод логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова, позволяющий формализовать экспертные знания в математическую модель. Были опрошены 4 эксперта, а полученные данные обработаны и подвергнуты регрессионному анализу. Адекватность модели проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера.

Результаты исследования. Сформирована иерархическая система из 6 факторов и 14 подфакторов, включающих как применяемые машинные технологии, так и принимаемые управленческие решения. Получена модель, содержащая полиномиальное уравнение, отражающее влияние факторов на уровень негативного воздействия технологий, и уравнения, определяющие влияние подфакторов на факторы.

Обсуждение и заключение. Полученная модель может быть использована в практических целях для поддержки принятия решений планирования, прогнозирования и выбора сценариев модернизации сельхозпредприятий. Уравнения модели позволяют понять значимость факторов и подфакторов, влияющих на уровень негативного воздействия (диффузную нагрузку) на водные объекты. Это позволяет выбирать эффективные пути снижения негативного воздействия путем выбора в качестве объектов наиболее значимых факторов и/или подфакторов.

© Субботин И. А., Васильев Э. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: технологии сельхозпроизводства, экологическая оценка, моделирование, прогнозирование, инженерная экология, комплексное негативное воздействие

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Субботин, И. А. Модель прогнозирования комплексного негативного воздействия технологий сельхозпроизводства на водные объекты / И. А. Субботин, Э. В. Васильев. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.227-240](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.227-240) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 227–240.

Original article

A Forecast Model of the Complex Negative Impact of Agricultural Production Technologies on Water Bodies

I. A. Subbotin*, E. V. Vasilev

*Institute for Engineering and Environmental Problems
in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific
Agroengineering Center VIM (Saint Petersburg, Russian Federation)
itmo1652@mail.ru

Introduction. The purpose of research is to develop a mathematical model for assessing and forecasting the complex negative impacts of agricultural technologies on water bodies. This problem is relevant because of the need to enlarge agricultural enterprises. The created model for forecasting is necessary to make an objective assessment, taking into account the complex effect of machine technologies applied to agricultural production and all biogenic elements that have a negative impact on water bodies.

Materials and Methods. There was used the Spesivtsev – Drozdov method of logical-linguistic modeling, which allows giving expert knowledge a form mathematical model. Four experts were interviewed, and the obtained data became a subject of the regression analysis. The adequacy of the model was confirmed using the coefficient of determination and Fisher's test.

Results. A hierarchical system of 6 factors and 14 sub-factors was formed, including both the applied machine technologies and the management decisions on the matter. There was created a model containing a polynomial equation reflecting the influence of factors on the level of negative impact of technologies and equations that determine the influence of sub-factors on factors.

Discussion and Conclusion. The created model can be used for practical purposes to support making decisions for planning, forecasting and selecting scenarios to modernize agricultural enterprises. The model equations make it possible to understand the significance of factors and sub-factors affecting the level of negative impact (diffuse load) on water bodies. This allows us to choose more effective ways to reduce the negative impact by choosing the most significant factors and/or sub-factors as objects of management.

Keywords: agricultural technologies, environmental assessment, modeling, forecasting, engineering ecology, complex negative impact

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

For citation: Subbotin I.A., Vasilev E.V. A Forecast Model of the Complex Negative Impact of Agricultural Production Technologies on Water Bodies. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):227-240. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.227-240>

Введение

Современные сельхозпредприятия используют высокопроизводительные и энергоёмкие технологии и техниче-

ские средства, которые могут оказывать значительное негативное воздействие на окружающую среду. Одной из актуальных научных проблем является



комплексное определение негативно-го влияния сельхозпроизводства на гидросферу. Эта задача осложняется большими площадями сельскохозяйственных полей, с которых происходит сток загрязняющих веществ, свойствами почвы, факторами, влияющими на интенсивность загрязнений. Такую диффузную (распределенную в пространстве) нагрузку практически невозможно измерить инструментальными методами ввиду больших площадей изучаемых объектов – сельскохозяйственных полей. Данная проблема особенно актуальна в бассейнах крупных водоемов, например в районе Балтийского моря, на территории которого расположены 9 государств, между которыми подписаны природоохранные соглашения. Традиционные природоохранные исследования, как правило, сфокусированы на проблеме влияния конкретных машинных технологий в определенных условиях. Получаемые в результате расчетные модели неприменимы для комплексной оценки влияния на водные объекты сельхозпроизводства в целом. Почти во всех существующих исследованиях по данной тематике рассматриваются более простые задачи выбора и сравнения критериев и методов оценки и не рассматривается задача прогнозирования негативного воздействия на окружающую среду. Цель исследования – разработка математической модели, позволяющей оценивать и прогнозировать

комплексное негативное воздействие технологий сельхозпроизводства на водные объекты.

Обзор литературы

Ряд современных российских и зарубежных исследований затрагивает эту научную проблему, однако чаще всего авторы ограничиваются постановкой частных вопросов [1; 2]. Другие авторы сравнивают конкретные методы оценки [3–6] и теоретико-методологические подходы к решению проблемы негативного влияния сельхозпроизводства [7–9]. Некоторые работы направлены на исследование и обоснование критериев оценки¹ [10–12]. Важными вопросами являются анализ конкретных источников загрязнений внутри сельхозпредприятий [13–15] и изучение негативного воздействия отдельных видов загрязнений² [16; 17].

Распространенной практикой является экспертная оценка выбранных показателей негативного воздействия [18; 19]. В то же время вопрос формализации зависимостей с получением конкретных расчетных формул применительно к влиянию технологий сельхозпроизводства на водные объекты в известных публикациях исследовано мало. Часто исследователи фокусируются на конкретных, наиболее значимых с точки зрения негативного воздействия, машинных технологиях [20–23]. Некоторые авторы рассматривают проблему негативного воздействия сельхозпроизводства на региональном

¹ Agricultural Impacts on Landscapes: Developing Indicators for Policy Analysis // Proceedings from NIBIOS/OECD Expert Meeting on Agricultural Landscape Indicators in Oslo, Norway October 7-9, 2002 / W. Dramstad, Ch. Sogge (eds.). Oslo: NIBIO, 2003. 347 p. URL: <https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/handle/11250/2558838?locale-attribute=en> (дата обращения: 01.09.2020); Environmental Indicators for Agriculture. Vol. 3: Methods and Results [Электронный ресурс]. 2001. 409 p. URL: <https://www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/1916629.pdf> (дата обращения: 01.09.2020).

² Selecting Manure Management Technologies to Reduce Ammonia Emissions from Big Livestock Farms in the Northwestern Federal District of Russia / D. A. Maximov [et al.] // Ammonia Workshop 2012 Saint Petersburg: Abating Ammonia Emissions in the UNECE and EECCA Region / K. W. Van der Hoek, N. P. Kozlova (eds.). Bilthoven, 2014. Pp. 161–168. URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2014/AIR/WGSR/St.Peterburg_WS_Ammonia_proceedings_2012.pdf (дата обращения: 01.09.2020).

уровне³ [24–26]. Также необходимо отметить, что почти все публикации на тему негативного воздействия сельхозпроизводства на окружающую среду направлены на оценку текущей ситуации и не рассматривают задачу прогнозирования [27–29]. В процессе поиска литературных источников авторами было найдено лишь четыре статьи, связанные с прогнозированием негативного воздействия сельхозпроизводства [11; 22; 30; 31]. Таким образом, научная новизна настоящего исследования состоит в комплексной оценке (учитывается не конкретная технология или вещество-загрязнитель, а воздействие в целом) негативного влияния на водные объекты и построении математической модели, пригодной для прогнозирования.

Материалы и методы

Для построения математической модели, необходимой для оценивания и прогнозирования негативного воздействия технологий сельхозпроизводства, был использован метод логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова [31]. Данный подход содержит следующие действия: выбор и обоснование факторов, влияющих на изучаемое явление или объект и выбор целевой функции, для которой планируется определить формулу, раскрывающую ее зависимости от факторных переменных; определение диапазонов принимаемых значений (или перечня значений в случае качественных переменных) факторных переменных и формирование шкал оценки значений с использованием аппарата нечеткой логики; формирование опросных матриц; опрос экспертов (фиксация лингвистических значений целевой функции для сочетаний факторных

значений и перевод из лингвистической в численную форму); обработка экспертных оценок методами регрессионного анализа; проверка адекватности полученной модели по коэффициенту детерминации (R^2) и критерию Фишера; при необходимости (в случае низкого значения коэффициента детерминации) – дополнительная работа с экспертами для корректировки набора факторных переменных или корректировки значений экспертных оценок. Метод логико-лингвистического моделирования достаточно хорошо апробирован, в том числе при решении агроэкологических проблем [22; 31; 32]. Экспертами были обоснованы факторы и для некоторых (X_4 , X_5 , X_6) были определены подфакторы. Методом логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова получены полиномиальные уравнения, определяющие влияние подфакторов на факторы.

Опросная матрица для получения главного уравнения, необходимого для определения уровня негативного влияния сельхозпроизводства на водные объекты, представляет собой таблицу в виде полуреплики матрицы полнофакторного эксперимента (32 строки экспертных оценок). Уровень негативного влияния сельхозпроизводства на водные объекты определяется целевым показателем Y – уровень диффузной нагрузки, отражающий объем биогенных элементов, поступающих от сельхозпредприятия в водные объекты (кг/год). В качестве экспертов были привлечены 4 ученых, имеющих многолетний опыт участия в полевых исследованиях стоков с сельхозпредприятий в реки Ленинградской области. Регрессионный анализ был выполнен с помощью компьютерной программы Scilab 6.1.0.

³ Baker E., Boileau P., Beaudoin Y. Guidelines for Conducting Integrated Environmental Assessments [Электронный ресурс]. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/327498509_Guidelines_for_conducting_Integrated_Environmental_Assessments (дата обращения: 01.09.2020).

Результаты исследования

В соответствии с выбранным методом логико-лингвистического моделирования был определен целевой показатель Y (1). В качестве 6 факторов, влияющих на уровень диффузной нагрузки, были выбраны следующие: $X1$ – применяемая технология внесения удобрений; $X2$ – применяемая технология обработки почвы; $X3$ – применяемые технологии очистки поверхностных, грунтовых и дренажных вод с полей; $X4$ – соблюдение агротехнологических требований; $X5$ – соблюдение агроэкологических требований; $X6$ – использование цифровых технологий в технологических процессах.

Фактор $X1$ подразумевает использование одной из 9 машинных технологий внесения жидкого (ЖОУ) или твердого (ТОУ) органического удобрения:

1) поверхностное разбрызгивание ЖОУ;

2) поверхностное разбрызгивание ЖОУ с последующей запашкой;

3) поверхностное ленточное внесение через шланговую систему;

4) поверхностное ленточное внесение через шланговую систему с башмаками;

5) внутрипочвенное внесение в открытые канавки;

6) внутрипочвенное внесение с последующим закрытием канавок;

7) внутрипочвенное внесение с применением культиватора;

8) внесение ТОУ разбрасыванием;

9) внесение ТОУ разбрасыванием с последующей запашкой.

В зависимости от выбранной технологии степень вымывания внесенных удобрений в водные объекты значительно варьируется.

Фактор $X2$ подразумевает выбор одной из пяти технологий обработки почвы: минимальная, нулевая, комбинированная, безотвальная, отвальная (классическая технология вспашки).

Фактор $X3$ отражает инженерные методы и технологии, применяемые на сельхозпредприятии для очистки поверхностных, грунтовых и дренажных вод с полей, и содержит 4 подфактора: изменение микрорельефа поля в зоне впадения стока в водные объекты ($X3.1$); изменение (конструирование) русла дренажных каналов с целью снижения скорости потока стоков ($X3.2$); высаживание в зоне поступления стоков растений, поглощающих биогенные элементы ($X3.3$); очистка системой отстойников с применением биологизированных фильтров ($X3.4$).

В отличие от факторов $X1$ и $X2$, где зависимость определялась выбором одной из технологий перечня, фактор $X3$ содержит подфакторы, каждый из которых может принимать положительное (в случае применения данного инженерного метода или технологии) либо отрицательное (в случае неприменения) значение. Факторы $X4$, $X5$ и $X6$ аналогичным образом содержат подфакторы.

Фактор $X4$ (соблюдение агротехнологических требований) включает в себя следующие подфакторы:

1) соблюдение сроков внесения удобрений (вегетативные периоды) (подфактор $X4.1$);

2) выдерживание сроков запашки удобрений после внесения (подфактор $X4.2$);

3) учет природно-климатических условий (уровень солнечной радиации, ветер, давление, осадки) при определении сроков выполнения производственных процессов (подфактор $X4.3$);

4) соблюдение агрономически обоснованной дозы внесения удобрений (подфактор $X4.4$).

Фактор $X5$ (соблюдение агроэкологических требований) включает в себя 3 подфактора:

1) соблюдение сроков временного складирования органических удобрений (подфактор $X5.1$);

2) соблюдение экологически безопасного расстояния от места временного складирования органических удобрений до водных объектов (подфактор Х5.2);

3) выбор типа почвы с минимальными фильтрационными свойствами для места временного складирования твердых органических удобрений (подфактор Х5.3).

Фактор Х6 (использование цифровых технологий в технологических процессах) включает в себя 3 подфактора:

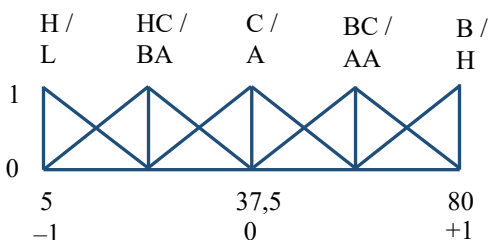
1) наличие внедренной системы мониторинга, контроля и принятия решений для эффективной реализации технологий внесения удобрений (подфактор Х6.1);

2) применение дифференцированного внесения удобрений в зависимости от типа почвы, расстояния до водных объектов, уклона полей, природоохранного статуса земель и т. п. (подфактор Х6.2)

3) использование цифровых паспортов полей (подфактор Х6.3).

Данная совокупность факторов и подфакторов выбрана с учетом системного подхода к изучаемому явлению: факторы Х1–Х3 характеризуют применяемые машинные технологии; Х4, Х5 – применяемые управленческие решения. Фактор Х6 характеризует эффективность контроля выполнения технологических операций и позволяет точно оценивать эффект от принимаемых решений. Для каждой лингвистической переменной были разработаны индивидуальные шкалы.

Для целевой функции и каждой факторной переменной (Х1–Х6) были построены шкалы, позволяющие соотносить лингвистические оценки экспертов, численные значения показателей и логические значения (–1 и +1). На рисунке 1 показана шкала для целевой функции У, которая содержит лингвистические значения.



Р и с. 1. Оппозиционная шкала для значений целевой функции: Н – низкий уровень поступления загрязняющих веществ в водные объекты; HC – уровень поступления ниже среднего; C – средний уровень поступления; BC – уровень поступления выше среднего; В – высокий уровень поступления загрязняющих веществ

F i g. 1. Oppositional scale for objective function values: L – low level of inputting pollutants in water bodies; BA – level of inputting pollutants in water bodies is below average; A – average level of inputting pollutants in water bodies; AA – the level of inputting pollutants in water bodies is above average; H – high level of inputting pollutants in water bodies

В дальнейшем использовались более точные лингвистические значения. Например, HC-C – значение уровня загрязнения, расположенное между уровнем HC (ниже среднего) и C (средний) (BA-A – below average – average), и HCC-C – уровень загрязнения, расположенный между уровнем HC-C и C (BAA-A – level between “below average – average” and “average” levels).

Лингвистическому значению Н соответствует логическое значение –1 и численное значение 5 (кг/га в год) – минимальное количество вымываемых биогенных элементов в водные объекты. Аналогичным образом строятся оппозиционные шкалы для каждой факторной переменной Х1–Х6.

Далее была сформирована опросная матрица, в которой экспертам было необходимо оценить негативное воздействие в зависимости от различных сочетаний значений выбранных факторов. Полная матрица содержит 32 строки сочетаний факторных значений, фрагмент заполненной матрицы представлен в таблице.

Т а б л и ц а
Table

Опросная матрица для сбора экспертных оценок (фрагмент)
Questionnaire matrix for collecting expert assessments (fragment)

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Y_{ling}	Y_{chisl}
-1	-1	-1	-1	-1	-1	H / L	86,7383
1	-1	-1	-1	-1	1	C-CBC / A-AAA	48,6525
-1	1	-1	-1	-1	1	HCC-C / BAA-A	57,4415
1	1	-1	-1	-1	-1	HC-C / BA-A	55,6837
-1	-1	1	-1	-1	1	C-CBC / A-AAA	54,5117
1	-1	1	-1	-1	-1	C / A	52,7539
-1	1	1	-1	-1	-1	HCC-C / BAA-A	61,5429
1	1	1	-1	-1	1	BC-B / AA-H	23,4571
-1	-1	-1	1	-1	1	HC-HCC / BA-BAA	62,7149
1	-1	-1	1	-1	-1	HCC-C / BAA-A	60,9571
-1	1	-1	1	-1	-1	H-HC / L-BA	69,7461
1	1	-1	1	-1	1	BCB-B / AAH-H	31,6603
-1	-1	1	1	-1	-1	HCC-C / BAA-A	66,8163
1	-1	1	1	-1	1	BC / AA	28,7305
-1	1	1	1	-1	1	C-CBC / A-AAA	37,5195
1	1	1	1	-1	-1	BC / AA	35,7617

Столбцы X_1 – X_6 заполнены логическими значениями -1 и $+1$ (соответствующими минимальным и максимальным значениям факторных переменных) согласно с положением метода Спесивцева – Дроздова. Эксперты заполнили матрицу лингвистическими оценками Y_{ling} , после чего они были переведены в численную форму Y_{chisl} с помощью шкалы Y (рис. 1).

Далее, проведя регрессионный анализ для столбца Y_{chisl} , получаем полиномиальное выражение, отражающее влияние факторов на уровень негативного воздействия на водные объекты:

$$Y = 47,4805 - 9,9609X_1 - 5,5664X_2 - 7,0313X_3 - 2,9297X_4 - 4,6875X_5 - 9,082X_6. \quad (1)$$

Адекватность модели была подтверждена с помощью коэффициента детерминации (R^2) и критерия Фишера. Было установлено, что $R^2 = 91,44\%$, то есть $91,44\%$ общей вариабельности Y объясняется изменением факторов X_1 – X_6 , что делает уравнение статистически значимым.

Аналогичным образом (путем формирования, заполнения и обработки опросных матриц) для факторов X_3 – X_6 были получены соответствующие полиномиальные уравнения, отражающие взаимосвязь между подфакторами и факторами:

$$X_3 = 0,0719 + 0,125X_{3.1} + 0,1406X_{3.2} + 0,2813X_{3.3} + 0,5313X_{3.4}, \quad (2)$$

$$X_4 = 0,04688 + 0,2656X_{4.1} + 0,3125X_{4.2} + 0,125X_{4.3} + 0,375X_{4.4}, \quad (3)$$

$$X5 = 0,125 + 0,125X5.1 + 0,5938X5.2 + 0,25X5.3, \quad (4)$$

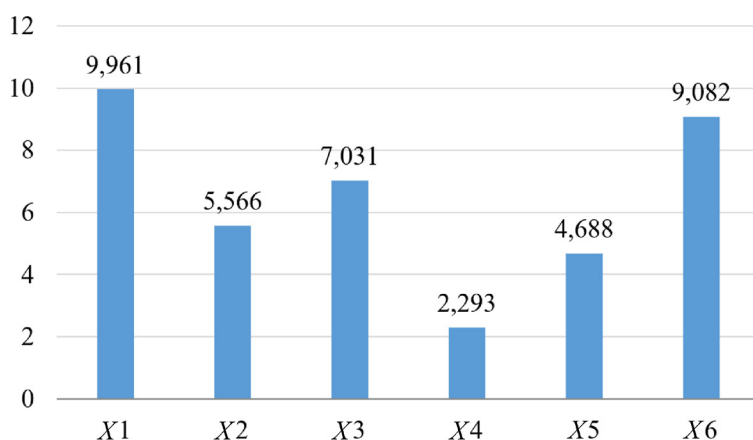
$$X6 = 0,1875 + 0,375X6.1 + 0,4375X6.2 + 0,1875X6.3. \quad (5)$$

Обсуждение и заключение

Полученная модель, состоящая из уравнений (1)–(5), может быть использована в практических целях для планирования, прогнозирования и модернизации сельхозпредприятий. Уравнения модели позволяют понять значимость факторов и подфакторов, влияющих на уровень негативного воздействия (диффузную нагрузку) на водные объекты. Важность каждого критерия может быть оценена на основе соответствующего весового коэффициента. Например, весовой коэффициент $X1$ имеет значение 9,9609, что в 3,4 раза больше значения весового коэффициента $X4$. Из этого можно сделать вывод, что значимость фактора $X1$ в 3,4 раза больше, чем фактора $X4$. Следовательно, замена технологии внесения удобрений (фактор $X1$) в 3,4 раза более эффективна, чем улучшение соблюдения агротехнологических требований (фактор $X4$).

На рисунке 2 показано сравнение всех весовых коэффициентов формулы (1), из которого следует, что наиболее значимым фактором негативного воздействия сельхозпроизводства на водные объекты является фактор $X1$ (технология внесения удобрений), чуть меньшую значимость имеет фактор $X6$ (использование цифровых технологий в технологических процессах), наименьшее значение имеет фактор $X4$ (соблюдение агротехнологических требований без нарушения норм и требований законодательства).

Использование созданной модели позволяет производить оценку текущего негативного воздействия сельхозпроизводства на водные объекты и прогнозировать уровень негативного воздействия, используя в качестве исходных данных ожидаемые в будущем значения факторных переменных, а также выбирать более эффективные пути снижения негативного воздействия путем выбора в качестве объектов воздействия наиболее значимых факторов и/или подфакторов.



Р и с. 2. Сравнение весовых коэффициентов факторных переменных

Fig. 2. Comparison of weighting coefficients of factor variables

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Байрамукова, С. Р. Воздействие предприятий агропромышленного комплекса на окружающую среду / С. Р. Байрамукова, В. Ю. Мешарова // Стратегия устойчивого развития регионов России. – 2015. – № 29. – С. 52–55. – URL: <https://clck.ru/U2G3o> (дата обращения: 01.09.2020).
2. Степанова, Л. П. Экологические проблемы земледелия / Л. П. Степанова, Е. Н. Цыганок, И. М. Тихойкина // Вестник ОрелГАУ. – 2012. – № 1. – С. 11–17. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-zemledeliya> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
3. Афанасьев, В. Н. Снижение негативного влияния машинных технологий в сельском хозяйстве на состояние окружающей среды / В. Н. Афанасьев, Н. П. Козлова, А. В. Афанасьев // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2013. – № 84. – С. 133–141. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22677100> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
4. Попов, В. Д. Экология сельхозпроизводства: проблемы и решения / В. Д. Попов, Д. А. Максимов, А. Ю. Брюханов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 3. – С. 43–48. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/138> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
5. Werf, H. M. G. Evaluation of the Environmental Impact of Agriculture at the Farm Level: A Comparison and Analysis of 12 Indicator-Based Methods / H. M. G. Werf, J. Petit. – DOI 10.1016/S0167-8809(01)00354-1 // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2002. – Vol. 93, Issue 1–3. – Pp. 131–145. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880901003541?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
6. Nootboom, S. Comparing Strategic Environmental Assessment and Integrated Environmental Assessment / S. Nootboom, K. Wieringa. – DOI 10.1142/S146433329900034X // Journal of Environmental Assessment Policy and Management. – 2012. – Vol. 1, no. 4. – Pp. 441–457. – URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S146433329900034X> (дата обращения: 01.09.2020).
7. Agelebe, D. Environmental Impact Assessment Systems / D. Agelebe, M. Prityi, J. Nielsen. – DOI 10.4324/9780429397615 // Environmental Law Across Cultures ; ed. by K. W. Junker. – 1st ed. – London : Routledge, 2019. – 41 p. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.4324/9780429397615/environmental-law-across-cultures-kirk-junker> (дата обращения: 01.09.2020).
8. Орлова, И. В. Оценка сельскохозяйственного воздействия на природные системы: теоретико-методологические подходы / И. В. Орлова, С. Н. Шарабарина // География и природные ресурсы. – 2015. – № 4. – С. 26–32. – URL: http://www.izdatgeo.ru/journal.php?action=output_more&id=3&lang_num=1&year=2015&issue=4&nodoi=1&page=26 (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
9. Canter, L. W. Environmental Impact of Agricultural Production Activities / L. W. Canter. – DOI 10.1201/9781351071796. – 1st ed. – Boca Raton : CRC Press, 1986. – 400 p. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781351071796/environmental-impact-agricultural-production-activities-larry-canter> (дата обращения: 01.09.2020).
10. Using the Integrated Ecosystem Assessment Framework to Build Consensus and Transfer Information to Managers / P. Fletcher, Ch. Kelble, W. Nuttle, G. Kiker. – DOI 10.1016/j.ecolind.2014.03.024 // Ecological Indicators. – 2014. – Vol. 44. – Pp. 11–25. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14001265?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
11. Environmental Impact Assessment of Agricultural Production Systems Using the Life Cycle Assessment Methodology: I. Theoretical Concept of a LCA Method Tailored to Crop Production / F. Brentrup, J. Küsters, H. Kuhlmann, J. Lammel. – DOI 10.1016/S1161-0301(03)00024-8 // European Journal of Agronomy. – 2004. – Vol. 20, Issue 3. – Pp. 247–264. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030103000248?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
12. Показатели негативного воздействия на окружающую среду при производстве сельскохозяйственной продукции / А. Ю. Брюханов, Е. В. Шалавина, Э. В. Васильев, Н. С. Обломкова. – DOI 10.24411/0131-5226-2019-10170 // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 2 (99). – С. 250–260. – URL: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10170> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.

13. **Sousa, P.** Ecosystem Services in Environmental Impact Assessment / P. Sousa, D. Gomes, N. Formigo. – DOI [10.1016/j.egy.2019.09.009](https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.009) // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6, Issue. 1. – Pp. 466–471. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719305268?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
14. **Wu, J.** Environmental Impact Assessment / J. Wu, I.-S. Chang. – DOI [10.1007/978-981-15-4894-9_42020](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4894-9_42020) // Environmental Management in China. – Singapore : Springer, 2020. – Pp. 35–62. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-15-4894-9_4 (дата обращения: 01.09.2020).
15. Environmental Impact Assessment of Farming with Combined Methods of Life Cycle Assessment and Farm Carbon Calculator / D. Su, J. Smith, Y. Wu, Z. Ren. – DOI [10.1007/978-3-030-39149-2_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39149-2_12) // Sustainable Product Development ; ed. by D. Su. – Cham : Springer, 2020. – Pp. 249–270. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-39149-2_12#citeas (дата обращения: 01.09.2020).
16. **Gomiero, T.** Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture / T. Gomiero, D. Pimentel, M. G. Paoletti. – DOI [10.1080/07352689.2011.554355](https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554355) // Critical Reviews in Plant Sciences. – 2011. – Vol. 30, Issue 1–2. – Pp. 95–124. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07352689.2011.554355> (дата обращения: 01.09.2020).
17. **Ferro, V.** Soil Sediment Loading and Related Environmental Impacts from Farms / V. Ferro. – DOI [10.1093/acrefore/9780199389414.013.267](https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.267). – Текст : электронный // Oxford Research Encyclopedias. – 2017. – URL: <https://oxfordre.com/environmentalscience/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-267> (дата обращения: 01.09.2020).
18. Environmental Assessment of Livestock Farms in the Context of BAT System Introduction in Russia / A. Briukhanov, E. Vasilev, N. Kozlova [et al.]. – DOI [10.1016/j.jenvman.2019.05.105](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.105) // Journal of Environmental Management. – 2019. – Vol. 246. – Pp. 283–288. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719307339?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
19. **Li, Y.** Agricultural Production Mode and Its Environmental Impact / Y. Li. – DOI [10.1142/9789811202919_0006](https://doi.org/10.1142/9789811202919_0006). – Текст : электронный // Environmental Economics Research and China's Green Development Strategy ; ed. by Y. Zhang. – 2020. – URL: https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789811202919_0006 (дата обращения: 01.09.2020).
20. **Karayel, D.** Environmental Impact of No-Tillage Farming / D. Karayel, E. Sarauskis. – DOI [10.5755/j01.irem.75.1.20861](https://doi.org/10.5755/j01.irem.75.1.20861). – Текст : электронный // Environmental Research, Engineering and Management. – 2019. – Vol. 75, no. 1. – URL: <https://irem.ktu.lt/index.php/irem/article/view/20861> (дата обращения: 01.09.2020).
21. **Гриднев, П. И.** Методология экологической оценки систем уборки и подготовки навоза к использованию / П. И. Гриднев, Т. Т. Гриднева, А. А. Шведов // Вестник ВНИИМЖ. – 2018. – Вып. 2 (30). – С. 159–167. – URL: <http://www.vniimzh.ru/images/material/Magazines/n30.pdf> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
22. Logical-Linguistic Model of Farm Organic Waste Recycling / A. Yu. Briukhanov, A. V. Trifanov, A. V. Spesivtsev [et al.]. – DOI [10.1109/SCM.2017.7970556](https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970556) // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – St. Petersburg : IEEE, 2017. – Pp. 265–267. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7970556> (дата обращения: 01.09.2020).
23. **Peigné, J.** Environmental Impacts of Farm-Scale Composting Practices / J. Peigné, P. Girardin. – DOI [10.1023/B:WATE.0000019932.04020.b6](https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000019932.04020.b6) // Water, Air, and Soil Pollution. – 2004. – Vol. 153. – Pp. 45–68. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FB%3AWATE.0000019932.04020.b6#citeas> (дата обращения: 01.09.2020).
24. Assessment of Urban Groundwater Vulnerability in Arid Areas: Case of Sidi Bouzid Aquifer (Central Tunisia) / G. Safa, C. Najiba, B. N. El Houda [et al.]. – DOI [10.1016/j.jafrearsci.2020.103849](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103849). – Текст : электронный // Journal of African Earth Sciences. – 2020. – Vol. 168. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X2030100X?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
25. Модель комплексной оценки экологической опасности и охраны труда в сельском хозяйстве в условиях развития органического земледелия / Н. Н. Новиков, Н. Т. Сорокин, Н. Н. Грачев [и др.]. – DOI [10.18470/1992-1098-2019-2-99-119](https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-2-99-119) // Юг России: экология, развитие. – 2019. – Т. 14, № 2. – С. 99–119. – URL: <https://ecodag.elpub.ru/ugro/article/view/1608> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.



26. **Mulyk, T.** Environmental Impact Assessment of Agriculture: A Regional Aspect / T. Mulyk. – DOI 10.31521/modecon.V19(2020)-22 // Modern Economics. – 2020. – Vol. 19. – Pp. 135–142. – URL: <https://modecon.mnau.edu.ua/en/environmental-impact-assessment-of-agriculture/> (дата обращения: 01.09.2020).
27. Environmental Impact Assessment of Agricultural Production in Chongming Ecological Island / Sh. Li, B. Huang, F. Zhao [et al.]. – DOI 10.1007/s11367-019-01614-w // The International Journal of Life Cycle Assessment. – 2019. – Vol. 24. – Pp. 1937–1947. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-019-01614-w> (дата обращения: 01.09.2020).
28. Achieving Good Environmental Status in the Black Sea: Scale Mismatches in Environmental Management / T. O'Higgins, A. Farmer, G. Daskalov [et al.]. – DOI 10.5751/ES-06707-190354 // Ecology and Society. – 2014. – Vol. 19, Issue 3. – Pp. 54. – URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol19/iss3/art54/> (дата обращения: 01.09.2020).
29. **Mushtaq, B.** Environmental Education and Environmental Impact Assessment / B. Mushtaq, S. A. Bandh, S. Shafi. – DOI 10.1007/978-981-15-3813-1_3 // Environmental Management. – Singapore : Springer, 2020. – Pp. 95–148. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-15-3813-1_3#citeas (дата обращения: 01.09.2020).
30. **Якунин, Д. А.** Прогнозы воздействия изменения климата на сельское хозяйство в Нижнем Поволжье / Д. А. Якунин, С. М. Мусаелян // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2011. – № 2 (22). – С. 80–86. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16452689> (дата обращения: 01.09.2020).
31. Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges / A. Yu. Briukhanov, A. V. Trifanov, A. V. Spesivtsev [et al.]. – DOI 10.1109/SCM.2016.7519716 // 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – St. Petersburg : IEEE, 2016. – Pp. 164–166. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7519716/metrics#metrics> (дата обращения: 01.09.2020).
32. Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве / А. Ю. Брюханов, И. А. Субботин, Е. В. Тимофеев, А. Ф. Эрк. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201903.366-382 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 366–382. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/715-10-15507-0236-2910-029-201903-3> (дата обращения: 01.09.2020).

Поступила 02.09.2020; одобрена после рецензирования 21.10.2020; принята к публикации 06.11.2020

Об авторах:

Субботин Игорь Александрович, научный сотрудник отдела инженерной экологии сельскохозяйственного производства Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филитровское ш., д. 3), Researcher ID: L-6130-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-9385>, itmo1652@mail.ru

Васильев Эдуард Вадимович, старший научный сотрудник отдела инженерной экологии сельскохозяйственного производства Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филитровское ш., д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: C-1304-2018, sznii6@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. А. Субботин – литературный обзор, методика, результаты, обсуждение, выводы.

Э. В. Васильев – формулировка и постановка задачи, определение критериев и сбор экспертных данных, обсуждение, выводы.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bayramukova S.R., Mesharova V.Yu. [The Impact of Agricultural Enterprises on the Environment]. *Strategiya ustoychivogo razvitiya regionov Rossii* = Strategy for Sustainable Development of Russian Regions. 2015; (29):52-55. Available at: <https://clck.ru/U2G3o> (accessed 01.09.2020). (In Russ.)
2. Stepanova L.P., Tsyganok Ye.N., Tikhoykina I.M. [Ecological Problems of Agriculture]. *Vestnik OrelGAU* = Vestnik OrelGAU (Bulletin of Agrarian Science). 2012; (1):11-17. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-zemledeliya> (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Afanassiev V.N., Kozlova N.P., Afanassiev A.V. Reducing Negative Environmental Impact of Machine-Based Technologies in Agriculture. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means for Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2013; (84):133-141. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22677100> (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Popov V.D., Maksimov D.A., Bryukhanov A.Yu. Agricultural Production Ecology: Problems and Solutions. *Selskhozajstvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2016; (3):43-48. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/138> (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Werf H.M.G., Petit J. Evaluation of the Environmental Impact of Agriculture at the Farm Level: A Comparison and Analysis of 12 Indicator-Based Methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2002; 93(1-3):131-145. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00354-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00354-1)
6. Nootboom S., Wieringa K. Comparing Strategic Environmental Assessment and Integrated Environmental Assessment. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*. 2012; 1(4):441-457. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1142/S146433329900034X>
7. Agelebe D., Prityi M., Nielsen J. Environmental Impact Assessment Systems. In: K.W. Junker, ed. *Environmental Law Across Cultures*. 1st ed. London: Routledge; 2019. 41 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429397615>
8. Orlova I.V., Sharabarina S.N. [Assessment of Agricultural Impact on Natural Systems: Theoretical and Methodological Approaches]. *Geografiya i prirodnye resursy* = Geography and Natural Resources. 2015; (4):26-32. Available at: http://www.izdatgeo.ru/journal.php?action=output_more&id=3&lang_num=1&year=2015&issue=4&nodoi=1&page=26 (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Canter L.W. *Environmental Impact of Agricultural Production Activities*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press; 1986. 400 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351071796>
10. Fletcher P., Kelble Ch., Nuttle W., Kiker G. Using the Integrated Ecosystem Assessment Framework to Build Consensus and Transfer Information to Managers. *Ecological Indicators*. 2014; 44:11-25. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.024>
11. Brentrup F., Küsters J., Kuhlmann H., Lammel J. Environmental Impact Assessment of Agricultural Production Systems Using the Life Cycle Assessment Methodology: I. Theoretical Concept of a LCA Method Tailored to Crop Production. *European Journal of Agronomy*. 2004; 20(3):247-264. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00024-8)
12. Bryukhanov A.Yu., Shalavina Ye.V., Vasilev E.V., Oblomkova N.S. Indicators of Negative Environmental Impact in Agri-Food Production. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means for Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2019; (2):250-260. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10170>
13. Sousa P., Gomes D., Formigo N. Ecosystem Services in Environmental Impact Assessment. *Energy Reports*. 2020; 6(1):466-471. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.009>
14. Wu J., Chang I.-S. Environmental Impact Assessment. In: *Environmental Management in China*. Singapore: Springer; 2020. p. 35-62. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4894-9_4
15. Su D., Smith J., Wu Y., Ren Z. Environmental Impact Assessment of Farming with Combined Methods of Life Cycle Assessment and Farm Carbon Calculator. In: D. Su, ed. *Sustainable Product*

Development. Cham: Springer; 2020. p. 249-270. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39149-2_12

16. Gomiero T., Pimentel D., Paoletti M.G. Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2011; 30(1-2):95-124. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554355>

17. Ferro V. Soil Sediment Loading and Related Environmental Impacts from Farms. In: Oxford Research Encyclopedias. 2017. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.267>

18. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N., et al. Environmental Assessment of Livestock Farms in the Context of BAT System Introduction in Russia. *Journal of Environmental Management*. 2019; 246:283-288. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.105>

19. Li Y. Agricultural Production Mode and Its Environmental Impact. In: Y. Zhang, ed. Environmental Economics Research and China's Green Development Strategy. 2020. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1142/9789811202919_0006

20. Karayel D., Sarauskis E. Environmental Impact of No-Tillage Farming. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2019; 75(1). 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5755/jol.erem.75.1.20861>

21. Gridnev P.I., Gridneva T.T., Shvedov A.A. Methodology of Manure Cleaning and Preparation for Using Systems' Ecological Assessment. *Vestnik VNIIMZh* = Journal of VNIIMZH. 2018; 2:159-167. Available at: <http://www.vniimzh.ru/images/material/Magazines/n30.pdf> (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

22. Briukhanov A.Yu., Trifanov A.V., Spesivtsev A.V., et al. Logical-Linguistic Model of Farm Organic Waste Recycling. In: 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Petersburg: IEEE; 2017. p. 265-267. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970556>

23. Peigné J., Girardin P. Environmental Impacts of Farm-Scale Composting Practices. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2004; 153:45-68. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000019932.04020.b6>

24. Safa G., Najiba C., El Houda B.N., et al. Assessment of Urban Groundwater Vulnerability in Arid Areas: Case of Sidi Bouzid Aquifer (Central Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*. 2020; 168. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103849>

25. Novikov N.N., Sorokin N.T., Grachev N.N., et al. Environmental Hazards and Labour Protection in Agriculture with the Organic Farming Development: A Model of Integrated Assessment. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie* = South of Russia: Ecology, Development. 2019; 14(2):99-119. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-2-99-119>

26. Mulyk T. Environmental Impact Assessment of Agriculture: A Regional Aspect. *Modern Economics*. 2020; 19:135-142. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V19\(2020\)-22](https://doi.org/10.31521/modecon.V19(2020)-22)

27. Li Sh., Huang B., Zhao F., et al. Environmental Impact Assessment of Agricultural Production in Chongming Ecological Island. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2019; 24:1937-1947. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01614-w>

28. O'Higgins T., Farmer A., Daskalov G., et al. Achieving Good Environmental Status in the Black Sea: Scale Mismatches in Environmental Management. *Ecology and Society*. 2014; 19(3):54. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5751/ES-06707-190354>

29. Mushtaq B., Bandh S.A., Shafi S. Environmental Education and Environmental Impact Assessment. In: Environmental Management. Singapore: Springer; 2020. p. 95-148. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3813-1_3

30. Yakunin D.A., Musaelyan S.M. [Projections of Climate Change Impacts on Agriculture in the Lower Volga Region]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2011; (2):80-86. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16452689> (accessed 01.09.2020). (In Russ.)

31. Briukhanov A.Yu., Trifanov A.V., Spesivtsev A.V., et al. Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges. In: 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing

and Measurements (SCM). St. Petersburg: IEEE; 2016. p. 164-166. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519716>

32. Briukhanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev E.V., Erk A.F. Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):366-382. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>

Submitted 02.09.2020; approved after reviewing 21.10.2020; accepted for publication 06.11.2020

About the authors:

Igor A. Subbotin, Researcher at the Department of Engineering Ecology of Agricultural Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Researcher ID: [L-6130-2015](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-9385>, itmo1652@mail.ru

Eduard V. Vasilev, Senior Researcher at the Department of Engineering Ecology of Agricultural Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: [C-1304-2018](#), sznii6@yandex.ru

Contribution of the authors:

I. A. Subbotin – literature review, methodology, results, discussion and conclusions.

E. V. Vasilev – formulating the problems, setting the objectives, defining the criteria, collecting expert data, discussing and making conclusions.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the anonymous reviewers.

All authors have read and approved the final manuscript.



Информационно-прогнозная модель температурно-влажностного режима коровника

В. Ф. Вторый*, С. В. Вторый, В. В. Гордеев

*Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства – филиал
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)*

*vvtoryj@yandex.ru

Введение. Информационно-прогнозное моделирование является эффективным инструментом оптимизации параметров внутреннего климата с целью полного использования потенциала коров. Несоблюдение требований климата коровника может привести к снижению лактационной способности на 10–30 %. Целью исследования было создание информационно-прогнозной модели формирования внутреннего климата на основе экспериментальных данных.

Материалы и методы. Была разработана 24-часовая система измерения соответствующих климатических переменных с 10-минутным интервалом записи данных. Она включала в себя девять сенсорных блоков, три устройства записи хранения данных и общий блок питания. Замеры проводились в коровнике на 200 голов в Ленинградской области.

Результаты исследования. Согласно результатам летних исследований некоторые участки коровника при высокой относительной влажности воздуха имели температурно-влажностный индекс >75 , то есть неблагоприятный для животных. Этот период мог длиться до 18 часов в сутки. В дневное время при индексе >80 внутренняя среда может стать критической и сопровождаться резким снижением продуктивности коров. Получены корреляционные модели температурного режима коровника, и рассчитаны их зависимости от температуры внутри и снаружи помещения и влажности воздуха.

Обсуждение и заключение. Создана информационно-прогнозная модель, описывающая формирование температурно-влажностного режима внутри коровника в зависимости от погодных условий. При постоянном обновлении базы данных в режиме реального времени модель позволяет контролировать температуру и влажность в коровнике и прогнозировать эти переменные на ближайшие несколько дней. Соответствующие данные визуализируются в режиме реального времени на мониторах и информационных панелях для персонала и специалистов, принимающих своевременные управленческие решения по предотвращению критических ситуаций, связанных с перегревом или переохлаждением животных.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, коровник, микроклимат, температура, влажность воздуха, температурно-влажностный индекс

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Вторый, В. Ф. Информационно-прогнозная модель температурно-влажностного режима коровника / В. Ф. Вторый, С. В. Вторый, В. В. Гордеев. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.241-256](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.241-256) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 241–256.

© Вторый В. Ф., Вторый С. В., Гордеев В. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

The Information Predictive Model of Creating Temperature and Humidity Conditions in Cow Barns

V. F. Vtoryi*, S. V. Vtoryi, V. V. Gordeev

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

*vvtoryj@yandex.ru

Introduction. Information-predictive modeling is an effective tool for optimizing the indoor climatic variables to make full use of cow potential. Noncompliance with barn climate requirements may result in 10–30% lower lactation capacity. The research aimed at creating an information model of indoor climate formation based on experimental findings.

Materials and Methods. A 24-hour measuring system of relevant climate variables with a 10-minutes data recording interval was designed. It included nine sensor units, three data recording/storing devices and a common power unit. Measurements took place in a dairy cow barn for 200 head in the Leningrad Region.

Results. According to the summer study results, certain areas in the cow barn at high relative humidity had Temperature Humidity Index >75 , i.e. were unfavorable for animals. This period may last up to 18 hours a day. In the daytime at Temperature Humidity Index >80 , the indoor environment might become critical and be accompanied by a drastic decrease in milk cow productivity. Correlation models for temperature conditions in a cow barn are obtained and their dependence on indoor and outdoor temperature and air humidity are calculated.

Discussion and Conclusion. An information predictive model was created to describe the formation of temperature and humidity conditions inside cow barns, depending on weather conditions. Under constant real-time database updating, the model allows monitoring the temperature and humidity in cow barns and forecasting these variables for the next few days. The relevant data are visualized in real-time on monitors and information panels for personnel and specialists supporting the timely managerial decisions to prevent critical situations associated with overheating or hypothermia of animals.

Keywords: cattle, cow barn, indoor climate, air temperature, air humidity, Temperature Humidity Index

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

For citation: Vtoryi V.F., Vtoryi S.V., Gordeev V.V. The Information Predictive Model of Creating Temperature and Humidity Conditions in Cow Barns. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):241-256. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.241-256>

Введение

Глобальные изменения климата Земли оказывают существенное влияние на сельскохозяйственное производство, формируют новые требования и условия для содержания домашних животных и птицы. Это относится и к молочному животноводству. Особенность содержания домашних животных и крупного рогатого скота заключается в том, что они находятся в ограниченных человеком

условиях и в меньшей степени обладают возможностями к естественной адаптации. Реализация их генетического потенциала напрямую зависит от человека [1].

Создание благоприятных условий содержания молочного скота, обеспечение соответствующих параметров микроклимата в животноводческих помещениях является необходимым условием для обеспечения высокой продуктивности коров [2].

В настоящее время крупный рогатый скот Ленинградской области имеет высокий генетический потенциал молочной продуктивности, уровень реализации которого зависит от технологии содержания и обслуживания животных. Обеспечение комфортного состояния воздушной среды в коровнике по своему значению стоит на втором месте после кормления. Однако, по нашим наблюдениям, на многих молочных фермах и комплексах обеспечению параметров микроклимата не уделяется должного внимания. Одним из основных параметров является температурно-влажностный режим в коровнике. Его несоблюдение влечет за собой значительные потери продуктивности, особенно в зимний и летний периоды.

Микроклимат коровника формирует ряд факторов. Внутренние – животные выделяют продукты своей жизнедеятельности (тепло, пары воды, углекислый газ, аммиак, сероводород). Внешние – обусловленные зональными природно-климатическими условиями. Взаимовлияние этих факторов – сложный процесс, находящийся в постоянном движении [3].

Современные информационные технологии позволяют эффективно управлять системами обеспечения микроклимата. Зная текущее состояние параметров и закономерности формирования микроклимата, можно управлять этим процессом, не допуская стрессовых ситуаций для животных. В связи с этим исследование закономерностей формирования микроклимата, методов математического моделирования с разработкой цифровых систем управления – актуальная задача.

Цель исследования – разработать информационно-прогностную модель температурно-влажностного режима коровника, используя результаты экспериментальных исследований.

Обзор литературы

Зарубежные и отечественные ученые уделяют пристальное внимание вопросам влияния условий содержания на продуктивность крупного рогатого скота, обеспечения требуемых параметров микроклимата в животноводческих помещениях. Для управления автоматизированными системами создания микроклимата разрабатываются математические модели и компьютерные программы, учитывающие прогноз воздействия ряда факторов на процесс формирования воздушной среды в коровнике.

В первую очередь к нормируемым параметрам относятся температура и относительная влажность воздуха в коровнике [4]. Отклонения вызывают пониженное потребление сухого вещества, нарушение метаболизма, проблемы развития плода у стельных коров [5; 6].

Тепловой стресс, вызванный понижением или повышением температуры, оказывает существенное влияние на коров, снижает их продуктивность. Так, в период лактации это снижение может достигать 25–40 % [7].

Даже незначительные колебания температур воздуха внутри коровника сказываются на изменении продуктивности животных на 5–10 % [8].

В методических рекомендациях Министерства сельского хозяйства указано, что в стойлах, боксах, комби-боксах расчетная температура воздуха должна составлять 10 ± 2 °C при относительной влажности 40–75 % [4].

В молочном скотоводстве для оценки наличия стрессового состояния животных под влиянием температуры и влажности воздуха применяется температурно-влажностный индекс (ТНІ) [9–12].

Принято считать, что тепловой стресс у коров наступает при ТНІ >74, а при ТНІ >84 возникает критическое

состояние животного с серьезными последствиями для его здоровья. Исследования показали, что удой начинает снижаться при значениях индекса ТНІ = 65, а при ТНІ от 65 до 73 потери молока достигали 2,2 кг в сутки [4; 13].

Разрабатываются и другие тепловые индексы для молочного скота. Например, эквивалентный температурный индекс (ЕТИС), в котором учитываются во взаимодействии температура, относительная влажность и скорость движения воздуха, солнечная радиация [14].

Существенное влияние на формирование микроклимата, наряду с внешними климатическими факторами, оказывают объемно-планировочные и конструктивные решения зданий и технология содержания и обслуживания животных¹ [15].

Длина, ширина, высота коровника составляют десятки метров, что может влиять на микроклимат в различных зонах помещения. Наиболее неблагоприятным является микроклимат в центре коровника [16].

Для эффективного управления микроклиматом на молочных фермах необходимо моделирование и создание автоматизированных систем для информирования о состоянии процессов. Однако ощущается большой недостаток теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих разрабатывать модели, приемлемые для практического использования [17; 18].

Необходимо специализированное программное обеспечение, учитывающее зональные климатические условия, продуктивные и физиологические особенности местного молочного скота, технологии его содержания и обслуживания [19].

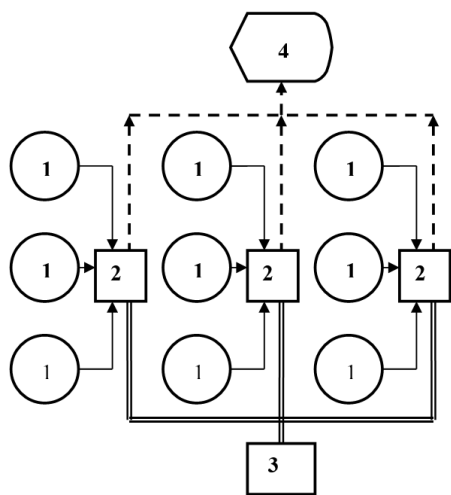
Материалы и методы

Исходными данными для разработки модели стали результаты исследований температурно-влажностных режимов воздуха в четырехрядном коровнике на 200 дойных коров с привязным, подстильным содержанием, трехразовым доением на установке типа «Молокопровод», мобильной раздачей кормов, стационарной системой уборки навоза. Система вентиляции естественная с притоком через боковые окна и вытяжкой через вентиляционно-световой конек в центре коровника. Строение расположено в Волоховском районе Ленинградской области.

Основными контролируемыми параметрами микроклимата являются температура и относительная влажность воздуха, для чего используются специальные измерительные системы, расположенные непосредственно в коровнике [20–23]. Характерной особенностью этих систем является то, что они имеют один измерительный модуль, который устанавливается стационарно в одной точке. Такая система не позволяет одновременно в режиме реального времени измерять параметры микроклимата по всему помещению, имеющему существенную разницу измеряемых величин в различных его точках.

Разработанная нами система измерения параметров микроклимата коровника предусматривает регистрацию температуры и относительной влажности воздуха одновременно по всему помещению. Система имеет 9 точек установки комплектов датчиков, распределенных по длине и ширине коровника на высоте 2,5 м над стойлами животных (рис. 1) [24]. Система работает круглосуточно в режиме реального времени с интервалом опроса датчиков 10 минут [4].

¹ Mylostyyvi R., Sejian V., Hoffmann G. Problems Related to Ensuring the Cow Comfort in Uninsulated Cowsheds during the Hot Season // Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference AWCGCC, 21–22 April 2020, Dnipro. Dnipro, 2020. Pp. 75–77. URL: https://www.researchgate.net/publication/341114318_PROBLEMS_RELATED_TO_ENSUREING_THE_COW_COMFORT_IN_UNINSULATED_COWSHEDS_DURING_THE_HOT_SEASON#fullTextFileContent (дата обращения: 01.03.2021).



Р и с. 1. Схема системы измерения параметров микроклимата коровника: 1 – датчики температуры и влажности воздуха; 2 – устройство регистрации и архивации данных; 3 – блок электропитания системы; 4 – компьютер специалиста

F i g. 1. Diagram of the measuring system for the indoor climate variables in a cow barn: 1 – temperature and humidity sensors; 2 – data recording and storing device; 3 – power supply unit; 4 – specialist's PC

Система для измерения параметров микроклимата имеет блочную структуру и состоит из девяти блоков датчиков, трех блоков регистрации-архивации и общего блока питания [24]. Датчики равномерно распределены по площади фермы, что обеспечивает регистрацию параметров в различных точках помещения в зависимости от объемно-планировочного решения, технологии содержания и обслуживания животных. Блок состоит из датчика температуры и влажности AM2320 [25]. Датчики позволяют измерять температуру в диапазоне от -40 до $+80$ °C с максимальной погрешностью $\pm 0,5$ °C и разрешением шкалы $0,1$ °C, относительную влажность $0-99,9$ % – с максимальной

погрешностью ± 3 % и разрешением шкалы $0,1$ %. Блок регистратора-архиватора представляет собой устройство, созданное из электронных компонентов с микроконтроллером Atmel 328, и работает в соответствии с программой [24].

Данные из регистратора-архиватора раз в 2 недели заносятся в компьютер, обрабатываются в программе Excel и оформляются в графическом и табличном форматах для дальнейшего анализа².

Данные о текущих и прогнозных климатических условиях (температуре и относительной влажности окружающего воздуха, скорости и направлении ветра, атмосферном давлении, количестве выпавших осадков и др.) получены с региональной государственной метеостанции с интервалом в 3 часа.

Результаты исследования

Все модели формирования микроклимата животноводческого помещения можно разделить на три вида. Во-первых, модели, использующие физические принципы термо-, гидро- и газодинамики. Они состоят из сложных дифференциальных уравнений с использованием различных коэффициентов, учитывающих особенности конкретного объекта [25]. Во-вторых, модели, построенные на результатах измерений. Они учитывают условия содержания и способность живых организмов адаптироваться к этим условиям, поддерживая свою жизнедеятельность и полезные человеку продуктивные свойства. В-третьих, на практике часто встречаются модели, построенные на теоретических зависимостях и результатах измерений, так называемые «гибридные модели» [25].

Животноводческие фермы – это сложные биотехнические, динамические системы, поэтому в нашей модели использованы принципы построения

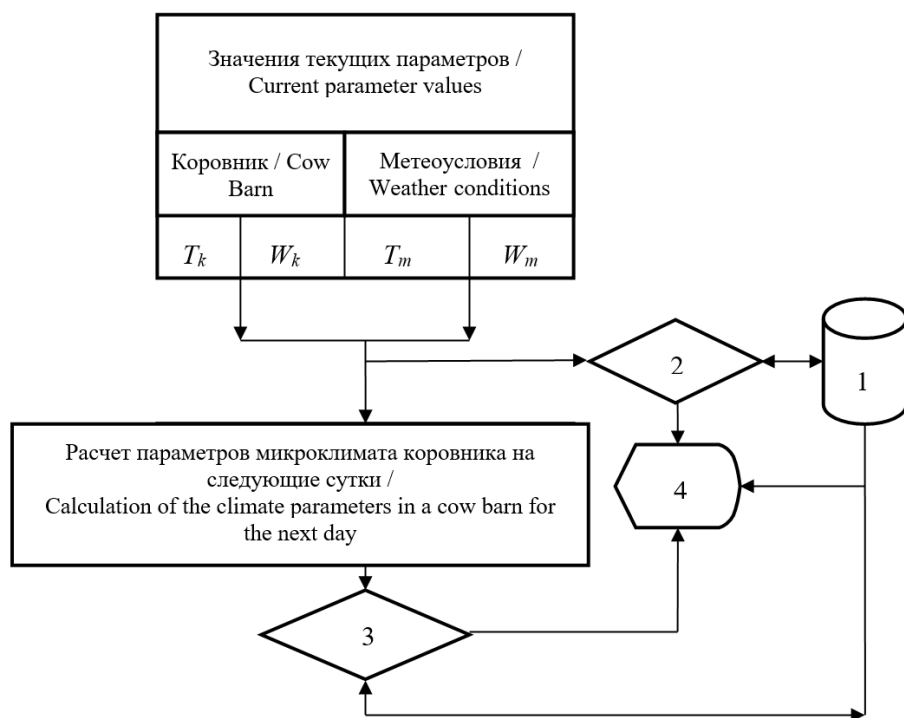
² Валге А. М. Использование систем Excel и Mathcad при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства (Методическое пособие). СПб: ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии, 2013. 200 с.

гибридных моделей. Функциональная схема модели температурно-влажностного режима коровника представлена на рисунке 2.

Исходными данными модели являются значения текущих параметров микроклимата, поступающие в режиме реального времени с соответствующих датчиков, установленных в коровнике. Количество датчиков может быть различным, но минимальное количество датчиков температуры воздуха не менее 7, датчиков относительной влажности воздуха не менее 3 в зависимости от объемно-планировочного решения

помещения для содержания животных. К исходным данным относятся текущие погодные условия и прогноз на 10 суток.

База знаний 1 содержит нормативно-справочную информацию для выполнения технологических процессов, архив данных за предшествующие периоды. В блоке анализа 2 выполняются операции сравнения текущих информативных значений параметров микроклимата. В блоке анализа 3 выполняются операции сравнения расчетных значений параметров микроклимата на соответствие установленным нормативам.



Р и с. 2. Функциональная схема модели температурно-влажностного режима коровника: T_k – температура коровника; W_k – влажность коровника; T_m – температура наружного воздуха; W_m – влажность наружного воздуха; 1 – база знаний; 2 – блок анализа текущих значений параметров микроклимата; 3 – блок анализа расчетных параметров микроклимата; 4 – компьютер специалиста

F i g. 2. Functional diagram of the temperature and humidity model of a cow barn: T_k – cow barn temperature; W_k – cow barn humidity; T_m – outdoor temperature; W_m – outdoor humidity; 1 – knowledge base; 2 – block for analyzing the current indoor climate variables; 3 – block for analyzing the estimated indoor climate variables; 4 – specialist's PC

Результат анализа транслируется на компьютер специалиста 4 для принятия управленческих решений и архивируется в базе знаний 1.

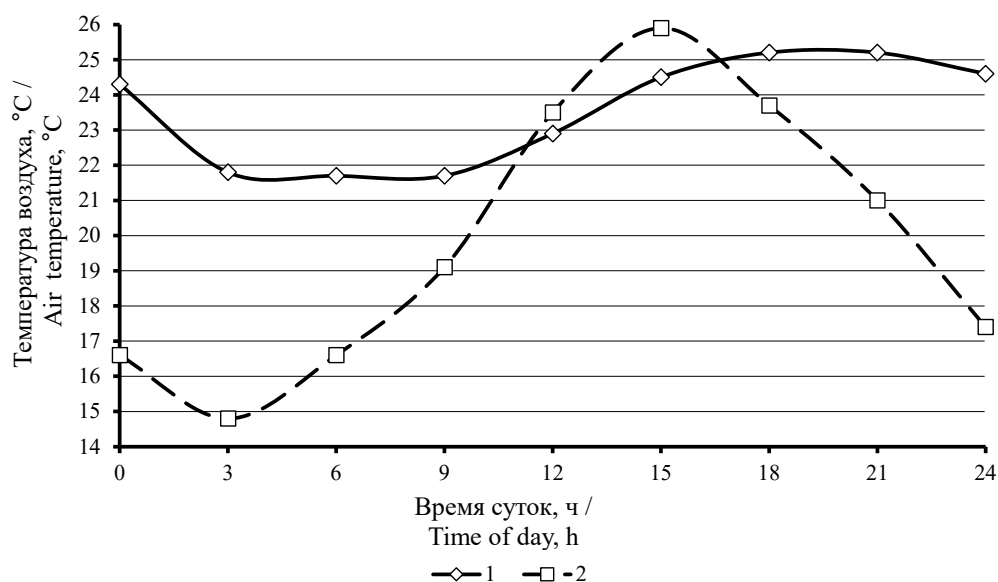
В качестве примера на рисунках 3 и 4 в графической форме представлены результаты суточного мониторинга температуры и относительной влажности воздуха в коровнике с учетом внешних погодных условий с временным интервалом 3 часа [4]. Значения параметров микроклимата в коровнике рассчитываются как среднее с 9 точек измерения. Данные о состоянии параметров микроклимата в коровнике и метеоусловиях в режиме реального времени отражаются на мониторах и информационных панелях персонала и специалистов.

На рисунке 5 представлены экспериментальные зависимости температуры воздуха внутри коровника от

температуры наружного воздуха для конкретной фермы по результатам мониторинга в течение года. График предоставляет возможность определить верхние и нижние границы температуры воздуха в коровнике при изменении температуры наружного воздуха.

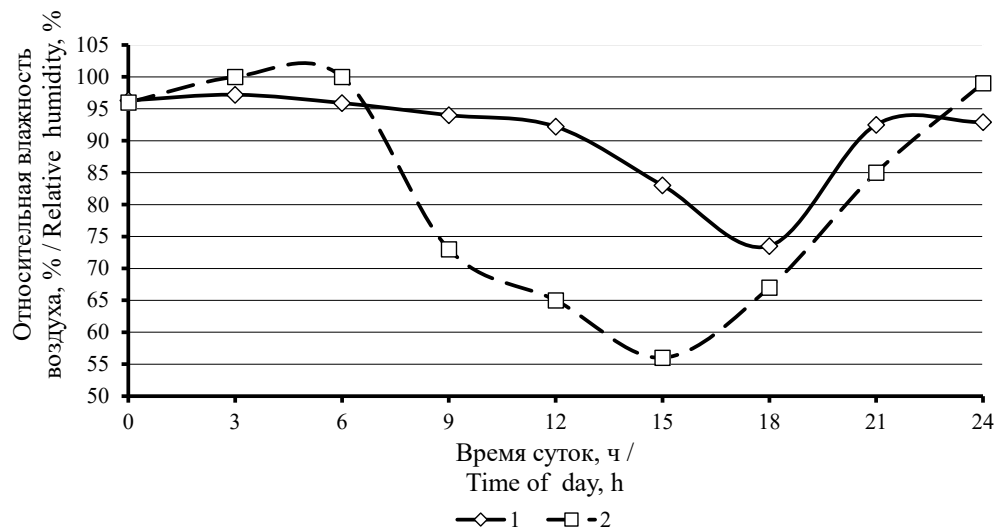
В холодный (зимний) период года особое значение имеет определение нижней границы, чтобы не допустить переохлаждения животных, заморзания систем поения и уборки навоза. В теплый (летний) период верхней границей является вероятность наступления перегрева животных в отдельных неблагоприятных зонах коровника.

В результате исследований получены корреляционные модели формирования температурного режима коровника (1)–(3) в зависимости от температуры наружного воздуха.



Р и с. 3. Температурный режим в коровнике за текущие сутки:
1 – средняя температура воздуха в коровнике в течение суток, °C;
2 – средняя температура наружного воздуха в течение суток, °C

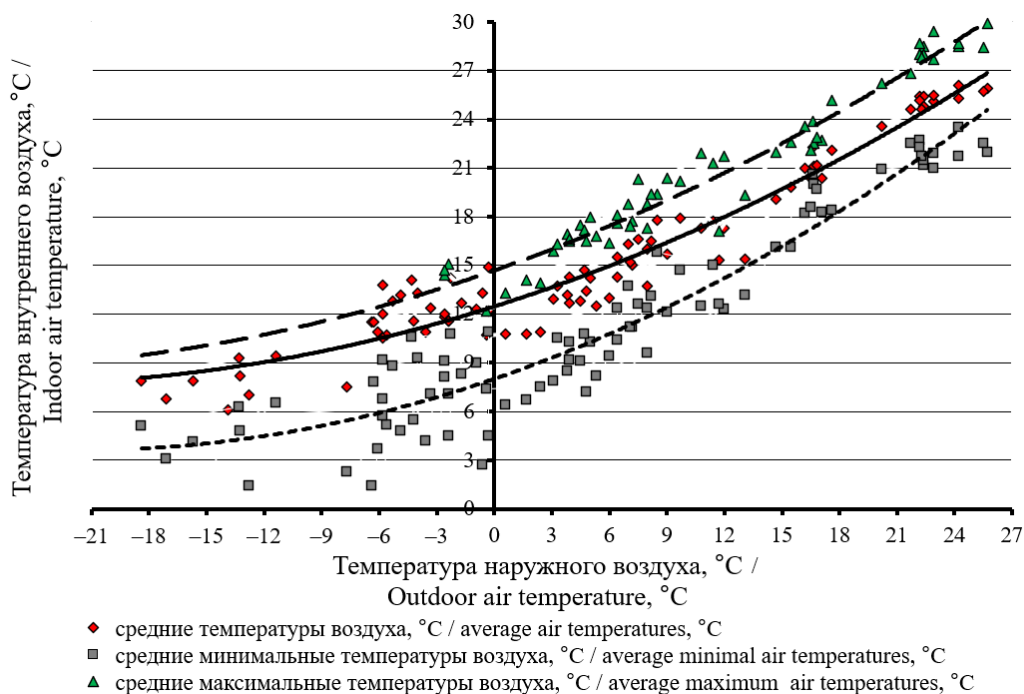
Fig. 3. Cow barn temperature for the current day: 1 – average air temperature in the cow barn during the day, °C; 2 – average outdoor air temperature during the day, °C



Р и с. 4. Влажностный режим в коровнике за текущие сутки:

- 1 – средняя относительная влажность воздуха в коровнике в течение суток, %;
2 – средняя относительная влажность наружного воздуха в течение суток, %

F i g. 4. Barn air humidity for the current day: 1 – average relative air humidity in the cow barn during the day, %; 2 – average relative humidity of the outdoor air during the day, %



Р и с. 5. Зависимость температуры воздуха внутри коровника от температуры наружного воздуха

F i g. 5. Dependence of the air temperature in a cow barn on the outdoor air temperature

$$T_{\text{в.ср.}} = 0,0073 \cdot T_{\text{н.ср.}}^2 + 0,3727 \cdot T_{\text{н.ср.}} + 12,47$$

при $R^2 = 0,951$, (1)

$$T_{\text{в.ср.}}^{\min} = 0,0093 \cdot T_{\text{н.ср.}}^2 + 0,4054 \cdot T_{\text{н.ср.}} + 8,0103$$

при $R^2 = 0,940$, (2)

$$T_{\text{в.ср.}}^{\max} = 0,0071 \cdot T_{\text{н.ср.}}^2 + 0,4151 \cdot T_{\text{н.ср.}} + 14,69$$

при $R^2 = 0,905$, (3)

где $T_{\text{в.ср.}}$ – средняя температура воздуха в коровнике, °C; $T_{\text{в.ср.}}^{\max}$ – средняя минимальная температура воздуха в коровнике, °C; $T_{\text{в.ср.}}^{\min}$ – средняя максимальная температура воздуха в коровнике, °C; $T_{\text{н.ср.}}$ – средняя температура наружного воздуха, °C.

В соответствии с моделями (1)–(3) рассчитаны значения температуры на следующие сутки с учетом прогноза внешних погодных условий. На рисунке 6 результаты этих расчетов представлены в графической форме.

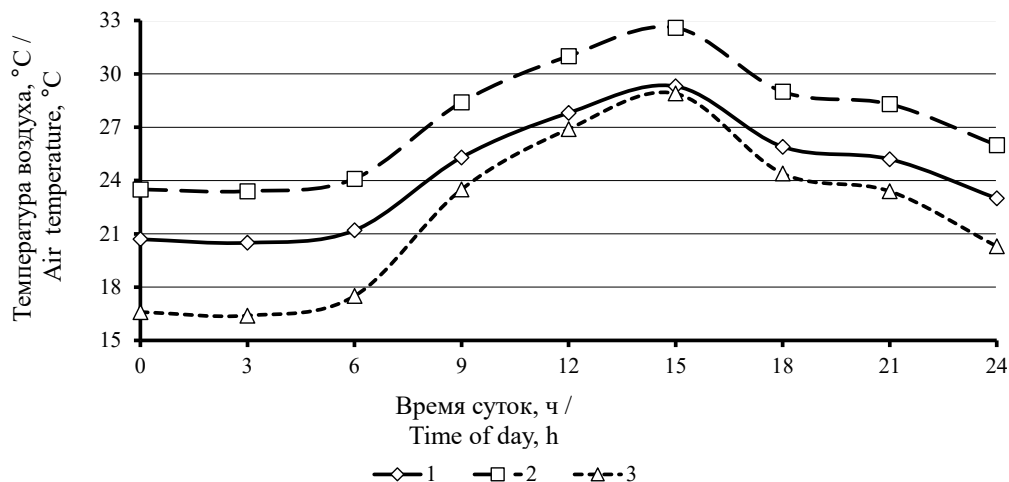
Из графика (рис. 6) видно, что с 9 до 18 часов ожидается неблагоприятный микроклимат в коровнике и необходимо предусмотреть мероприятия по

снижению температуры, организации активного воздухообмена в помещении.

Использование постоянного мониторинга функционирования фермы позволяет формировать модели и управлять микроклиматом коровника с учетом прогноза погоды на ближайшие сутки, изменяющихся внешних условий, технологии содержания и обслуживания животных. Расчет ожидаемых параметров микроклимата фермы на следующие сутки, с учетом прогноза температуры наружного воздуха, позволит учесть вероятность возникновения критических ситуаций как в зимнее (низкие температуры), так и в летнее (высокие температуры) время.

В молочном скотоводстве для оценки совокупного влияния температуры и влажности воздуха, оценки стрессового состояния животного применяется индекс температуры и влажности THI и рассчитывается по зависимости (4) [4; 10]:

$$\text{THI} = t_{\text{аб}} + 0,36t_{\text{дп}} + 41,2, (4)$$



Р и с. 6. Расчетные значения температуры воздуха в коровнике на следующие сутки: 1 – ожидаемая средняя температура в коровнике, °C; 2 – ожидаемая максимальная температура в коровнике, °C; 3 – ожидаемая средняя температура наружного воздуха, °C

Fig. 6. Estimated values of air temperature in the cow barn for the next day: 1 – expected average air temperature in the cow barn, °C; 2 – expected maximal air temperature in the cow barn, °C; 3 – expected maximal outdoor air temperature, °C

где t_{ab} – температура по сухому термометру, °C; t_{dp} – точка росы, °C.

Нижний порог наступления стрессового состояния для молочного скота наблюдается при $ТНІ > 74$; при $74 \leq ТНІ < 79$ – стрессовое состояние; $79 \leq ТНІ < 84$ – опасное стрессовое состояние; $ТНІ > 84$ – критическая ситуация, требующая немедленного принятия мер [26].

В результате исследований получена корреляционная модель (5) зависимости $ТНІ$ от температуры и относительной влажности воздуха в исследуемом коровнике:

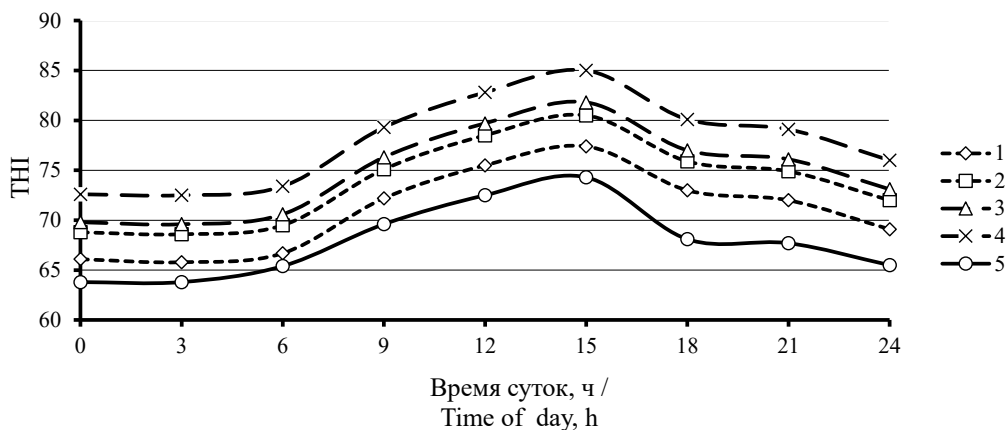
$$\begin{aligned} ТНІ = 34,4809 + 1,25867 \cdot T + \\ + 0,0706107 \cdot W + 0,00105114 \cdot T \cdot W \\ \text{при } R^2 = 0,999, \end{aligned} \quad (5)$$

где T – температура воздуха в коровнике в пределах от 10 до 30 °C;

W – относительная влажность воздуха в коровнике в пределах от 50 до 100 %.

В соответствии с зависимостью (5) и температурным прогнозом (рис. 6) произведен расчет индекса $ТНІ$ на следующие сутки для исследуемого коровника. Результаты расчетов представлены в виде графической модели на рисунке 7. Расчеты выполнены для диапазона относительной влажности воздуха в коровнике 60–90 % [4].

Анализ графика (рис. 7) свидетельствует о том, что неблагоприятный для животных температурно-влажностный режим $ТНІ > 75$ в отдельных зонах коровника при высокой относительной влажности воздуха может присутствовать до 18 часов в сутки. В дневное время при $ТНІ > 80$ температурно-влажностный режим в коровнике может стать критическим и сопровождаться резким снижением молочной продуктивности коров.



Р и с. 7. Расчетные значения температурно-влажностного индекса на следующие сутки: 1 – значения $ТНІ$ в коровнике при средней температуре и относительной влажности воздуха 60 %; 2 – значения $ТНІ$ в коровнике при средней температуре и относительной влажности воздуха 90 %; 3 – значения $ТНІ$ в коровнике при максимальной температуре и относительной влажности воздуха 60 %; 4 – значения $ТНІ$ в коровнике при максимальной температуре и относительной влажности воздуха 90 %; 5 – значения $ТНІ$ вне коровника

Fig. 7. Calculated values of the temperature and humidity index for the next day: 1 – THI in the cow barn under the average air temperature and relative humidity of 60%; 2 – THI in the cow barn under the average air temperature and relative humidity of 90%; 3 – THI in the cow barn under the maximal air temperature and relative humidity of 60%; 4 – THI in the cow barn under the maximal air temperature and relative humidity of 90%; 5 – THI outside the cow barn

Снизить влияние теплового стресса можно организацией повышенного воздухообмена коровника или выгулом скота на площадках, оборудованных солнцезащитными навесами, при поении животных водой.

Обсуждение и заключение

Разработана система для круглосуточного измерения параметров микроклимата, состоящая из девяти блоков датчиков, трех блоков регистрации-архивации и общего блока питания [24]. Интервал записи данных в регистратор-архиватор составляет 10 минут с дальнейшей аналитической обработкой в программе Excel.

С использованием системы измерения параметров микроклимата проведены экспериментальные исследования температурно-влажностных режимов в коровнике на 200 голов [4]. В результате исследований получены

корреляционные модели формирования температурного режима коровника и расчета ТНІ в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха коровника и наружного воздуха.

Разработана информационно-прогнозная модель формирования температурно-влажностных режимов внутри коровника в зависимости от внешних погодных условий. Модель позволяет при постоянно обновляемой базе данных в режиме реального времени контролировать состояние температурно-влажностного режима коровника, формировать прогноз состояния параметров микроклимата на ближайшие несколько суток. Это поможет заблаговременно принимать управленческие решения при критических ситуациях, связанных с перегревом или переохлаждением животных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Милостивий, Р. В. Добробут молочної худоби в умовах глобальних кліматичних змін / Р. В. Милостивий, В. Седжіан. – DOI [10.32819/2019.71009](https://doi.org/10.32819/2019.71009) // Theoretical and Applied Veterinary Medicine. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 47–55. – URL: <https://bulletin-biosafety.com/index.php/journal/article/view/214> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.
2. Иванов, Ю. А. Повышение качества среды обитания животных на основе совершенствования управления оборудованием систем микроклимата / Ю. А. Иванов, Н. Н. Новиков // Вестник ВНИИМЖ. – 2013. – № 3 (11). – С. 44–51. – URL: <https://clck.ru/UJW8J> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.
3. Вторый, В. Ф. Исследования температурно-влажностного режима коровника в зимне-весенний период / В. Ф. Вторый, С. В. Вторый, Р. М. Ильин. – DOI [10.24411/2078-1318-2019-11134](https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11134) // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 1 (54). – С. 134–140. – URL: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11134> (дата обращения: 01.03.2021).
4. Оценка состояния температурно-влажностного режима в коровнике с использованием графического информационного моделирования / В. Ф. Вторый, В. В. Гордеев, С. В. Вторый, Е. О. Ланцова / Вестник ВНИИМЖ. – 2016. – № 4 (24). – С. 67–72. – URL: <https://clck.ru/UJZK6> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.
5. Dahl, G. E. Effects of Late-Gestation Heat Stress on Immunity and Performance of Calves / G. E. Dahl, S. Tao, A. P. A. Monteiro. – DOI [10.3168/jds.2015-9990](https://doi.org/10.3168/jds.2015-9990) // Journal of Dairy Science. – 2016. – Vol. 99, Issue 4. – Pp. 3193–3198. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030216000576?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).
6. Herbut, P. Environmental Parameters to Assessing of Heat Stress in Dairy Cattle – a Review / P. Herbut, S. Angrecka, J. Walczak. – DOI [10.1007/s00484-018-1629-9](https://doi.org/10.1007/s00484-018-1629-9) // International Journal of

Biometeorology. – 2018. – Vol. 62, Issue 12. – Pp. 2089–2097. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-018-1629-9> (дата обращения: 01.03.2021).

7. Symposium Review: The Influences of Heat Stress on Bovine Mammary Gland Function / S. Tao, R. M. Orellana, X. Weng [et al.]. – DOI 10.3168/jds.2017-13727 // Journal of Dairy Science. – 2018. – Vol. 101, Issue 6. – Pp. 5642–5654. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030218300195?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).

8. **Второй, С. В.** Влияние внешних погодных условий на продуктивность коров при привязном содержании / С. В. Второй, Р. М. Ильин. – DOI 10.24411/0131-5226-2019-10172 // АгроЭкоИнженерия. – 2019. – № 2 (99). – С. 269–277. – URL: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10172> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

9. Daily Rumination Time of Lactating Dairy Cows under Heat Stress Conditions / T. Müschner-Siemens, G. Hoffmann, C. Ammon, T. Amon. – DOI 10.1016/j.jtherbio.2019.102484. – Текст : электронный // Journal of Thermal Biology. – 2020. – Vol. 88. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456519304644?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).

10. Scientific Report of EFSA Prepared by the Animal Health and Animal Welfare Unit on the Effects of Farming Systems on Dairy Cow Welfare and Disease / B. Algers, G. Bertoni, D. M. Broom [et al.] // Annex to the EFSA Journal. – 2009. – Vol. 1143. – Pp. 1–38. – URL: <https://clck.ru/UJbzm> (дата обращения: 01.03.2021).

11. **Polisky, L.** Invited Review: Effects of Heat Stress on Dairy Cattle Welfare / L. Polisky, M. A. G. Keyserlingk. – DOI 10.3168/jds.2017-12651 // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100, Issue 11. – Pp. 8645–8657. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030217308494?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).

12. **Bohmanova, J.** Temperature-Humidity Indices as Indicators of Milk Production Losses Due to Heat Stress / J. Bohmanova, I. Misztal, J. B. Cole. – DOI 10.3168/jds.2006-513 // Journal of Dairy Science. – 2007. – Vol. 90, Issue 4. – Pp. 1947–1956. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030207716818?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).

13. **Schüller, L. K.** Effect of Short- and Long-Term Heat Stress on the Conception Risk of Dairy Cows under Natural Service and Artificial Insemination Breeding Programs / L. K. Schüller, O. Burfeind, W. Heuwiese. – DOI 10.3168/jds.2015-10080 // Journal of Dairy Science. – 2016. – Vol. 99, Issue 4. – Pp. 2996–3002. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030216000916?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).

14. A Predictive Model of Equivalent Temperature Index for Dairy Cattle (ETIC) / X. Wang, H. Gao, K. G. Gebremedhin [et al.]. – DOI 10.1016/j.jtherbio.2018.07.013 // Journal of Thermal Biology. – 2018. – Vol. 76. – Pp. 165–170. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456518301050?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).

15. Heat Stress Risk in European Dairy Cattle Husbandry under Different Climate Change Scenarios – Uncertainties and Potential Impacts / S. Hempel, C. Menz, S. Pinto [et al.]. – DOI 10.5194/esd-2019-15. – Текст : электронный // Earth Syst. Dynam. Discuss. – 2019. – URL: <https://esd.copernicus.org/preprints/esd-2019-15/esd-2019-15.pdf> (дата обращения: 01.03.2021).

16. **Мартынова, Е. Н.** Зона размещения животных в здании – фактор влияния на молочную продуктивность / Е. Н. Мартынова, Е. А. Ястребова. – Текст : электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – URL: <https://www.science-education.ru/pdf/2013/3/290.pdf> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

17. Математическое моделирование свободной (естественной) конвекции в животноводческих помещениях большой вместимости / И. Я. Федоренко, Н. И. Капустин, В. Н. Капустин, И. Н. Бырдин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 11 (73). – С. 66–70. – URL: <https://clck.ru/UPiLR> (дата обращения: 01.03.2021).

18. Modelling of Heat Stress in a Robotic Dairy Farm. Part 2: Identifying the Specific Thresholds with Production Factors / B. Ji, T. Banhazi, A. Ghahramani [et al.]. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2019.11.005 // Biosystems Engineering. – 2019. – Vol. 199. – Pp. 43–57. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511019308797?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).



19. A Software to Estimate Heat Stress Impact on Dairy Cattle Productive Performance / C. G. S. Teles Junior, R. S. Gates, M. Barbari [et al.]. – DOI [10.15159/ar.19.110](https://doi.org/10.15159/ar.19.110) // Agronomy Research. – 2019. – Vol. 17, Issue 3. – Pp. 872–878. – URL: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4798> (дата обращения: 01.03.2021).

20. Microclimate and Gas Emissions in Cold Uninsulated Dairy Buildings / F. Teye, H. Gröhn, M. Pastell [et al.]. – DOI [10.13031/2013.20936](https://doi.org/10.13031/2013.20936). – Текст : электронный // Proceedings of ASAE Annual Meeting. – Michigan : American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. – URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=5&AID=20936&CID=por2006&T=1> (дата обращения: 01.03.2021).

21. Papez, J. Heating and Ventilation in Milking Parlours / J. Papez, P. Kic // Agronomy Research. – 2015. – Vol. 13, Issue 1. – Pp. 245–252. – URL: https://www.researchgate.net/publication/281735325_Heating_and_ventilation_in_milking_parlours (дата обращения: 01.03.2021).

22. Kic, P. Effect of Construction Shape and Materials on Indoor Microclimatic Conditions inside the Cowsheds in Dairy Farms / P. Kic // Agronomy Research. – 2017. – Vol. 15, Issue 2. – Pp. 426–434. – URL: https://www.researchgate.net/publication/317744473_Effect_of_construction_shape_and_materials_on_indoor_microclimatic_conditions_inside_the_cowsheds_in_dairy_farms (дата обращения: 01.03.2021).

23. Vtoryi, V. Investigations of Temperature and Humidity Conditions in Barn in Winter / V. Vtoryi, S. Vtoryi, R. Ylyin. – DOI [10.22616/ERDev2018.17.N300](https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N300) // Proceedings of 17th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, 23–25 May 2018, Jelgava. – Jelgava, 2018. – Pp. 265–269. – URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N300.pdf> (дата обращения: 01.03.2021).

24. Ильин, Р. М. Графические модели температурно-влажностных режимов животноводческого помещения / Р. М. Ильин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 3. – С. 173–178. – URL: <https://clck.ru/UQrpQ> (дата обращения: 01.03.2021).

25. Карпенко, А. В. Модели управления микроклиматом в помещении / А. В. Карпенко, И. Ю. Петрова // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 7. – С. 224–229. – URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40488> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

26. Spatial Distribution of Thermal Variables, Acoustics and Lighting in Compost Dairy Barn with Climate Control System / F. A. Damasceno, C. E. A. Oliveira, G. A. S. Ferraz [et al.]. – DOI [10.15159/ar.19.115](https://doi.org/10.15159/ar.19.115) // Agronomy Research. – 2019. – Vol. 17, Issue 2. – Pp. 385–395. – URL: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4839> (дата обращения: 01.03.2021).

Поступила 02.03.2021; одобрена после рецензирования 20.04.2021; принята к публикации 28.04.2021

Об авторах:

Вторый Валерий Федорович, главный научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филитовское ш., д. 3), доктор технических наук, Researcher ID: [Z-1809-2019](https://orcid.org/0000-0003-0026-6979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0026-6979>, vvtoryj@yandex.ru

Вторый Сергей Валерьевич, старший научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филитовское ш., д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: [Z-1812-2019](https://orcid.org/0000-0002-7169-1625), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7169-1625>, 2vt_1981@list.ru

Гордеев Владислав Владимирович, заведующий научно-исследовательским отделом технологий и технических средств в животноводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный

агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Фильтровское ш., д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: Y-9104-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6181-396X>, vladgordeev@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. Ф. Второй – обзор и анализ литературы, постановка задачи.

С. В. Второй – проведение исследований и обработка результатов.

В. В. Гордеев – описание методики исследования, анализ результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mylostyyi R.V., Sejian V. Welfare of Dairy Cattle in Conditions of Global Climate Change. *Theoretical and Applied Veterinary Medicine*. 2019; 7(1):47-55. (In Ukr., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.32819/2019.71009>
2. Ivanov Yu.A., Novikov N.N. Improving the Quality of Wildlife Habitat by Improving Equipment Management Systems Climate. *Vestnik VNIIMZh* = Bulletin of the Russian Research Institute for Mechanisation of Animal Husbandry. 2013; (3):44-51. Available at: <https://clck.ru/UJW8J> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Vtoryy V.F., Vtoryy S.V., Ilin R.M. [Research on the Temperature and Humidity Conditions of the Barn in Winter and Spring]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia of the St. Petersburg State Agrarian University. 2019; (1):134-140. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11134> (дата обращения: 01.03.2021).
4. Wtory V.F., Gordeev V.V., Wtory S.V., Lantsova E.O. The Cowshed's Temperature -and- Humidity Conditions with Graphic Information Modeling Using Assessment. *Vestnik VNIIMZh* = Bulletin of the Russian Research Institute for Mechanisation of Animal Husbandry. 2016; (4):67-72. Available at: <https://clck.ru/UJZK6> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Dahl G.E., Tao S., Monteiro A.P.A. Effects of Late-Gestation Heat Stress on Immunity and Performance of Calves. *Journal of Dairy Science*. 2016; 99(4):3193-3198. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9990>
6. Herbut P., Angrecka S., Walczak J. Environmental Parameters to Assessing of Heat Stress in Dairy Cattle – a Review. *International Journal of Biometeorology*. 2018; 62(12):2089-2097. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1629-9>
7. Tao S., Orellana R.M., Weng X., et al. Symposium Review: The Influences of Heat Stress on Bovine Mammary Gland Function. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(6):5642-5654. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13727>
8. Vtoryi S.V., Ilin R.M. Effect of External Weather Conditions on the Cow Productivity in Tied Housing Systems. *AgroEkoInzheneriya* = Agricultural and Environmental Engineering. 2019; (2):269-277. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10172>
9. Müschner-Siemens T., Hoffmann G., Ammon C., Amon T. Daily Rumination Time of Lactating Dairy Cows under Heat Stress Conditions. *Journal of Thermal Biology*. 2020; 88. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102484>
10. Algers B., Bertoni G., Broom D.M., et al. Scientific Report of EFSA Prepared by the Animal Health and Animal Welfare Unit on the Effects of Farming Systems on Dairy Cow Welfare and Disease. *Annex to the EFSA Journal*. 2009; 1143:1-38. Available at: <https://clck.ru/UJbzm> (accessed 01.03.2021). (In Eng.)
11. Polsky L., Keyserlingk M.A.G. Invited Review: Effects of Heat Stress on Dairy Cattle Welfare. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(11):8645-8657. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651>

12. Bohmanova J., Misztal I., Cole J.B. Temperature-Humidity Indices as Indicators of Milk Production Losses Due to Heat Stress. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(4):1947-1956. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2006-513>
13. Schüller L.K., Burfeind O., Heuwiese W. Effect of Short- and Long-Term Heat Stress on the Conception Risk of Dairy Cows under Natural Service and Artificial Insemination Breeding Programs. *Journal of Dairy Science*. 2016; 99(4):2996-3002. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10080>
14. Wang X., Gao H., Gebremedhin K.G., et al. A Predictive Model of Equivalent Temperature Index for Dairy Cattle (ETIC). *Journal of Thermal Biology*. 2018; 76:165-170. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.07.013>
15. Hempel S., Menz C., Pinto S., et al. Heat Stress Risk in European Dairy Cattle Husbandry under Different Climate Change Scenarios – Uncertainties and Potential Impacts. *Earth Syst. Dynam. Discuss*. 2019. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-2019-15>
16. Martynova E.N., Yastrebova E.A. Zone of Placement of Animals in the Building – Influence Factor on the Milk Productivity. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education. 2013; (3). Available at: <https://www.science-education.ru/pdf/2013/3/290.pdf> (дата обращения: 01.03.2021). (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Fedorenko I.Ya., Kapustin N.I., Kapustin V.N., Byrdin I.N. [Mathematical Modelling of Free (Natural) Convection in Large Capacity Animal Houses]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universitet* = Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2010; (11):66-70. Available at: <https://clck.ru/UPiLR> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Ji B., Banhazi T., Ghahramani A., et al. Modelling of Heat Stress in a Robotic Dairy Farm. Part 2: Identifying the Specific Thresholds with Production Factors. *Biosystems Engineering*. 2019; 199:43-57. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.005>
19. Teles Junior C.G.S., Gates R.S., Barbari M., et al. A Software to Estimate Heat Stress Impact on Dairy Cattle Productive Performance. *Agronomy Research*. 2019; 17(3):872-878. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15159/ar.19.110>
20. Teye F., Gröhn H., Pastell M., et al. Microclimate and Gas Emissions in Cold Uninsulated Dairy Buildings. In: Proceedings of ASAE Annual Meeting. Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2006. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.20936>
21. Papez J., Kic P. Heating and Ventilation in Milking Parlours. *Agronomy Research*. 2015; 13(1):245-252. Available at: https://www.researchgate.net/publication/281735325_Heating_and_ventilation_in_milking_parlours (accessed 01.03.2021). (In Eng.)
22. Kic P. Effect of Construction Shape and Materials on Indoor Microclimatic Conditions inside the Cowsheds in Dairy Farms. *Agronomy Research*. 2017; 15(2):426-434. Available at: https://www.researchgate.net/publication/317744473_Effect_of_construction_shape_and_materials_on_indoor_microclimatic_conditions_inside_the_cowsheds_in_dairy_farms (accessed 01.03.2021). (In Eng.)
23. Vtoryi V., Vtoryi S., Ylyin R. Investigations of Temperature and Humidity Conditions in Barn in Winter. In: Proceedings of 17th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, 23–25 May 2018, Jelgava. Jelgava; 2018. Pp. 265-269. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N300>
24. Ilin R.M. [Graphical Models of the Temperature and Humidity Conditions of a Livestock Building]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = St. Petersburg State Agrarian University Bulletin. 2019; (3):173-178. Available at: <https://clck.ru/UQrpQ> (accessed 01.03.2021). (In Russ.)
25. Karpenko A.V., Petrova I.Yu. Model of Control Indoor Climate. *Fundamentalnye issledovaniya* = Fundamental Research. 2016; (7):224-229. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40488> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

26. Damasceno F.A., Oliveira C.E.A., Ferraz G.A.S., et al. Spatial Distribution of Thermal Variables, Acoustics and Lighting in Compost Dairy Barn with Climate Control System. *Agronomy Research*. 2019; 17(2):385-395. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15159/ar.19.115>

Submitted 02.03.2021; approved after reviewing 20.04.2021; accepted for publication 28.04.2021

About the authors:

Valerij F. Vtoryi, Senior Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [Z-1809-2019](https://orcid.org/0000-0003-0026-6979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0026-6979>, vvtoryj@yandex.ru

Sergei V. Vtoryi, Senior Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: [Z-1812-2019](https://orcid.org/0000-0002-7169-1625), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7169-1625>, 2vt_1981@list.ru

Vladislav V. Gordeev, Head of the Research Department for Technologies and Technical Means in Animal Husbandry, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: [Y-9104-2019](https://orcid.org/0000-0001-6181-396X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6181-396X>, vladgordeev@mail.ru

Contribution of the authors:

V. F. Vtoryi – literature review and analysis, mission statement.

S. V. Vtoryi – conducting research and processing the results.

V. V. Gordeev – describing the research methodology, analyzing the results.

All authors have read and approved the final manuscript.



Обоснование параметров рыхлителя почвообрабатывающей машины стратификатора

Ю. Н. Сыромятников

*Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства имени Петра Василенко
(г. Харьков, Украина)
gara176@khntusg.info*

Введение. Получение безвредных для организма человека продуктов питания требует отказа от химических средств контроля сорняков при выращивании сельскохозяйственных культур. Почвообрабатывающая машина стратификатор оптимизирует физико-механическое состояние обрабатываемого слоя почвы, при этом сорняки вычесыванием извлекаются из почвы вместе с цельной корневой системой и укладываются на поверхность, где они высушиваются под воздействием климатических факторов. Порядка 30 % от общих затрат энергии в процессе работы машины расходуется на привод ротора, поэтому она неудовлетворительно работает на плотных почвах.

Материалы и методы. Почва рассматривалась как упруго-пластическая среда. Принималась во внимание модель обобщенного закона Гука и один из вариантов теории пластического течения. Для упрощения вычислений использовались сведения из экспериментальных исследований о положении в пространстве поверхности разрушения почвы. Определялась интенсивность напряжений полипластических деформаций слоя почвы. Для численного решения задачи использовался метод Рунге.

Результаты исследования. В связи с указанными недостатками параметры рыхлителя обоснованы с учетом уменьшения крутящего момента привода ротора. В результате решения задачи методом вариационного исчисления определена геометрическая форма рыхлителя ротора. Энергетические показатели работы секции почвообрабатывающей машины оценивались крутящим моментом привода ротора рыхлительно-сепарирующего устройства. Крутящий момент привода ротора определялся для рыхлителей с ровным, выпуклым, вогнутым и обоснованным в результате проведения теоретических исследований профилем.

Обсуждение и заключение. Обоснованный профиль обеспечивает наилучшие условия для транспортирования почвы в начальный момент вхождения рыхлителя в землю и минимальные затраты энергии на его привод.

Ключевые слова: обработка почвы, ротор почвообрабатывающей машины, рыхлитель ротора, рыхлительно-сепарирующая машина, сепарирующая решетка, слой почвы, частота вращения, пожнивные остатки, угол наклона, условия движения

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сыромятников, Ю. Н. Обоснование параметров рыхлителя почвообрабатывающей машины стратификатора / Ю. Н. Сыромятников. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.257-273](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.257-273) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 257–273.

Substantiation of the Parameters of a Soil Tillage Machine Ripper

Yu. N. Syromyatnikov

*Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University
of Agriculture (Kharkiv, Ukraine)*

gara176@khntusg.info

Introduction. Production of safe food requires the avoidance of using chemical means to bring weeds under control in cultivating crops. Existing tillage loosening and separating machine PRSM-5 Dokuchaevskaya optimizes the physical and mechanical state of the cultivated soil layer, while the weeds are carefully removed from the soil by combing out together with the whole weed root system and laid on the surface, where they dry up under the influence of climatic factors. During the operation of the tillage machine, about 30% of the total energy consumption is spent on the rotor drive. Therefore, this machine is not working satisfactorily in firm soils.

Materials and Methods. The soil was considered as an elastic-plastic medium. The generalized Hooke's law model and a variant of the plastic flow theory were taken into account. To simplify the calculations, there was used the experimental study information on the position in space of the soil deformation surface. The intensity of stresses of polyplastic deformations of the soil layer was determined. For the numerical solution of the problem, the Ritz method was used.

Results. In connection with the indicated disadvantages, the parameters of the rotor ripper are justified taking into account the reduction in energy consumption for its drive. As a result of solving the problem by the Ritz method, the geometric shape of the rotor ripper was determined. The energy performance of the section of the tillage machine was evaluated by the torque of the rotor drive of the loosening-separating device. The rotor drive torque was determined for rippers with flat, convex, and concave profiles and for the profile substantiated during the study.

Discussion and Conclusion. The profile substantiated during the study provides the best conditions for transporting the soil at the initial moment of the rotor entry into the soil and the minimum energy consumption for its drive.

Keywords: tillage, rotor of a tillage machine, rotor ripper, loosening-separating machine, separating grate, soil layer, rotation frequency, crop residues, inclination angle, driving conditions

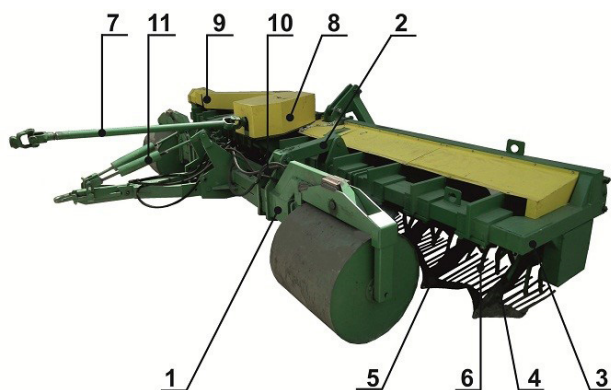
Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Syromyatnikov Yu.N. Substantiation of the Parameters of a Soil Tillage Machine Ripper. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):257-273. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.257-273>

Введение

Механическая обработка почвы сельскохозяйственными машинами и орудиями ориентирована на улучшение условий роста и развития растений [1]. Современные мировые требования получения безвредных для организма человека продуктов питания требуют отказа от химических средств контроля за сорняками при выращивании сельскохозяйственных культур.

Почвообрабатывающая машина стратификатор (рис. 1) оптимизирует физико-механическое состояние обрабатываемого слоя почвы на глубине до 18 см [2–4], является прицепным универсальным агрегатом для выполнения предпосевной и основной поверхностной обработки почвы, при которой сорняки бережно извлекаются вычесыванием вместе с цельной корневой системой и укладываются на поверхность,



Р и с. 1. Машина почвообрабатывающая рыхлительно-сепарирующая ПРСМ-5:
1 – шасси; 2 – рычажный механизм; 3 – рама; 4 – стойка; 5 – плоскорезущая лапа
с сепарирующими решетками; 6 – ротор с рыхлителями; 7 – карданная передача;
8 – зубчатая передача; 9 – цепная передача; 10 – механизм регулировки глубины обработки почвы;
11 – механизм регулировки горизонтального положения рамы [7]

Fig. 1. The PRSM-5 tilling and separating machine: 1 – the chassis; 2 – the lever mechanism;
3 – frame; 4 – the rack; 5 – ploughshare with separating gratings; 6 – rotor with rippers; 7 – cardan gear;
8 – a gear transmission; 9 – chain transmission; 10 – mechanism for adjusting the depth of tillage;
11 – mechanism for adjusting the horizontal position of the frame

где они высушиваются под воздействием климатических факторов [5–7].

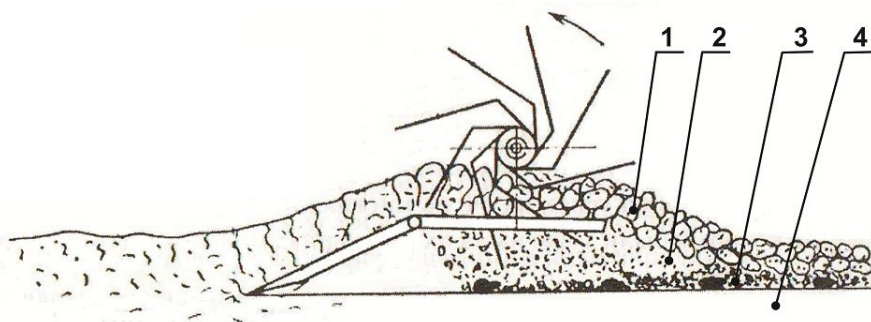
Машина (рис. 1) состоит из шасси 1, с которым посредством параллелограммного рычажного механизма 2 с возможностью перемещения по вертикали закреплена рама 3. На ней смонтированы пассивные (стойки 4 с лемехами 5) и активные (ротор с рыхлителями 6) рабочие органы таким образом, что ротор расположен над лемехами и не касается их. Лемеха снабжены сепарирующими решетками [3; 4; 7].

Исходя из условий прорастания и развития растений, конструкция оптимального обрабатываемого слоя (рис. 2) перед посевом должна состоять из четырех подслоев: надсеменного, семенного, подсеменного и подпахотного. Из надсеменного подслоя должны быть полностью исключены глыбистые отделности почвы размером более 20 мм. В семенном подслое должна быть сосредоточена наиболее ценная в агрономическом отношении структура. Плотность сложения

подсеменного подслоя не должна превышать $1,25 \text{ г/см}^3$. Подпахотный подслон не должен иметь плотность выше $1,3 \text{ г/см}^3$ и твердость в плужной подошве более 3 МПа, что обеспечивается основной обработкой [5; 7].

Создание указанных условий обеспечивает контакт семян с почвой, быстрое прорастание и беспрепятственное развитие корней вглубь почвы [6].

При движении машины по полю лемеха поднимают слой почвы, далее при перемещении вдоль поверхностей лемеха и прутьев сепарирующей решетки происходит его крошение, при этом мелкокомковатая фракция просыпается сквозь решетку, формируя семенной подслон. Дальнейшее формирование семенного подслоя происходит с помощью рыхлителей ротора, которые крошат и рыхлят почву, перемещая ее вдоль сепарирующей решетки. Крупнокомковатая фракция с отдельностями не более 20 мм движется сходом с решетки, образуя надсеменной подслон. Кроме этого, рыхлители ротора в процессе



Р и с. 2. Структура обрабатываемого слоя: 1 – надсеменной слой; 2 – семенной слой; 3 – подсеменной слой; 4 – подпахотный слой [7]

F i g. 2. Structure of the processed layer: 1 – the above seed layer; 2 – the seed layer; 3 – sub seed layer; 4 – sub-plow layer

взаимодействия с почвой вычесывают из нее сорные растения, не нарушая их целостности, и транспортируют их на поверхность надсеменного подслоя [7].

При взаимодействии рыхлителя ротора с почвой происходит формирование почвенного ядра, установившееся движение почвы по лемеху и сбрасывание ее с сепарирующей решетки. Наихудшие условия для движения почвы в технологическом процессе работы машины создаются в момент входа рыхлителя в почву, что является причиной образования перед ним почвенного валка. Он способствует повышению энергоемкости процесса, снижению надежности и качества работы машины [8; 9]. Около 30 % от общих затрат энергии в процессе работы машины расходуется на привод ротора, поэтому она неудовлетворительно работает на плотных почвах, а следовательно, ее использование в таких случаях становится малоэффективным [9].

В связи с указанными недостатками машины параметры рыхлителя ротора должны быть обоснованы с учетом снижения затрат энергии на его привод.

Обзор литературы

Снизить энергоемкость процесса работы ротора почвообрабатывающей машины в нашем случае возможно за

счет совершенствования геометрической формы его рабочих органов-рыхлителей [9–12].

Для получения закономерности распределения давлений почвы на поверхности рабочего органа решалась контактная задача с использованием теории сплошных сред [13; 14]. В процессе воздействия рабочего органа на почву ее пластическое движение по некоторой плоскости начинается только тогда, когда касательные напряжения на поверхности скольжения достигают критических величин. Рабочий орган, имеющий главные оси симметрии, представлялся в виде двух плоских сечений. Почва рассматривалась как линейно деформируемая среда. Затем решения двух плоскостных задач объединялись и получались зависимости распределения давлений по поверхности почвообрабатывающего рабочего органа. Общее решение уравнения контактной задачи описывается следующим образом:

$$P(x) = \frac{\sin \pi v \sin \pi v}{\pi} f'(x) - \frac{\cos \pi^2 v}{\pi} (\alpha + x)^{1/2 + \gamma} P, \quad (1)$$



где γ – коэффициент, зависящий от твердости почвы; $f'(x)$ – уравнение линии, описывающей профиль деформатора; v – скорость движения, м/с;

$$P = \int_{-\alpha}^{\alpha} P(t) dt - \text{сжимающая сила, Н.}$$

С помощью решения контактной задачи получены закономерности распределения давления на границе рабочего органа с почвой для плоского, круглого, клиновидного и эллиптического деформаторов.

Решение контактной задачи в земледельческой механике обеспечивает обоснование формы деформатора с требуемым распределением давления. Такой подход, по мнению авторов, позволяет с достаточной для практики точностью конструировать катки и колеса, обеспечивающие равномерное распределение давления в зоне их контакта с почвой.

В исследованиях по изысканию профильной линии почвообрабатывающего рабочего органа минимальной энергоемкости теоретическим путем определялось силовое воздействие почвы на рабочий орган [15; 16]. При этом процесс рассматривался как квазистационарный с постоянными скоростью движения и расстоянием от центра масс рабочего органа до плоскости микронеровностей поверхности почвы. В связи с последним полагалось, что главный вектор системы сил сопротивления динамическому напору в среднем можно считать величиной постоянной, то есть независимой от времени.

Давление почвы на поверхность рабочего органа рассматривалось как результирующее статической и динамической составляющих¹. Приведено

доказательство изотропности закона внутрипочвенного статического нормального давления, в результате чего установлено, что в каждой точке почвенного горизонта напряжение сил зависит не от ориентации площадки, а только от глубины ее расположения.

В неподвижном состоянии рабочий орган испытывает только силы внутреннего статического давления [17]. С началом движения к ним присоединяются силы динамического напора, или, как их называют авторы работы, силы импульсного давления, которые возникают в результате столкновения рабочего органа с частицами почвы. По утверждению авторов, экспериментальные исследования показали, что соударение частиц почвы с рабочими органами является практически неупругим, так как они имеют очень малый коэффициент восстановления. В таком случае при ударе нормальная составляющая скорости движения частицы почвы относительно рабочего органа равна нулю, а сохраняется только касательная составляющая [18–20]. Поэтому авторы считают, что в системе динамических сил сопротивления при соударении с рабочими органами возникают потери нормального импульса почвенных частиц к рабочей поверхности. Это подтверждает известное положение о нормальном направлении сил динамического давления к рабочей поверхности [21; 22].

Нормальное динамическое давление зависит только от глубины расположения в почве элементарной площадки и ее пространственной ориентации и не зависит от формы остальной части рабочего органа. За промежуток времени dt частицы почвы, со стороны которых элементарный участок испытывает

¹ Петунин А. Ф., Ефремова В. Н. Механика разрушения пласта почвы при многослойном крошении // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам 71-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2015 год / Отв. за вып. А. Г. Кошачев. Краснодар: Изд-во ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», 2016. С. 229–230. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26257020&pf=1> (дата обращения: 20.01.2021).

импульс силы, заполняют косой цилиндр. Из этих предпосылок с помощью закона сохранения количества движения получено уравнение для определения напряженных сил суммарного нормального давления почвы на поверхность рабочего органа в точке M :

$$P(M) = P_0(M) + \rho v^2 \cos^2 \alpha(M), \quad (2)$$

где $P(M)$ – сила внутрипочвенного статического нормального давления, Н; ρ – плотность почвы, кг/м³; $\alpha(M)$ – угол, определяющий пространственную ориентацию элементарной площадки рабочего органа.

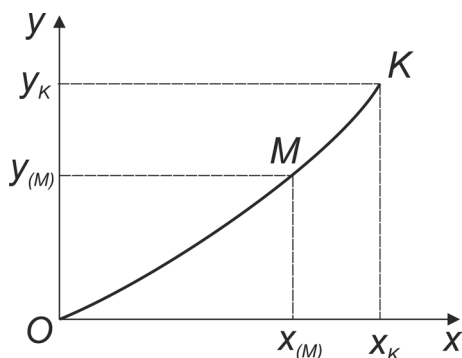
Вывод уравнения проводился без предположений о скорости, в связи с чем формула (2) справедлива не только для квазистационарного движения.

На основании уравнения (2) выведена формула для определения динамического сопротивления:

$$Q = \rho v^2 \int_{\xi} \left(1 - \frac{y(M)}{\alpha}\right) \cos^3 \alpha ds, \quad (3)$$

где $y(M)$ – координаты точки M (рис. 3).

Предполагается, что формула (3) применима для вычисления динамического сопротивления любого рабочего органа почвообрабатывающего орудия.



Р и с. 3. График динамического давления почвы на рабочий орган [13]

Fig. 3. Diagram of dynamic soil pressure on the implement

Для решения конкретной задачи по обоснованию профильной линии рабочего органа минимальной энергоемкости динамическое давление вычисляется по формуле:

$$Q = b \rho v^2 \int_0^{x_K} \left(1 - \frac{y}{a}\right) \frac{y'^3}{1 + y'^2} dx, \quad (4)$$

где b – ширина рабочего органа, м.

Следовательно, величина нормального давления почвы на элементарную площадку поверхности рабочего органа определяется квадратом скорости его движения, плотностью почвы, глубиной расположения и пространственной ориентацией площадки. Однако полученное уравнение не учитывает физико-механических свойств почвы (за исключением плотности), которые весьма существенно влияют на энергетические показатели рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Это связано с тем, что при выводе уравнения (3) учитывалось только взаимодействие частиц почвы с рабочим органом и не было учтено взаимодействие частиц между собой. На них влияют физико-механические свойства почвы. Последнее можно объяснить сложностью процессов, происходящих в почве под воздействием рабочего органа. Их формализация в настоящее время затруднена. Кроме того, необходимо экспериментально проверить, что влияние на величину динамического давления, на элементарную площадку рабочего органа, а также на остальную его форму отсутствует. Также важно тестирование степени адекватности полученной модели в реальных условиях.

Материалы и методы

С использованием векторного и тензорного исчисления процесс нагружения почвы рассматривался как последовательность равновесных состояний и малых деформаций, компоненты тензора которых связаны

с проекциями вектора перемещения соотношениями Коши [23–25]. Решение задачи о деформациях и напряжениях в почве, возникающих в результате действия на него клина, осуществлялось с учетом физических законов взаимосвязи компонентов напряжений и деформаций [26]. Почва рассматривалась как упруго-пластическая среда, при работе с которой применялись модель обобщенного закона Гука и один из вариантов теории пластического течения [27; 28]. С целью экономии объема вычислений использовались сведения из ряда исследований [29; 30], а в процессе счета определялась интенсивность напряжений, при которых происходит отрыв, полипластические деформации поверхности, расчленения слоя грунта на глыбы [31–33]. Была построена математическая модель определения напряженно-деформируемого состояния слоя почвы под воздействием клина, обеспечивающая определение полей векторов перемещений, тензоров деформаций и напряжений. Для численного решения задачи использовался метод Рунге [34–36]. Разработан алгоритм решения поставленной задачи, позволяющий определить поля напряжений и деформаций в упругой области слоя почвы и указать границы области начала пластических деформаций.

Энергетические показатели функционирования рабочих органов почвообрабатывающей машины оценивались тяговым сопротивлением и крутящим моментом привода ротора рыхлительно-сепарирующего устройства. Общее тяговое сопротивление почвообрабатывающего рабочего органа состоит из суммы проекций горизонтальных сил (удельных сил сопротивления) на плоскость (по аналогии с составляющей силы сопротивления лемеха, выраженной В. П. Горячкиным через квадрат скорости движения лемеха в почве). Суммарная составляющая сила определялась

с помощью тензометрической аппаратуры по общеизвестным методикам с относительно небольшими затратами труда и времени. В связи с этим методом определения закономерности распределения давления почвы на поверхности рабочего органа являлась аппроксимация результатов экспериментальных исследований по отысканию суммарных сопротивлений его составных частей.

Результаты исследования

Для решения задачи по усовершенствованию геометрической формы рыхлителя полагаем, что ротор вращается с постоянной частотой, а почва представляет собой однородную среду. Элементарная площадка рабочей кромки рыхлителя (рис. 4) подвергается действию сил трения между кромкой и почвой q_{fdl} и боковой поверхности рыхлителя о почву, а также влиянию давления почвы q_{dl} . Величина силы трения боковой поверхности рыхлителя о почву не оказывает существенного влияния на сопротивление движению рыхлителя в почве и поэтому ею можно пренебречь.

Элементарный крутящий момент ротора определяется по уравнению:

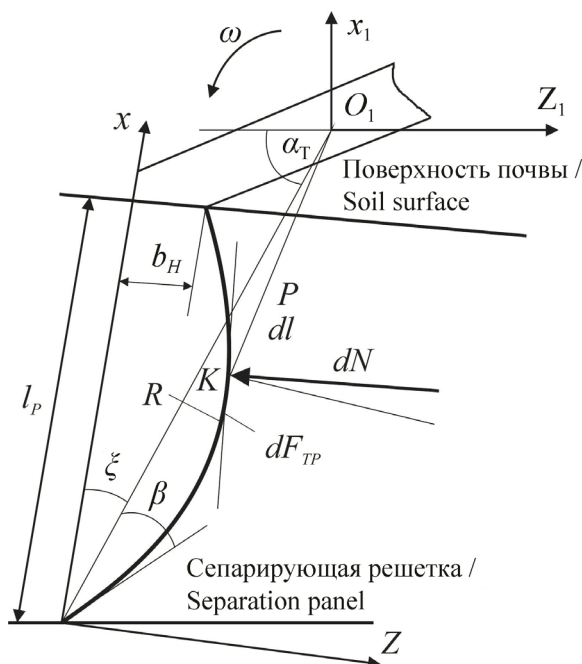
$$dM = q\rho(\sin \theta + \cos \theta)dl, \quad (5)$$

где ρ – радиус вращения элементарной площадки, м; θ – угол между нормалью к радиусу вращения элементарной площадки и направлением действия нормальной силы [9].

Закономерность изменения давления почвы на рыхлитель, в зависимости от глубины расположения в почве его элементарной площадки, определена экспериментальным путем:

$$q = kh^m, \quad (6)$$

где h – расстояние от проходящей по поверхности плоскости до элементарной площадки, м; k, m – коэффициенты,



Р и с. 4. Схема к обоснованию формы рабочей кромки рыхлителя ротора [9; 11]
 F i g. 4. The scheme to substantiate the shape of the working edge of the ripper of the rotor

зависящие от влажности и твердости почвы.

Процесс работы рыхлителя рассмотрен в подвижных осях системы координат XOZ (рис. 4). В принятой системе координат расстояние от элементарной площадки до поверхности почвы определяется по уравнению:

$$h = \frac{1}{\sqrt{1+k_1^2}} \left\{ \begin{aligned} & [k_1 \sin(\alpha_T + \alpha_1) - \cos(\alpha_T + \alpha_1)]x - \\ & - [\sin(\alpha_T + \alpha_1) + k_1 \cos(\alpha_T + \alpha_1)]z + \\ & + R(\cos \alpha_T - k_1 \sin \alpha_T) + b \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где R – радиус ротора, м; α_T – угол поворота рыхлителя в текущий момент времени; α_1 – угол между радиус-вектором носка рыхлителя и осью координат OX ; b – коэффициент, обусловленный высотой слоя почвы на решетке;

k_1 – коэффициент, обусловленный расстоянием от слоя почвы на решетке до оси вращения ротора.

С учетом того, что $dl = \sqrt{1+z_1^2} dx$, заменив косинус и синус через тангенс угла θ , на основании соотношения (5) получим уравнение для вычисления крутящего момента рыхлителя ротора:

$$M = \int_{x_h}^{x_k} \frac{q\rho(1+\operatorname{tg}\theta)\sqrt{1+z_1^2}}{1+\operatorname{tg}^2\theta} dx. \quad (8)$$

Для наиболее весомого снижения усредненного крутящего момента и уменьшения неравномерности вращения ротора необходимо добиться уменьшения максимальных значений указанного крутящего момента.

В связи с изложенным постановка задачи формулируется следующим образом. Из множества кривых,

проходящих через точки (x_h, z_h) и (x_k, z_k) , необходимо найти ту, при которой крутящий момент рыхлителя во время входа его в межпрутковое пространство сепарирующей решетки будет иметь минимальное значение. Для решения поставленной задачи воспользуемся методом Ритца. Уравнение кривой, обеспечивающей экстремальное значение функционала, имеет вид:

$$z = xz'_0 + x^2 \frac{z'_k - x_k z'_0}{x_k^2} + (x - x_k)(C_1 x - C_2 x^2 + C_3 x^3), \quad (9)$$

где z'_0 – тангенс угла между осью OX и касательной к кривой в начальной его точке.

Для данного рыхлительно-сепарирующего устройства z'_0 выбирается из условий максимально возможного захвата почвы в начальный момент ее взаимодействия с рыхлителем, что позволяет снизить сгруживание почвы перед ротатором [23; 25]. Из рисунка 4 видно, что $z'_0 = \tan(\alpha_1 + \beta_1)$, где β – угол между радиус-вектором носка рыхлителя и касательной к кривой в этой же точке.

Подставив выражение (9) в уравнение (8), находим значение коэффициентов C_1, C_2, C_3 , с помощью которых определяется форма рыхлителя. Приравняв к нулю частные производные от полученного уравнения по C_1, C_2, C_3 , получаем систему уравнений:

$$\frac{\partial M_{0i}}{\partial C_i} = \int_{x_0}^{x_1} \left((1 + \tan^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \left[q(1 + z')^{\frac{1}{2}} (\tan^2 \theta - 1) \frac{\partial \rho}{\partial C_i} + \left[(1 + z')^{\frac{1}{2}} (f \tan^2 \theta - 1) \frac{\partial q}{\partial C_i} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + p \left[\begin{aligned} & z'(f \tan^2 \theta - 1) \times \\ & \times (1 + z')^{\frac{1}{2}} \frac{\partial z'}{\partial C_i} + \\ & + (1 + z')^{\frac{1}{2}} f \frac{\partial \tan \theta}{\partial C_i} \end{aligned} \right] \right] \right) dx = 0, \quad (10)$$

где $i = \overline{1, 2, 3}$.

Technologies and means of agricultural mechanization

$$\frac{\partial \rho}{\partial C_i} = \frac{z' \frac{\partial z}{\partial C_i} - R \sin \alpha_1 \frac{\partial x}{\partial C_i}}{\sqrt{R^2 - 2R(z \sin \alpha_1 + x \cos \alpha_1) + z^2 + x^2}},$$

$$\frac{\partial q}{\partial C_i} = -k(n-1)h^{n-2} \frac{\sin(\alpha_T + \alpha_1) + k_1 \cos(\alpha + \alpha_1)}{\sqrt{1+k^2}} \frac{\partial \rho}{\partial C_i},$$

$$\frac{\partial \tan \theta}{\partial C_i} = \left\{ \begin{aligned} & \left[z'(R \sin \alpha_1 - z) + R \cos \alpha_1 - x \right] \times \\ & \times \left[(R \cos \alpha_1 - x) \frac{\partial z}{\partial C_i} + \frac{\partial z'}{\partial C_i} \right] - \\ & - R z \sin \alpha_T \times \\ & \times \left[z'(R \cos \alpha_1 - x) - R \sin \alpha_1 + z \right] \times \\ & \times \left[\frac{\partial z}{\partial C_i} - z' \frac{\partial z'}{\partial C_i} \right] \end{aligned} \right\} \times \\ \times \left[z'(R \sin \alpha_1 - z) + R \cos \alpha_1 - x \right]^{-2},$$

$$z' = z'_0 + \frac{2x}{x_k^2} (z_k - x_k z'_0) + (x - x_k)(2xC_1 + 3xC_2 + C_3) + x^2 C_1 + x^3 C_2 + x C_3,$$

где

$$\frac{\partial z}{\partial C_1} = x^2 (x - x_k); \quad \frac{\partial z}{\partial C_2} = x^3 (x - x_k);$$

$$\frac{\partial z}{\partial C_3} = x(x - x_k); \quad \frac{\partial z'}{\partial C_1} = 2x(x - x_k) + x^2;$$

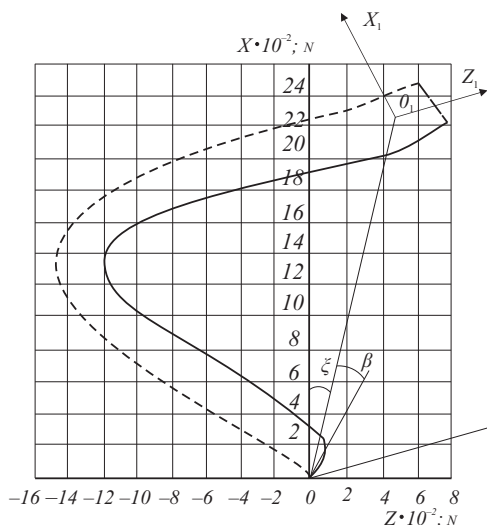
$$\frac{\partial z'}{\partial C_2} = 3x^2 (x - x_k) + x^3; \quad \frac{\partial z'}{\partial C_3} = (x - x_k) + x.$$

Полученную систему уравнений (10) решали численным методом. Расчеты проводились при $R = 0,23$ м; $k = 4000$; $n = 1,99$ Н/м²; $k_1 = -4$; $B = -0,1$; $\alpha_T = 60^\circ$; $\alpha_1 = 12^\circ$; $f = 0,5$; $z'_0 = 0,9$; $B_h = 0,03$ м; $l_p = 0,2$ м.

В результате решения системы уравнений получены значения коэффициентов C_1, C_2, C_3 . С их учетом уравнение получает вид:

$$z = 0,8x - 32x^2 + 144x^3. \quad (11)$$

Линия, определяющая геометрическую форму рыхлителя ротора, согласно уравнению (11), показана на рисунке 5.



Р и с. 5. Форма рыхлителя ротора рыхлительно-сепарирующего устройства

F i g. 5. The shape of the ripper of the rotor of the ripping-separating device

Энергетические показатели работы секции почвообрабатывающей машины с рыхлителями ротора обоснованной формы (рис. 6) оценивались крутящим моментом привода ротора рыхлительно-сепарирующего устройства.

Крутящий момент привода ротора определялся для рыхлителей с ровным (базовым), выпуклым, вогнутым и обоснованным с учетом снижения затрат энергии в результате проведения теоретических исследований профилем. Рыхлители с различным профилем режущей кромки приведены на рисунке 7.

Проведение эксперимента осуществлялось при частоте вращения ротора $2,5 \text{ с}^{-1}$ и влажности почвы 21,5 %. Результаты эксперимента приведены в таблице. Среднеквадратичная ошибка опыта составила 0,44 Н·м, достоверность результатов 99 %.

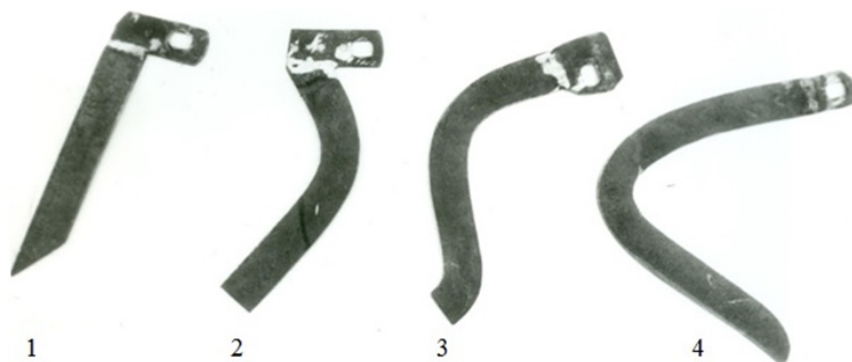
Обсуждение и заключение

Обоснованный с учетом снижения затрат энергии профиль рыхлителя ротора обеспечивает наилучшие условия



Р и с. 6. Машина почвообрабатывающая рыхлительно-сепарирующая ПРСМ-5 с рыхлителями ротора обоснованной формы

F i g. 6. The PRSM-5 tilling and separating machine with rotor rippers of reasonable shape



Р и с. 7. Рыхлители с различной формой рабочей кромки: 1 – ровная; 2 – выпуклая; 3 – вогнутая; 4 – обоснованная с учетом снижения затрат энергии

F i g. 7. The rippers with different cutting edge shapes: 1 – flat; 2 – convex; 3 – concave; 4 – justified considering the reduction of energy costs

Т а б л и ц а

T a b l e

Крутящий момент привода ротора для различных форм его рыхлителей
Rotor drive torque for different ripper shapes

№	Профиль ножа / Knife profile	Крутящий момент, Н·м / Torque, N·m	
		средний / medium	максимальный / maximum
1	Ровный / Plain	12,26	23,10
2	Выпуклый / Convex	13,02	31,46
3	Вогнутый / Concave	11,56	25,03
4	Обоснованный с учетом снижения затрат энергии / Justified in terms of reduced energy costs	8,39	20,85

для транспортирования почвы в начальный момент вхождения в почву и минимальные затраты энергии на привод. Такую форму рыхлителя ротора можно использовать для машины, обеспечивающей оптимизацию агрофизического состояния посевного слоя почвы при посеве семян пропашных культур или перед посевом, когда сорные растения находятся в начальной стадии своего развития.

В одну из задач технологического процесса машины для оптимизации пахотного слоя почвы входит вычесывание корневищ сорных растений и выбрасывание их на поверхность поля.

Для такой машины профиль рыхлителя должен быть обоснован с учетом уменьшения возможности забивания ротора пожнивными остатками и сорными растениями. При относительно небольшой частоте вращения ротора машины и достаточной длине рабочей части рыхлителя растительные остатки могут задерживаться, совершать колебательные движения или сходиться с него. Для достижения последнего угол наклона наиболее пологий касательной к профилю рыхлителя в самом неблагоприятном его положении должен обеспечить условия сползания растительных остатков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Analytical Method of Examining the Curvilinear Motion of a Four-Wheeled Vehicle / V. Melnik, M. Dovzhik, B. Tatyanchenko [et al.]. – DOI [10.15587/1729-4061.2017.101335](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101335) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, Issue 7. – Pp. 59–65. – URL: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/101335> (дата обращения: 20.01.2021).
2. **Сыромятников, Ю. Н.** Результаты полевых исследований роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины с экспериментальными рабочими органами / Ю. Н. Сыромятников // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 5. – С. 184–192. – URL: <https://clck.ru/U4WZj> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
3. **Нанка, А. В.** Влияние частоты вращения ротора почвообрабатывающей машины на качественные показатели ее работы / А. В. Нанка, Ю. Н. Сыромятников // Агротехника и энергообеспечение. – 2018. – № 2. – С. 101–115. – URL: <https://clck.ru/U4WkU> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
4. **Пашенко, В. Ф.** Грунтообробна установка з використанням гнучкого робочого органу для контролю росту бур'янів / В. Ф. Пашенко, Ю. М. Сыромятников, Н. С. Храмов. – DOI [10.32717/0131-0062-2018-64-33-43](https://doi.org/10.32717/0131-0062-2018-64-33-43) // Овочівництво і баштанництво. – 2018. – № 64. – С. 33–43. – URL: <https://vegetables-journal.com/index.php/journal/article/view/23> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
5. **Сыромятников, Ю. М.** Вдосконалення робочих органів для підрізання та підйому ґрунту розрихлювально-сепаруючою машиною / Ю. М. Сыромятников // Інженерія природокористування. – 2017. – № 2. – С. 74–77. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_2_15 (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
6. **Храмов, Н. С.** Качественные показатели работы экспериментальной почвообрабатывающей установки с применением гибкого рабочего органа // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 6. – С. 177–186. – URL: <https://clck.ru/U4Xmn> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
7. **Syromyatnikov, Yu. N.** Qualitative Performance Indicators of a Ripping-and-Separating Machine for Soil Cultivation / Yu. N. Syromyatnikov. – DOI [10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44) // Agricultural Machinery and Technologies. – 2018. – Vol. 12, Issue 3. – Pp. 38–44. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/250> (дата обращения: 20.01.2021).
8. **Николаев, В. А.** Анализ взаимодействия правого ножа агрегата непрерывного действия с грунтом / В. А. Николаев, Д. И. Трошин. – DOI [10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463) // Вестник СибАДИ. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 452–463. – URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/1116> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
9. **Пашенко, В. Ф.** Транспортирующая способность ротора почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины / В. Ф. Пашенко, Ю. Н. Сыромятников // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 2. – С. 67–74. – URL: https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhormashiny_No2_2019_dlya_sajta.pdf (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
10. Study of the Process of Grain Pre-Threshing by Working Bodies of a Combine Harvester Header / V. Sheychenko, I. Dudnikov, A. Kuzmych [et al.]. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6, no. 1. – Pp. 19–27. – URL: <http://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/7198> (дата обращения: 20.01.2021).
11. **Суханова, М. В.** Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами / М. В. Суханова, А. В. Суханов, С. А. Войнаш. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202003.340-354](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.340-354) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 340–354. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/92-20-3/788-10-15507-0236-2910-030-202002-1> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
12. **Старовойтов, С. И.** Конструктивные особенности рабочих органов для уплотнения и выравнивания поверхности почвы / С. И. Старовойтов, Б. Х. Ахалая, А. В. Миронова // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 4. – С. 51–56. – URL: https://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2020/01/ВИЭСХ_4_2019.pdf (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.



13. **Кушнарєв, А. С.** Механика почв: задачи и состояние работ / А. С. Кушнарєв. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 3. – С. 9–13.
14. **Кушнарєв, А.** Теоретичні дослідження взаємодії викопувального робочого органу з ґрунтом / А. Кушнарєв, Л. Шустік, С. Маринін // Техніко-технологічні аспекти розвитку та впровадження нової техніки і технологій для сільського господарства України. – 2014. – Вип. 18, № 1. – С. 200–207. – URL: <https://clck.ru/U8G4p> (дата обращения: 20.01.2021).
15. Оценка технологического процесса обработки почвы на основе уравнений динамики сплошных сред / С. Г. Мударисов, З. С. Рахимов, М. М. Ямалетдинов, И. М. Фархутдинов // Достижения науки и техники АПК. – 2010. – № 1. – С. 63–65. – URL: <https://clck.ru/U7MXP> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
16. Developing the Method of Constructing Mathematical Models of Soil Condition under the Action of a Wedge / S. Kornienko, V. Pashenko, V. Melnik [et al.]. – DOI [10.15587/1729-4061.2016.79912](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79912) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 5, Issue 7. – Pp. 34–43. – URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/79912> (дата обращения: 20.01.2021).
17. **Radjai, F.** Features of Static Pressure in Dense Granular Media / F. Radjai, D. E. Wolf. – DOI [10.1007/PL00010907](https://doi.org/10.1007/PL00010907) // Granular Matter. – 1998. – Vol. 1. – Pp. 3–8. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/PL00010907#citeas> (дата обращения: 20.01.2021).
18. **Лапшин, В. В.** Нелинейная упругопластическая модель коллинеарного удара / В. В. Лапшин, Е. А. Юрин. – DOI [10.18698/1812-3368-2016-1-90-99](https://doi.org/10.18698/1812-3368-2016-1-90-99) // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2016. – № 1. – С. 90–99. – URL: <http://vestniken.ru/catalog/it/mathmod/676.html> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
19. **Пермякова, В. В.** Основные модельные представления механического удара / В. В. Пермякова // Инновации в гражданской авиации. – 2018. – Т. 3, № 2. – С. 77–86. – URL: http://www.mstuca.ru/upload/Innovatcii_blok_3.2.pdf (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
20. **Листрова, К. С.** Моделирование продольного удара упругого стержня как механической системы с конечным числом степеней свободы / К. С. Листрова, В. К. Манжосов – DOI [10.18500/1816-9791-2011-11-2-96-102](https://doi.org/10.18500/1816-9791-2011-11-2-96-102) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2011. – Т. 11, № 2. – С. 96–102. – URL: <https://mmi.sgu.ru/sites/mmi.sgu.ru/files/text-pdf/2020/04/listrova-manzhosov96-102.pdf> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
21. **Pan, J. L.** Simulation of Dynamic Compaction of Loose Granular Soils / J. L. Pan, A. R. Selby. – DOI [10.1016/S0965-9978\(02\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(02)00067-4) // Advances in Engineering Software. – 2002. – Vol. 33, Issue 7–10. – Pp. 631–640. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997802000674?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).
22. **Okur, D. V.** Stiffness Degradation of Natural Fine Grained Soils during Cyclic Loading / D. V. Okur, A. Ansal. – DOI [10.1016/j.soildyn.2007.01.005](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.01.005) // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2007. – Vol. 27, Issue 9. – Pp. 843–854. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026772610700022X?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).
23. Non-Invasive 3D Analysis of Local Soil Deformation under Mechanical and Hydraulic Stresses by μ CT and Digital Image Correlation / S. Peth, J. Nellesen, G. Fischer, R. Horna. – DOI [10.1016/j.still.2010.02.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2010.02.007) // Soil and Tillage Research. – 2010. – Vol. 111, Issue 1. – Pp. 3–18. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198710000280?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).
24. **Hashiguchi, K.** Shear Band Formation Analysis in Soils by the Subloading Surface Model with Tangential Stress Rate Effect / K. Hashiguchi, S. Tsutsumi. – DOI [10.1016/S0749-6419\(02\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00113-4) // International Journal of Plasticity. – 2003. – Vol. 19, Issue 10. – Pp. 1651–1677. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749641902001134> (дата обращения: 20.01.2021).
25. **Sciammarella, C. A.** Verification of Continuum Mechanics Predictions with Experimental Mechanics / C. A. Sciammarella, L. Lamberti, F. M. Sciammarella. – DOI [10.3390/ma13010077](https://doi.org/10.3390/ma13010077) // Materials. – 2020. – Vol. 13, Issue 1. – Pp. 77. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/1/77> (дата обращения: 20.01.2021).
26. **Li, X.** Macro-Micro Relations in Granular Mechanics / X. Li, H. S. Yu, X. S. Li. – DOI [10.1016/j.ijsolstr.2009.08.018](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.08.018) // International Journal of Solids and Structures. – 2009. – Vol. 46,

Issue 25–26. – Pp. 4331–4341. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309003291?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).

27. **Бондарь, В. С.** Вариант теории термопластичности / В. С. Бондарь, В. В. Даншин, А. А. Кондратенко. – DOI 10.15593/perm.mech/2015.2.02 // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 21–35. – URL: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.02> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.

28. A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application / K. S. Ti, B. B. K. Huat, J. Noorzaei [et al.] // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2009. – Vol. 14. – Pp. 1–18. – URL: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1366069](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1366069) (дата обращения: 20.01.2021).

29. Research of Surface-Plane and Space-Deep Interaction of Needle with Soil / V. Sheichenko, I. Dudnikov, V. Shevchuk, A. Kuzmych // Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources. – 2019. – Vol. 65, Issue 1. – Pp. 13–16. – URL: <https://stumejournals.com/journals/am/2019/1/13> (дата обращения: 20.01.2021).

30. Modeling the Technological Process of Tillage / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky [et al.]. – DOI 10.1016/j.still.2018.12.004 // Soil and Tillage Research. – 2019. – Vol. 190. – Pp. 70–77. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718311760?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).

31. Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation / V. Aulin, O. Lyashuk, A. Tykhyi [et al.] // Acta Technologica Agriculturae. – 2018. – Vol. 21, Issue 4. – Pp. 153–159. – URL: <https://clck.ru/U7SUu> (дата обращения: 20.01.2021).

32. **Babitsky, L. F.** Bionic Modelling of the Working Bodies of Machines For Surface Tillage / L. F. Babitsky, I. V. Sobolevsky, V. A. Kuklin. – DOI 10.1088/1755-1315/488/1/012041 // IOP Conference Series. – 2020. – Vol. 488, Issue 1. – 10 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/488/1/012041/meta> (дата обращения: 20.01.2021).

33. **Капов, S. N.** Model of Soil Environment as Object of Mechanical Tillage / S. N. Капов, М. А. Адуов, S. А. Nukusheva. – DOI 10.7537/marslsj1112s14.30 // Life Science Journal. – 2014. – Vol. 11. – Pp. 156–161. – URL: http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1112s/030_26240life1112s14_156_161.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

34. **Weinan, E.** The Deep Ritz Method: A Deep Learning-Based Numerical Algorithm for Solving Variational Problems / E. Weinan, B. Yu. – DOI 10.1007/s40304-018-0127-z // Communications in Mathematics and Statistics. – 2018. – Vol. 6, Issue 1. – Pp. 1–12. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40304-018-0127-z> (дата обращения: 20.01.2021).

35. Vibration Analysis of the Coupled Doubly-Curved Revolution Shell Structures by Using Jacobi-Ritz Method / Q. Wang, K. Choe, D. Shi, K. Sin. – DOI 10.1016/j.ijmecsci.2017.12.002 // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 135. – Pp. 517–531. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002074031731055X?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).

36. **Berthelot, J.-M.** Damping Analysis of Laminated Beams and Plates Using the Ritz Method / J.-M. Berthelot. – DOI 10.1016/j.compstruct.2005.04.031 // Composite Structures. – 2006. – Vol. 74, Issue 2. – Pp. 186–201. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822305001005?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).

Поступила 23.01.2021; одобрена после рецензирования 15.02.2021; принята к публикации 01.03.2021

Об авторе:

Сыромятников Юрий Николаевич, старший преподаватель кафедры технических систем и технологий животноводства имени Б. П. Шабельника Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, д. 44), кандидат технических наук, Researcher ID: AAC-7369-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9502-626X>, gara176@khntusg.info

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Melnik V., Dovzhik M., Tatyanchenko B., et al. Analytical Method of Examining the Curvilinear Motion of a Four-Wheeled Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 3(7):59-65. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101335>
2. Syromyatnikov Yu.N. The Results of Field Tests of a Rotary Tillage Ripping-Separating Machine with Experimental Working Parts. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018; (5):184-192. Available at: <https://clck.ru/U4WZj> (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Nanka A.V., Syromyatnikov Yu.N. The Influence of the Rotation Frequency of the Rotor of a Tillage Machine on the Quality of Its Work. *Agrotehnika i energoobespechenie* = Agronomy and Energy Supply. 2018; (2):101-115. Available at: <https://clck.ru/U4WkU> (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N., Khramov N.S. Soil-Cultivating Setting a Flexible Working Organ to Control of Weeds Growth. *Ovochivnitsvo i bashtannitsvo* = Vegetable and Melon Growing. 2018; (64):33-43. (In Ukr., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.32717/0131-0062-2018-64-33-43>
5. Syromyatnikov Yu.N. Improvement of Working Bodies for Cutting and Rising the Soil of a Rope-Separation Machine. *Inzheneriya priroдокорistuvannya* = Engineering of Nature Management. 2017; (2):74-77. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_2_15 (accessed 20.01.2021). (In Ukr., abstract in Eng.)
6. Khramov N.S. Qualitative Indices of the Operation of Experimental Tillage Implement with a Flexible Working Body. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018; (6):177-186. Available at: <https://clck.ru/U4Xmn> (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Syromyatnikov Yu.N. Qualitative Performance Indicators of a Ripping-and-Separating Machine for Soil Cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018; 12(3):38-44. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44>
8. Nikolayev V.A., Troshin D.I. Continuous Action Right Knife Unit with Ground Interaction Analysis. *Vestnik SibADI* = The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17(4):452-463. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463>
9. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N. The Transporting Ability of the Rotor of the Soil-Cultivating Loosening and Separating Vehicle. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2019; (2):67-74. Available at: https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz mashiny_No2_2019_dlya_sajta.pdf (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Sheychenko V., Dudnikov I., Kuzmych A., et al. Study of the Process of Grain Pre-Threshing by Working Bodies of a Combine Harvester Header. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 6(1):19-27. Available at: <http://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/7198> (accessed 20.01.2021). (In Eng.)
11. Sukhanova M.V., Sukhanov A.V., Voinash S.A. Intelligent Control Systems for Dynamic Mixing Processes in Seed Processing Machines with Highly Elastic Working Bodies. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):340-354. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.340-354>
12. Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Mironova A.V. Design Features of Working Tools for Soil Surface Compaction and Leveling. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK* = VIESH Institute' Herald. 2019; (4):51-56. Available at: https://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2020/01/BIЭCX_4_2019.pdf (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kushnarev A.S. [Soil Mechanics: Challenges and Status of Work]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 1987; (3):9-13. (In Russ.)
14. Kushnarov A., Shustik L., Marinin S. [Theoretical Investigation of the Interaction of the Propulsion Unit with the Ground]. *Tekhniko-tehnologichni aspekti rozvitku ta viprobuvannya novoi tekhniki i tekhnologiy dlya silskogo gospodarstva Ukraini* = Technical and Technological Aspects of Development

and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine. 2014; 18(1):200-207. Available at: <https://clck.ru/U8G4p> (accessed 20.01.2021). (In Ukr., abstract in Eng.)

15. Mudarisov S.G., Rahimov Z.S., Yamaletdinov M.M., Farchutdinov I.M. Assessment of Technological Process of Soil Treatment on the Basis of Continuum Dynamics Equations. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2010; (1):63-65. Available at: <https://clck.ru/U7MXP> (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

16. Kornienko S., Pashenko V., Melnik V., et al. Developing the Method of Constructing Mathematical Models of Soil Condition under the Action of a Wedge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5(7):34-43. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79912>

17. Radjai F., Wolf D.E. Features of Static Pressure in Dense Granular Media. *Granular Matter*. 1998; 1:3-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00010907>

18. Lapshin V.V., Yurin Ye.A. Nonlinear Elastoplastic Model of Collinear Impact. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. 2016; (1):90-99. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2016-1-90-99>

19. Permyakova V.V. Basic Model Representations of Mechanical Impact. *Innovatsii v grazhdanskoj aviatsii* = Innovations in Civil Aviation. 2018; 3(2):77-86. Available at: http://www.mstuca.ru/upload/Innovatsii_blok_3.2.pdf (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

20. Listrova K.S., Manjosov V.K. Modelling of the Longitudinal Impact Springy Rod as Mechanical System with Final Number of the Degree of the Liberty. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika* = Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics. 2011; 11(2):96-102. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2011-11-2-96-102>

21. Pan J.L., Selby A.R. Simulation of Dynamic Compaction of Loose Granular Soils. *Advances in Engineering Software*. 2002; 33(7-10):631-640. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(02\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(02)00067-4)

22. Okur D.V., Ansal A. Stiffness Degradation of Natural Fine Grained Soils during Cyclic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2007; 27(9):843-854. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.01.005>

23. Peth S., Nellesen J., Fischer G., Horna R. Non-Invasive 3D Analysis of Local Soil Deformation under Mechanical and Hydraulic Stresses by μ CT and Digital Image Correlation. *Soil and Tillage Research*. 2010; 111(1):3-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.02.007>

24. Hashiguchi K., Tsutsumi S. Shear Band Formation Analysis in Soils by the Subloading Surface Model with Tangential Stress Rate Effect. *International Journal of Plasticity*. 2003; 19(10):1651-1677. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(02\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00113-4)

25. Sciammarella C.A., Lamberti L., Sciammarella F.M. Verification of Continuum Mechanics Predictions with Experimental Mechanics. *Materials*. 2020; 13(1):77. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13010077>

26. Li X., Yu H.S., Li X.S. Macro-Micro Relations in Granular Mechanics. *International Journal of Solids and Structures*. 2009; 46(25-26):4331-4341. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsol-str.2009.08.018>

27. Bondar V.S., Danshin V.V., Kondratenko A.A. Version of the Theory of Thermoplasticity. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* = PNRPU Mechanics Bulletin. 2015; (2):21-35. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.02>

28. Ti K.S., Huat B.B.K., Noorzaei J., et al. A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2009; 14:1-18. Available at: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1366069](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1366069) (accessed 20.01.2021). (In Eng.)

29. Sheichenko V., Dudnikov I., Shevchuk V., Kuzmych A. Research of Surface-Plane and Space-Deep Interaction of Needle with Soil. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources*. 2019; 65(1):13-16. Available at: <https://stumejournals.com/journals/am/2019/1/13> (accessed 20.01.2021). (In Eng.)

30. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., et al. Modeling the Technological Process of Tillage. *Soil and Tillage Research*. 2019; 190:70-77. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.004>
31. Aulin V., Lyashuk O., Tykhyi A., et al. Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018; 21(4):153-159. Available at: <https://clck.ru/U7SUu> (accessed 20.01.2021). (In Eng.)
32. Babitsky L.F., Sobolevsky I.V., Kuklin V.A. Bionic Modelling of the Working Bodies of Machines for Surface Tillage. *IOP Conference Series*. 2020; 488(1). 10 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012041>
33. Kapov S.N., Aduov M.A., Nukusheva S.A. Model of Soil Environment as Object of Mechanical Tillage. *Life Science Journal*. 2014; 11:156-161. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.7537/marslsj1112s14.30>
34. Weinan E., Yu B. The Deep Ritz Method: A Deep Learning-Based Numerical Algorithm for Solving Variational Problems. *Communications in Mathematics and Statistics*. 2018; 6(1):1-12. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s40304-018-0127-z>
35. Wang Q., Choe K., Shi D., Sin K. Vibration Analysis of the Coupled Doubly-Curved Revolution Shell Structures by Using Jacobi-Ritz Method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018; 135:517-531. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.002>
36. Berthelot J.-M. Damping Analysis of Laminated Beams and Plates Using the Ritz Method. *Composite Structures*. 2006; 74(2):186-201. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.04.031>

Received 23.01.2021; approved after reviewing 15.02.2021; accepted for publication 01.03.2021

About the author:

Yuriy N. Syromyatnikov, Senior Lecturer in the Shabelnik Chair of Technical Systems and Livestock Technology, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (44 Alchevskikh St., Kharkiv 61002, Ukraine), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: AAC-7369-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9502-626X>, gara176@khntusg.info

The author has read and approved the final manuscript.



Сублимация рыбопродуктов в условиях Арктики при производстве кормов для сельскохозяйственных животных

В. И. Сыроватка¹, Н. В. Жданова¹, А. Н. Рассказов^{1*},
А. Д. Обухов², Д. И. Торопов³

¹Институт механизации животноводства – филиал ФГБНУ
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Москва, Российская Федерация)

²ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Москва, Российская Федерация)

³Постоянное представительство Республики Мордовия при
Президенте Российской Федерации (г. Москва, Российская
Федерация)

*vniimzh@mail.ru

Введение. В статье рассмотрены биологические ресурсы Арктики, которые целесообразно использовать при производстве рыбной муки для кормления сельскохозяйственных животных. Задачей исследований является обоснование целесообразности применения непрерывно работающей двухкамерной линии сублимационной сушки рыбопродуктов, используя естественное замораживание улова рыбы и дешевый источник тепловой энергии для сушки: этан, пропан, бутан (отходы при очистке природного газа и нефтепродуктов местных предприятий), а также СВЧ-энергию.

Материалы и методы. Предложена непрерывно действующая двухкамерная линия сублимационной установки, камеры которой работают попеременно: одна – на процесс сублимационной сушки, а другая – на загрузку и выгрузку обрабатываемых продуктов. При этом используются естественное замораживание рыбы и тепловая энергия на процесс сублимации (сушки) от сжигания отходов газа. При наличии дешевой электроэнергии целесообразно применять для сушки СВЧ-энергию, которая позволяет сократить цикл сушки, обеспечить равномерность и одновременность высушивания материала до 3–5 % влажности без перестановки противней по высоте тележки.

Результаты исследования. Предложены конструкции двухкамерной линии сублимации крупнокусковых продуктов и сублимационной установки на базе СВЧ-энергии, которая позволяет регулировать температуру сублимации в заданных пределах.

Обсуждение и заключение. Представленные конструктивные решения линии сублимации крупнокусковых продуктов и сублимационной установки с применением СВЧ-энергии необходимы при проектировании оборудования на базе цифровых технологий.

Ключевые слова: биологические ресурсы Арктики, рыбная кормовая мука, корма для животных, двухкамерная линия, сублимационная установка, микроволновая энергия

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Сыроватка В. И., Жданова Н. В., Рассказов А. Н., Обухов А. Д., Торопов Д. И., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Сублимация рыбопродуктов в условиях Арктики при производстве кормов для сельскохозяйственных животных / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Н. Рассказов [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.274-290](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.274-290) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 274–290.

Original article

Sublimation Drying of Fish Products in the Arctic in the Production of Feed for Farm Animals

V. I. Syrovatka^a, N. V. Zhdanova^a, A. N. Rasskazov^{a*},
A. D. Obuhov^b, D. I. Toropov^c

^a*Institute of Livestock Mechanization – Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russian Federation)*

^b*Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russian Federation)*

^c*Permanent Mission of the Republic of Mordovia to the President of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)*

*vniimzh@mail.ru

Introduction. The article considers biological resources of the Arctic, which is expedient to use in the production of fish meal for feeding farm animals. The aim of the research is to prove the usefulness of a continuously operating two-chamber line for sublimation drying of fish products using natural freezing of fish catch and a cheap source of thermal energy for drying: ethane, propane, butane (waste when cleaning natural gas and petroleum products of local enterprises), as well as microwave energy.

Materials and Methods. A continuously operating two-chamber sublimation line is proposed, the chambers of which work alternately: one for the process of sublimation drying, and the other for loading and unloading processed products. The natural freezing of fish and thermal energy for the process of sublimation (drying) from the burning of waste gas are used whenever possible. When there is cheap electricity, it is advisable to use microwave energy for drying that makes it possible to shorten the drying cycle, ensure uniformity and simultaneity of drying the material up to 3–5% humidity without rearranging the trays along the height of the cart.

Results. We propose the construction of a two-chamber sublimation line for large lump products and a sublimation unit based on microwave energy, which allows regulating the sublimation drying temperature within specified limits.

Discussion and Conclusion. The presented design solutions of a large lump product sublimation drying line and sublimation unit using microwave energy are necessary for designing equipment based on digital technology.

Keywords: biological resources of the Arctic, fishmeal, animal feed, two-chamber line, sublimation unit, microwave energy

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

For citation: Syrovatka V.I., Zhdanova N.V., Rasskazov A.N., et al. Sublimation Drying of Fish Products in the Arctic in the Production of Feed for Farm Animals. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):274-290. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.274-290>

Введение

Разработка конкретных технологий по производству высококачественных комбикормов, витаминных и минеральных премиксов, препаратов и лекарственных средств с целью ветеринарного применения для сельскохозяйственных животных определена правительством Российской Федерации как приоритетное направление развития сельского хозяйства до 2026 года¹. Известно, что корма в себестоимости продукции животноводства составляют 65–75 %, а добавка рыбных компонентов существенно повышает конверсию корма и конкурентоспособность отрасли² [1]. Роль науки в выполнении этой проблемы заключается в изыскании новых высокоэффективных технологий, кормовых ингредиентов, видов энергии, повышающих качество комбикормов и снижающих затраты на производство единицы продукции. Использование биологических и энергетических ресурсов Арктики способствует решению поставленной задачи.

Стоит сказать о мировом производстве комбикормов. В рационах свиноводства комбикорма занимают 95 %, птицеводства – 100 %, в молочном скотоводстве – 35–40 %. Снизить затраты на производство продукции возможно за счет применения эффективных кормовых ингредиентов, лечебных кормов, видов энергии и технологий.

По данным единой межведомственной информационно-статистической системы Российской Федерации мировое производство комбикормов в 2019 году

составило 1,126 млрд т: 28 % комбикормов произведено для бройлеров; 24 % – для свиней; 14 % – для кур-несушек; 12 % – для молочного скотоводства; 12 % – для мясного скота; 4 % – для рыб; 2 % – для домашних животных.

Продуктивность животных зависит от протеиновой и энергетической питательности кормов. Питательная ценность оценивается содержанием протеина и энергетическими кормовыми единицами в кормовой единице комбикорма (ЭКЕ/к.ед.).

В комбикормах, производимых в Российской Федерации, в настоящее время содержится протеина 90–100 г/к.ед., а необходимо 100–130 г/к.ед.; ЭКЕ/к.ед. содержится 0,9–1,0, а необходимо 1,1–1,4.

Чтобы повысить питательную ценность, необходимо совершенствовать и рецептуру комбикормов. Исходя из рецептуры полноценных комбикормов, применяемых в мировой практике и передовых хозяйствах Российской Федерации, следует рекомендовать примерный рецепт комбикормов, который приведен ниже (табл. 1).

Цель исследования – описать способ и линию сублимационной сушки крупнокусковых продуктов (в основном рыбы) до влажности 3–5 % для того, чтобы увеличить срок хранения.

Обзор литературы

В настоящее время применяются паровые или электронагревательные системы размораживания, когда нагревают поверхность обрабатываемого продукта, а от нее тепло передается в центр частиц, которые нагреваются

¹ О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства [Электронный ресурс] // Указ президента Российской Федерации № 350 от 21 июля 2016 г. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41139> (дата обращения 02.12.2020); Приложение № 2 к протоколу заседания президиума совета по реализации Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы от 14 ноября 2018 г. № 4 ПС [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/news/34707/> (дата обращения 02.12.2020).

² Научно-технические проблемы освоения Арктики. Научная сессия Общего собрания членов РАН [Электронный ресурс] // ИНГТ СО РАН. URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/science/publications/publ-nauchno-tekhicheskie-problemy-osvoeniya-arktiki-nauchnaya-045167> (дата обращения 02.12.2020).

Рецепт комбикорма
Compound feed recipe

Ингредиенты / Ingredients	Доза ингредиента / Ingredient dose	
	Рекомендуется, % / Recommended, %	Содержится в настоящее время, % / Currently contained, %
Зерновые / Cereals	40–50	70–90
Бобовые (соя, рапс, горох) / Legumes (soybeans, rapeseed, peas)	8–10	2,0
Отходы пищевой промышленности / Food industry waste	10–12	2,0
Белково-витаминно-минеральные добавки / protein-mineral and vitamin supplements	2–3	1,0
Рыбная мука / Fish flour	15–20	0,5
Травяная мука / Herbal flour	6–8	1,0
Вермикультура / Vermiculture	3–4	0,5
Лечебные добавки (премиксы) / Medicinal additives (premixes)	1–2	–

медленно и неравномерно, что приводит к потере питательных свойств продукта³. Но эта технология сублимации продуктов хорошо отработана и может применяться при любом источнике пара (от теплоцентрали)⁴ [2]. В консервной промышленности используют паровые сублиматоры.

Сверхвысокочастотное излучение (СВЧ-излучение) относится к новому виду электротехнологий: равномерный и быстрый нагрев всего продукта, экологическая чистота нагрева, высокое бактерицидное действие – все это сохраняет качественные свойства продукта [3]. Для СВЧ характерно нагревать быстрее более влажные участки продукта. Длина волны электромагнитного излучения (ЭМИ) подобрана таким образом, что воздействует на мо-

лекулы воды в любом продукте. ЭМИ магнетронов, проникая внутрь продукта, колеблет молекулы воды с большой скоростью, возрастает сила трения между молекулами, соответственно, повышается температура воды [4]. Таким образом, процесс испарения начинается равномерно по всему объему при достаточно низкой температуре, что необходимо для сохранения первоначальных свойств продукта. Именно в этом заключается отличие СВЧ-сублимации от остальных способов [5].

Главный недостаток СВЧ-сублимации – удельный расход электроэнергии в 1,5 раза выше, чем в паровых сублиматорах. Поэтому они применяются преимущественно для экстренного приготовления продуктов и в условиях, где электроэнергия дешевле.

³ **Рогов И. А.** Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1988. 272 с.; **Александров А. А.** Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 159 с.

⁴ **Камовников Б. П., Малков Л. С., Воскобойников В. А.** Вакуум-сублимационная сушка пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1985, 288 с.

Основной недостаток систем – это цикличная работа установок, что приводит к простоям оборудования и неравномерной загрузке систем электроснабжения, теплоснабжения и транспорта⁵. В связи с этим предложена двухкамерная непрерывно действующая сублимационная установка, в которой размораживание продуктов возможно от паровых, электронагревательных или СВЧ-систем, исходя из экономической целесообразности для каждого конкретного случая.

Рыбная мука – ценный кормовой компонент, который ускоряет рост животных и применяется как средство активизации их биологической устойчивости к инфекционным заболеваниям [6]. В 1 000 г рыбной муки содержится более 500 г перевариваемого протеина (табл. 2), высокий процент незаменимых аминокислот, витаминов и минеральных солей, в том числе метионина, лизина, триптофана, значительно влияющих на физиологию животного (табл. 3). До 90 % белка, содержащегося в рыбной муке, усваивается животными. В дрожжах гидролизных перевариваемого протеина содержится чуть больше – 400 г; в подсолнечном шроте – около 380 г; в соевом – 360 г; в мясокостной муке – более 341 г; в горохе – около 200 г; в кукурузе – 80 г; в картофеле – более 10 г. В свиноводстве при скормливании 1 т рыбной муки (в составе растительных кормов) дополнительный привес составляет около 0,5 т в живой массе или 0,36 т в убойном весе [7]. Рыбная мука – безвредная и экологически чистая добавка, не содержащая искусственных химических компонентов и гормонов, что позволяет использовать ее в определенных дозах в качестве прикорма любым видам сельскохозяйственных животных⁶.

Материалы и методы

Известны недостатки применяемых однокамерных сублимационных установок: длительный цикл сушки одной порции сырья (от 8 до 22 часов), установка долгое время не работает и выключается в период загрузки сырья и выгрузки готовой продукции; обогреватели противней обладают высокой инерционностью, что отрицательно отражается на равномерности остаточной влажности высушиваемого материала; габаритные размеры обогревателей занимают основной объем сублимационной камеры.

Физические особенности сублимационной сушки

Паровые или электронагревательные системы размораживания нагревают поверхность частиц обрабатываемых продуктов, а от нее по принципу теплопроводности теплота передается в центр частиц продукта. Образование льда разрушает структуру обрабатываемого материала, что при подогреве облегчает процесс сублимации [8].

Электромагнитная энергия микроволновых источников преобразуется в тепловую энергию за счет взаимодействия электромагнитных полей и материалов. В дополнение к обеспечению энергией сублимационная сушка с помощью микроволновой печи позволяет сэкономить время. Этот метод, за счет проникновения электромагнитных полей в материал, более быстрый. Это приводит к объемному нагреву вместо нагрева от поверхности материалов в обычных методах. Частота электромагнитных волн составляет 2 450 МГц [3].

Технология сублимации вошла в обиход быстрого приготовления продуктов питания. Микроволновая обработка пищевых материалов получила значительное применение благодаря объемному нагревательному эффекту

⁵ Панфилов В. А. Теория технологического потока. М.: Колос, 2007. 319 с.

⁶ Что такое рыбная мука [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20180406130334/http://www.feedprom.com/rybnaya-muka> (дата обращения 02.12.2020).

Таблица 2
Table 2

Состав рыбной муки и ряда кормовых продуктов [7]
Composition of fishmeal and a range of feed products

Кормовой продукт / Fodder product	Содержание, % / Content, %					Перевариваемость протеина, г / Protein digestibility, g
	Белок (азот $\times 6,25$) / Protein (azot $\times 6,25$)	Жир / Fat	Зола / Ash	Клетчатка / Cellulose	Влага / Moisture contents	
Рыбная мука / Fish flour	52–67	1–18	15–30	–	5–12	500
Мука мясокостная / Meat and bone meal	46,7	14,0	23,2	–	9,2	341
Дрожжи гидролизные / Hydrolytic yeast	45,1	1,3	7,0	–	13,8	401
Бобы кормовые / Fodder beans	27,3	1,6	3,2	7,7	12,0	237
Овес / Oats	10,7	4,1	3,3	9,9	13,3	82
Кукуруза / Corn	10,2	4,7	1,5	2,7	14,8	78

Таблица 3
Table 3

Содержание незаменимых аминокислот [7]
Content of essential amino acids

Кормовой продукт / Fodder product	Содержание (г на 1 кг) / Content (g per 1 kg)						
	Лизин / Lysine	Аргинин / Arginine	Гистидин / Histidine	Метионин / Methionine	Валин / Valine	Лейцин + изолейцин / Leucine + isoleucine	Треонин / Threonine
Рыбная мука / Fish flour	36	45	20	18	38	59	31
Кукуруза / Corn	3	5	3	1	5	16	3
Ячмень / Barley	4	6	3	1,5	5	10	–
Овес / Oats	4	10	3	2	6	14	–
Отруби пшеничные / Wheat bran	5	8	9	2	8	12	4
Жмых подсолнечный / Sunflower cake	16	28	13	–	–	49	–
Жмых льняной / Flaxseed cake	11	27	7	8	21	42	13
Мука из люцерны / Lucerne flour	6	7	3	1	5	14	–
Шрот хлопковый / Cotton meal	14	35	9	8	18	36	11
Шрот соевый / Soybean meal	28	28	9	6	23	52	16

и более короткому времени обработки по сравнению с традиционными методами. Математическое моделирование поглощения СВЧ-энергии в процессе СВЧ-обработки может быть выполнено на основе закона Ламберта либо уравнений Максвелла [9]. Продукты, сублимированные до 3–5 % влажности, подвержены микробной порче [4; 10]. По мере производства сублимированных корма необходимо закрывать в крафт-мешки, изолируя от влажной окружающей среды [11]. Особенно опасный и доминирующий в продуктах гриб обнаружили при культивировании на экстракте агара Чапека [12].

Сушка СВЧ-энергией является стерильной и отвечает медицинским требованиям к микробной чистоте продуктов [13]. Сублимационная сушка позволяет получить продукты высшего качества, что делает метод наилучшим для мягкой сушки эксклюзивных продуктов [5]. В настоящее время уделяется большое внимание созданию устойчивой индустрии аквакультуры. Норвежская рыбководческая ферма уже может производить килограмм атлантического палтуса, затрачивая менее килограмма корма⁷.

Изложенные выше особенности сублимационной сушки целесообразно использовать для естественного замораживания улова рыбы, а для прогрева противней сублимационной камеры – теплоту от сжигания жирного газа, при этом возможно компенсировать энергозатратный процесс сублимации природными ресурсами.

Удаление льда (замерзшей воды) из продуктов, кормов или других материалов называют сублимационной сушкой. Такой процесс возможен при атмосферном (парциальном) давлении

ниже тройной точки (610,5 Па – 4,58 мм рт. ст.) и температуре 0 °С в условиях сухого холодного воздуха влажностью менее 100 %. Такие природные условия существуют в Арктике или создаются в морозильных камерах холодильников: процесс длительный, измеряется сутками. Интенсивность сублимации ускоряется при пониженном парциальном давлении 70 Па (0,5 мм рт. ст.) и температуре от –30 до –50 °С.

Преимущества сублимационной сушки: высокий уровень сохранения качества продуктов (рыбы), небольшая продолжительность сушки, удобство транспортирования и хранения рыбы, высушенной до 3–5 %, эффективное использование естественного северного холода и дешевой энергии тепла из отходов переработки газа и нефти в условиях интенсивного освоения районов Севера и Северного морского пути. Развитие предприятий по добыче и переработке теплоносителей (газа и нефти) обуславливает успешное развитие сублимационной сушки рыбы и рыбопродуктов.

Разработка новых машинных технологий и технических средств для сушки базируется на теплофизических свойствах (температура t , плотность ρ и теплопроводность λ).

Плотность насыпная (удельный вес) различных видов свежей рыбы составляет 930–1 100 кг/м³, она зависит от массы каждой отдельной особи, содержания в ней жира и влаги (табл. 4). Плотность целой рыбы понижается при повышении влажности и увеличении ее массы. Теплопроводность всех видов рыбы находится в пределах 0,3–0,5 Вт/(м·К), различие составляет менее 5 %.

⁷ Bank D. Aqua-Spark: Investing in Aquaculture for a Protein-Hungry Planet [Электронный ресурс]. URL: <https://impactalpha.com/aqua-spark-investing-in-aquaculture-for-a-protein-hungry-planet> (дата обращения 02.12.2020).

Таблица 4
Table 4Термофизические свойства рыбы и рыбопродуктов⁸
Thermophysical properties of fish and fish products

Рыба, рыбопродукты / Fish, fish products	Температура t , °C / Temperature t , °C	Плотность, насыпная ρ , кг/м ³ / Bulk density ρ , kg/m ³	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) / Thermal conductivity λ , W/(m·K)	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·К) / Specific heat C , J/(kg·K)
Лещ (филе) / Bream (fillet)	15	1 060	0,47	–
Лосось (филе) / Salmon (fillet)	15	980	0,50	3 517
Мидии черноморские / Black sea mussels	15	600	–	2 203
Минтай вяленый / Dried pollock	15	760	0,12	1 420
Окунь (филе) / Perch (fillet)	15	–	–	3 517
Осетр (филе) / Sturgeon (fillet)	15	1 060	0,43	3 645
Икра черная зернистая / Black granular caviar	20	900	0,16	–
Икра щуки / Pike caviar	10	1 100	0,55	4 000
Сазан (спинка) / Carp (back)	15	–	–	3 660
Сазан (филе) / Carp (fillet)	15	1 060	0,44	3 726
Скумбрия (филе) / Mackerel (fillet)	15	–	–	3 760
Судак / Zander	15	930	0,43	3 670
Судак вяленый / Dried zander	15	61	0,13	–
Треска (филе) / Cod (file)	15	1 052	0,47	3 580
Фарш минтая / Pollock mince	10	940	0,67	–
Хек вяленый / Dried hake	15	60	0,12	1 380

⁸ Куликов П. И. Производство муки, жира и белково-витаминных препаратов в рыбной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1971. 264 с.

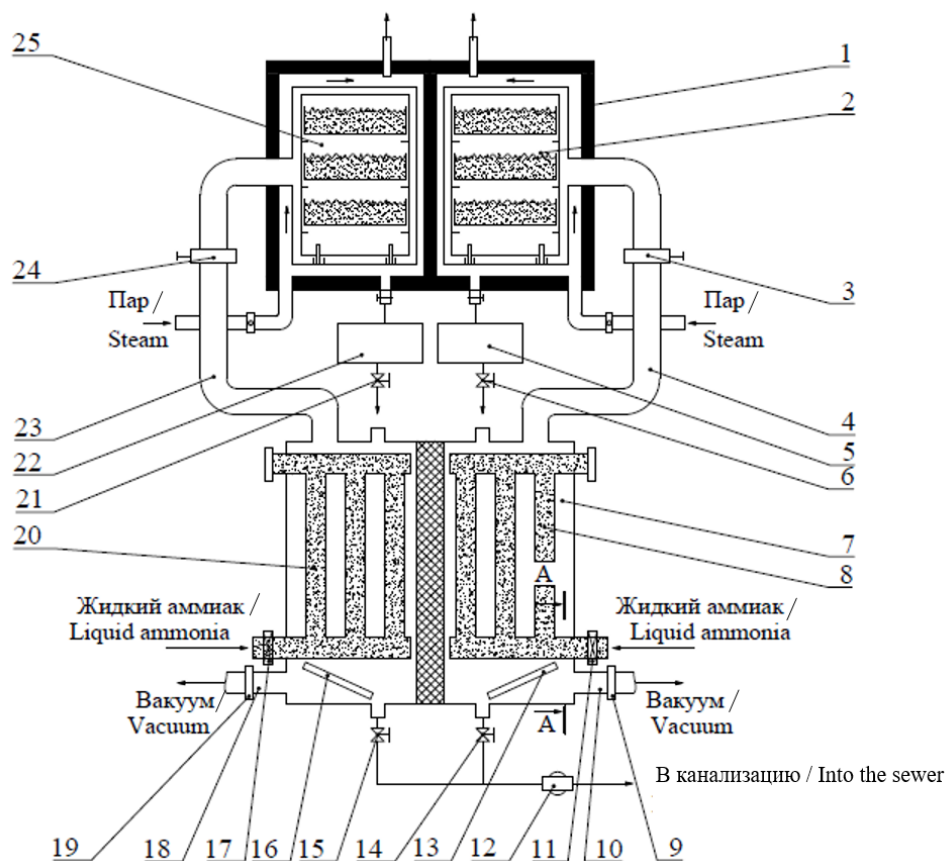
Коэффициент теплопроводности рыбы, высушенной способом сублимации, составляет 0,019–0,035 Вт/(м·К). Удельная теплоемкость C одинакова для различных видов рыбы и филе при температуре 12–18 °С и составляет 3 500–3 700 Дж/(кг·К).

Представленные выше теплофизические свойства рыбы и рыбопродук-

тов являются базовыми при выборе системы энергоподвода, от которой зависит эффективность процесса сублимации и качество тепловой обработки продукта.

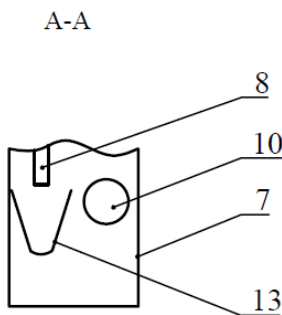
Результаты исследования

По результатам исследований предложена двухкамерная линия сублимации крупнокусковых продуктов (рис. 1).



Р и с. 1. Линия сублимации крупнокусковых продуктов и кормов:

- 1 – корпус; 2, 25 – сублимационные камеры; 3, 24 – затворы; 4, 23 – вакуум-трубы;
5, 22 – емкости для отвода конденсата; 6, 21 – краны; 7 – десублиматор;
8, 20 – секции десублиматора; 9 – затвор; 10 – патрубок; 11 – затвор для подачи аммиака;
12 – насос; 13, 16 – желоба для отвода талой воды; 14, 15 – краны;
17, 19 – затворы для подачи аммиака; 18 – вакуум-провод; 19, 24 – вакуумные затворы
- F i g. 1. Sublimation line for lumpy products and feed: 1 – body; 2, 25 – sublimation chambers;
3, 24 – gates; 4, 23 – pipe vacuum; 5, 22 – containers for condensate drainage; 6, 21 – taps;
7 – desublimator; 8, 20 – sections desublimator; 9 – gate; 10 – branch pipe;
11 – gate for ammonia supply; 12 – pump; 13, 16 – troughs for defrosting melt water; 14, 15 – taps;
17, 19 – valves for ammonia supply; 18 – vacuum pipeline; 19, 24 – vacuum closures



Р и с. 2. Разрез по А-А (рис. 1):
7 – десублиматор; 8 – секции десублиматора;
10 – патрубок; 13 – желоба для отвода
талой воды

Fig. 2. Cut A-A (Fig. 1): 7 – desublimator;
8 – desublimator sections; 10 – branch pipe;
13 – chutes for defrosting water

Рисунки 1 и 2: разрез А-А состоит из корпуса 1, в котором установлены сублимационные камеры 2 и 25, подключенные к вакуумным трубам 4 и 23 с затворами 3 и 24; они соединены с секциями 8 и 20 десублиматора 7. Под сублимационными камерами 2 и 25 расположены емкости 5 и 22 для отвода конденсата через краны 6 и 21 на секции десублиматора 8 и 20. Вакуум к секции 8 десублиматора подключен через затвор 9 и патрубок 10, аммиак подается в десублиматор через затвор 11, талая вода отводится по желобу 13. Секция 20 десублиматора укомплектована вакуум-проводом 18 и затворами 17 и 19 для подачи аммиака. Желоба 16 и 13 насоса 12 соединены с канализацией.

Последовательность запуска линии в работу следующая. Камеры сублимации 2 и 25 тщательно заполняются подготовленными продуктами обработки и герметизируются. Жидкий аммиак подается в секцию 8 десублиматора через затвор 11, а вакуум в сублимационную камеру 2 поступает через вакуум-провод 4 и 10, затворы 3 и 9; в сублимационную камеру подается пар и таким образом она запускается в работу.

Аммиак через открытый затвор 17 подается в секцию сублиматора 20,

а вакуум – по проводам 23 и 18. Лед из секции 20 десублиматора смывается аналогично конденсатом из емкости 22 через кран 21; талая вода через сточный желоб 16, кран 15 насосом 12 спускается в канализацию.

В условиях производства недорогой (избыточной) электроэнергии и сокращения цикла сублимации целесообразно использовать установку сублимации на базе СВЧ-энергии, которая встраивается в линию для сублимации кормов и продуктов, в ней вместо пара используется СВЧ-энергия [14; 15].

Оптимальная частота и мощность СВЧ-генератора выбираются в зависимости от производительности установки и вида обрабатываемой продукции [16].

Сублимационная установка содержит камеру сушки, СВЧ-камеру (рис. 3, 4), сообщающуюся с волноводом 2, форма которого идентична периметру СВЧ-камеры 1, а через встречные перпендикуляры, направленные волноводами 3, она соединена с однотипными СВЧ-генераторами 4 с одинаковым электромагнитным полем (частотой, амплитудой и мощностью). В центре боковых сторон СВЧ-камеры 1 установлены вакуум-отводы 5, а внутри ее размещается тележка 6 с направляющими фиксаторами 7 и стойками 8 с закрепленными уголками 9, на них установлены лотки 10, дно которых изготовлено из диэлектрической сетки 11, диагональ отверстия сетки меньше размера высушиваемых частиц.

Работа сублимационной установки

Измельченную до 50–100 мм замороженную рыбу в лотках 10 помещают в сублимационную камеру 1, устанавливая на уголки 9, закрепленные горизонтально на вертикальных стойках 8. Фиксаторы 7 удерживают тележку с продуктами на одинаковом расстоянии от боковых стенок тележки 6. В СВЧ-камеру по проводу 5 подается вакуум, а в сублимационную

камеру 1 по волноводам 3 от СВЧ-генераторов 4 подается СВЧ-энергия по волноводам 2 через проходы в диэлектрической сетке 11 к обрабатываемым продуктам и осуществляет их сублимацию: нагрев продуктов и отвод замороженных молекул воды и конденсата в канализацию.

Температура сублимации варьируется в пределах 100–130 °С. Когда обрабатываемый продукт высушивается до требуемой влажности (5–8 %), отключаются все системы и тележка с сухим продуктом выгружается [2; 17]

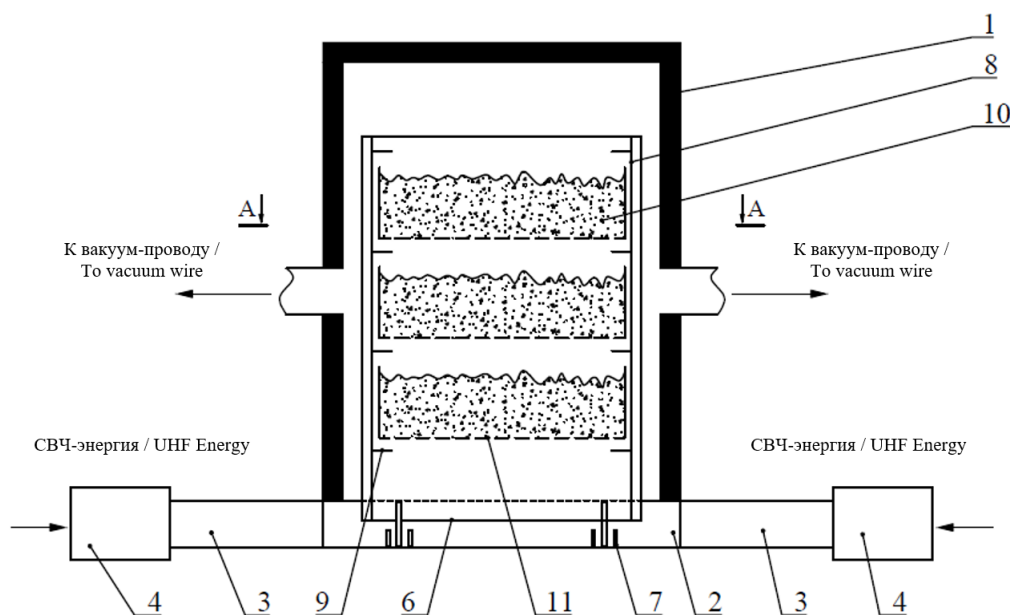
Применение СВЧ-энергии в предложенной конструкции сублимационной камеры обеспечивает равномерность сушки заложенного продукта и сокращает время цикла.

Известно, что максимальное электрическое поле в круглом волноводе (трубе) находится по оси и резко сни-

жается по радиусу, поэтому волновод, СВЧ-камеру и короб волновода следует оформлять прямоугольными (патент № 2382529).

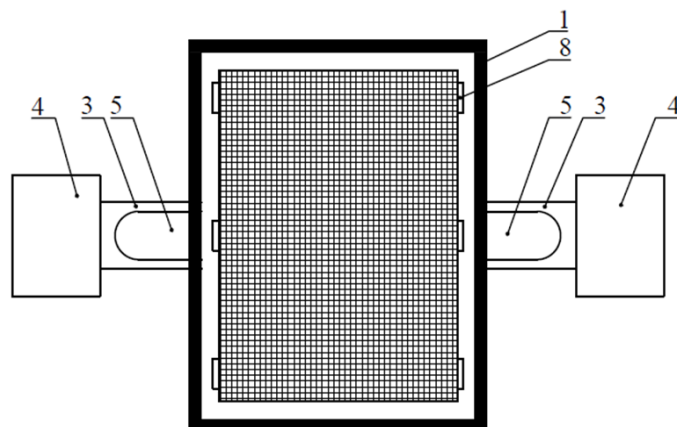
Обсуждение и заключение

Таким образом, реализуется безотходная экологичная и экономичная технология производства рыбной муки для корма (высокоэффективного компонента комбикормов). Непрерывная работа сублимационной установки, за счет двух попеременно работающих камер, позволяет сократить цикл сушки и удельные затраты энергии. При этом снижаются затраты электроэнергии на замораживание рыбы до минус 30 °С, так как в Арктике происходит естественное охлаждение, используются этан, пропан и бутан (отходы при очистке газа и нефтепродуктов на предприятиях, расположенных в той же местности).



Р и с. 3. Сублимационная установка: 1 – корпус СВЧ-камеры; 2 – короб волновода; 3 – волноводы; 4 – СВЧ-генератор; 5 – вакуум-отводы; 6 – тележка; 7 – направляющие фиксаторы; 8 – стойки; 9 – уголки; 10 – лотки; 11 – диэлектрическая сетка

F i g. 3. Sublimation plant: 1 – microwave chamber body; 2 – waveguide box; 3 – waveguides; 4 – microwave generator; 5 – vacuum outlets; 6 – trolley; 7 – guide clamps; 8 – racks; 9 – corners; 10 – trays; 11 – dielectric grid



Р и с. 4. Разрез А-А (рис. 3): 1 – корпус СВЧ-камеры; 3 – волноводы; 4 – СВЧ-генератор; 5 – вакуум-отводы; 8 – стойки

F i g. 4. Cut A-A (Fig. 3): 1 – microwave camera body; 3 – waveguides; 4 – microwave generator; 5 – vacuum outlets; 8 – racks

Измельченная сублимированная рыбная мука для приготовления кормов животным в крафт-мешках, заполненных инертным газом, может быть доставлена в любой регион России и длительное время храниться при плюсовых температурах [18–20].

Как уже было замечено, СВЧ-нагрев относится к новому особому виду электротехнологий. Его преимущества: безынерционность, то есть возможно мгновенно возобновить или приостановить подогрев обрабатываемого материала, рациональное преобразование СВЧ-энергии в тепловую, КПД этого процесса составляет 90 % [21]. СВЧ-энергия представляет собой взаимосвязанные переменные электрическое и магнитное поля, где изменение одного из них приводит к появлению другого. Процесс сублимационной сушки – это процесс перевода льда в газообразную фазу, минуя жидкое состояние.

Приведенной технологии сушки присущи следующие преимущества: высокая сохранность (90 %) белка, витаминов, вкуса, запаха, цвета и размеров, резкое снижение транспортных расходов, удельного веса (1/5–1/10 от веса необработанных продуктов) и возможность длительного хранения в соответствующей упаковке при положительной температуре, а также неподверженность радиации по причине высокой сухости [22]. Сублимационная сушка обеспечивает своевременную переработку и хранение аквакультуры. Недостатком сублимационной сушки является высокая энергоемкость (2,2–2,8 кВт·ч/кг удаленной влаги)⁹. Однако в условиях охлажденной или заморозившей рыбы и дешевой электроэнергии это выгодно. Проблема эффективного использования СВЧ-энергии в составе непрерывной двухкамерной линии сублимационной установки весьма актуальна и может быть успешно реализована в производстве.

⁹ Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1984. 80 с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Производство конкурентоспособных кормов для аквакультуры / Н. П. Мишуров, Л. Ю. Коваленко, В. И. Сыроватка, С. В. Пономарев // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 10 (280). – С. 15–18. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-280-4> (дата обращения: 01.12.2020). – Рез. англ.
2. **Камовников, Б. П.** Технично-экономические показатели сублимационных установок / Б. П. Камовников, М. Е. Фомин. – Текст : непосредственный // Мясная индустрия СССР. – 1975. – № 7. – С. 16–18.
3. **Kalantari, M.** Microwave Technology in Freeze-Drying Process / M. Kalantari. – DOI 10.5772/intechopen.74064 // Emerging Microwave Technologies in Industrial, Agricultural, Medical and Food Processing ; ed. by K. Y. You. – IntechOpen, 2018. – Pp. 143–157. – URL: <https://www.intechopen.com/books/emerging-microwave-technologies-in-industrial-agricultural-medical-and-food-processing/microwave-technology-in-freeze-drying-process> (дата обращения: 01.12.2020).
4. **Punathil, L.** Fundamentals of Microwave Processing of Food Materials: Modeling and Simulation Methods / L. Punathil, T. Basak. – DOI 10.1016/B978-0-08-100596-5.21842-8. – Текст : электронный // Reference Module in Food Science. – 2017. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005965218428?via%3Dihub> (дата обращения: 01.12.2020).
5. **Maffei, S.** Freezing and Freeze-Drying: The Future Perspective of Organ and Cell Preservation / S. Maffei, T. A. L. Brevini, F. Gandolfi. – DOI 10.1007/978-3-319-03572-7_9 // Stem Cells in Animal Species: From Pre-clinic to Biodiversity. Stem Cell Biology and Regenerative Medicine ; ed. by T. Brevini. – Cham : Humana Press, 2014. – Pp. 167–184. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-03572-7_9#citeas (дата обращения: 01.12.2020).
6. **Агеев, А. В.** Состояние и перспективы мирового и отечественного производства кормов для объектов аквакультуры, производства и потребления рыбной муки / А. В. Агеев // Рыбное хозяйство. – 2018. – № 5. – С. 81–85. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36675734> (дата обращения: 01.12.2020). – Рез. англ.
7. Рыбная мука в комбикормах / И. А. Егоров, А. Н. Шевяков, Т. В. Егорова [и др.] // Свиноводство. – 2020. – № 1. – С. 19–20. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42192531> (дата обращения: 01.12.2020). – Рез. англ.
8. **Yarmand, M.** Microwave Processing of Meat / M. Yarmand, A. H. Rad. – DOI 10.5772/20857. – Текст : электронный // Microwave Heating ; ed. by U. Chandra. – IntechOpen, 2011. – URL: <https://www.intechopen.com/books/microwave-heating/microwave-processing-of-meat> (дата обращения: 01.12.2020).
9. Интеллектуальная система управления и обеспечения эффективного производства продукции молочного скотоводства умной фермы / Ю. А. Иванов, В. К. Скоркин, П. И. Гриднев, Д. К. Ларкин. – DOI 10.30766/2072-9081.2019.20.1.57-67 // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 57–67. – URL: <https://www.agronauka-sv.ru/jour/article/view/302/302> (дата обращения: 01.12.2020). – Рез. англ.
10. **Морозов, Н. М.** Исследование инновационных направлений повышения эффективности производства продукции животноводства / Н. М. Морозов, А. Н. Рассказов // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 6. – С. 45–48. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/55-arkhiv-zhurnala-za-2018/950-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-iyun-6-252-2018> (дата обращения: 01.12.2020).
11. **Vaidramidis, V.** Predictive Microbiology / V. Vaidramidis. – DOI 10.1016/B978-1-78548-155-0.50001-0. – Текст : электронный // Modeling in Food Microbiology: From Predictive Microbiology to Exposure Assessment ; ed. by J.-M. Membré, V. Valdrámidis. – ISTE Press – Elsevier, 2016. – Pp. 1–15. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781785481550500010?via%3Dihub> (дата обращения: 01.12.2020).
12. **Jackson, S. A.** Yeasts and Molds: *Aspergillus Flavus* / S. A. Jackson, A. D. W. Dobson. – DOI 10.1016/B978-0-08-100596-5.01086-6 // Encyclopedia of Dairy Sciences ; ed. by J. W. Fuquay. –



2nd ed. – Academic Press, 2011. – Pp. 785–791. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005965010866?via%3Dihub> (дата обращения: 01.12.2020).

13. **Lenovich, L. M.** Survival and Death of Microorganisms as Influenced by Water Activity / L. M. Lenovich. – DOI 10.1201/9780203734148 // Water Activity: Theory and Applications to Food ; L. B. Rockland, L. R. Beuchat (eds). – 1st ed. – Boca Raton : Routledge, 1987. – 18 p. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9780203734148/water-activity-theory-applications-food-louis-rockland-larry-beuchat> (дата обращения: 01.12.2020).

14. **Ciurzyńska, A.** Freeze-Drying – Application in Food Processing and Biotechnology – a Review / A. Ciurzyńska, A. Lenart. – DOI 10.2478/v10222-011-0017-5 // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. – 2011. – Vol. 61, Issue 3. – Pp. 165–171. – URL: <http://journal.pan.olsztyn.pl/Freeze-Drying-Application-in-Food-Processing-and-Biotechnology-a-Review,98302,0,2.html> (дата обращения: 01.12.2020).

15. Патент № 2580964 Российская Федерация, МПК F26B 9/06(2006.01). Сублимационная установка : № 2015102338/06 : заявл. 26.01.2015 : опубл. 10.04.2016 / Сыроватка В. И., Мишуров Н. П., Комарчук Т. С., Бацазов Г. В. ; ФГБНУ ВНИИМЖ. – 7 с. – URL: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2580/2580964/patent-2580964.pdf (дата обращения: 01.12.2020). – Рез. англ.

16. Патент № 2581232 Российская Федерация, МПК A23K 30/12. Линия для сублимации кормов и продуктов : № 2015102332/13 : заявл. 26.01.2015 ; опубл. 20.04.2016 / Жданов Н. А, Сыроватка В. И., Бацазов Г. В., Комарчук Т. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИМЖ. – 7 с. – URL: <https://findpatent.ru/patent/258/2581232.html> (дата обращения: 01.12.2020).

17. Определение оптимального соотношения между дискретизацией и квантованием для СВЧ АЦП / Г. Алексеев, А. Каленов, И. Мухин, В. Репин // Электроника: наука, технология и бизнес. – 2019. – № 6. – С. 72–74. – URL: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/7/article_7510_450.pdf (дата обращения: 01.12.2020).

18. **Валигурский, Д. И.** Основные задачи обеспечения продовольственной независимости России / Д. И. Валигурский, Э. А. Арустамов. – Текст: электронный // Вестник евразийской науки. – 2018. – Т. 10, № 5. – URL: <https://esj.today/PDF/30ECVN518.pdf> (дата обращения: 01.12.2020). – Рез. англ.

19. Линия производства комбикормов для рыбы с вакуумным напылением / В. Василенко, Л. Фролова, И. Драган [и др.]. – DOI 10.25741/2413-287X-2019-04-2-059 // Комбикорма. – 2019. – № 4. – С. 38–40. – URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/04_19/04_2019_38-40.pdf (дата обращения: 01.12.2020).

20. Корма для ценных объектов аквакультуры: проблемы и решения / С. Пономарев, Ю. Федоровых, Ю. Ширина [и др.]. – DOI 10.25741/2413-287X-2019-04-3-062 // Комбикорма. – 2019. – № 4. – С. 57–58. – URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/04_19/04_2019_57-58.pdf (дата обращения: 01.12.2020).

21. Баротермическая обработка ингредиентов комбикормов / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Н. Рассказов, Д. И. Торопов. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201903.428-442 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 428–442. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/723-10-15507-0236-2910-029-201903-7> (дата обращения: 01.12.2020). – Рез. англ.

22. **Morozov, N.** Innovative Maintenance and Feeding of Weaning Piglets Based on New Technical Means / N. Morozov, L. Tsoy, A. Rasskazov // Inmatech – Agricultural Engineering. – 2020. – Vol. 62, no. 3. – Pp. 49–54. – URL: <https://inmatech.eu/api/uploads/62-05-N62-Morozova42ae020-b2d3-4bd8-a55c-4c87c9a04e59.pdf> (дата обращения: 01.12.2020).

Поступила 11.12.2020; одобрена после рецензирования 21.01.2021; принята к публикации 05.02.2021

Об авторах:

Сыроватка Владимир Иванович, заведующий лабораторией Института механизации животноводства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, Российская Федерация, г. Москва, п. Знамя Октября, д. 31), академик РАН, доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2846-9041>, vniimzh@mail.ru

Жданова Наталья Владимировна, инженер-исследователь Института механизации животноводства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, Российская Федерация, г. Москва, п. Знамя Октября, д. 31), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-044X>, vniimzh@mail.ru

Рассказов Александр Николаевич, ведущий научный сотрудник Института механизации животноводства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, Российская Федерация, г. Москва, п. Знамя Октября, д. 31), кандидат экономических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-5404>, vniimzh@mail.ru

Обухов Андрей Дмитриевич, главный специалист лаборатории цифровых систем и роботизированных технических средств в молочном животноводстве отдела механизации и автоматизации процессов в животноводстве ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3674-5659>, a.d.obukhov@yadnex.ru

Торопов Дмитрий Иванович, полномочный представитель Республики Мордовия при Правительстве Российской Федерации Постоянного представительства Республики Мордовия при Президенте Российской Федерации (127018, Российская Федерация, г. Москва, ул. Образцова, д. 29), доктор экономических наук, toropov54@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. И. Сыроватка – научное руководство, подготовка начального варианта текста, методология, представление данных в тексте, курирование.

Н. В. Жданова – сбор данных и доказательств, изучение концепции, подготовка рисунков.

А. Н. Рассказов – компьютерные работы, сбор данных и доказательств, формализованный анализ данных.

А. Д. Обухов – представление данных в тексте, изготовление рисунков, представление технологических и конструктивных данных в тексте.

Д. И. Торопов – критический анализ и доработка текста, курирование данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mishurov N.P., Konovalenko L.Yu., Syrovatka V.I., Ponomarev S.V. Production of Competitive Feed for Aquaculture. *Technika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2020; (10):15-18. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-280-4> (accessed 01.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kamovnikov B.P., Fomin M.Ye. [Technical and Economic Indicators of Sublimation Plants]. *Myasnaya industriya SSSR* = Meat Industry of the USSR. 1975; (7):16-18. (In Russ.)
3. Kalantari M. Microwave Technology in Freeze-Drying Process. In: You K. Y. ed. Emerging Microwave Technologies in Industrial, Agricultural, Medical and Food Processing. IntechOpen; 2018. p. 143-157. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.74064>
4. Punathil L., Basak T. Fundamentals of Microwave Processing of Food Materials: Modeling and Simulation Methods. *Reference Module in Food Science*. 2017. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21842-8>
5. Maffei S., Brevini T.A.L., Gandolfi F. Freezing and Freeze-Drying: The Future Perspective of Organ and Cell Preservation. In: Brevini T. ed. Stem Cells in Animal Species: From Pre-clinic to Biodiversity. Stem Cell Biology and Regenerative Medicine. Cham: Humana Press; 2014. p. 167-184. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-03572-7_9
6. Ageev A.V. Modern Status and Prospects of Global and Domestic Production and Consumption of Fishmeal and Fodder for Aquaculture Facilities. *Rybnoe khozyaystvo* = Fishery. 2018; (5):81-85. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36675734> (accessed 01.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)



7. Egorov I.A., Shevyakov A.N., Egorova T.V., et al. Fish Flour in Mixed Feed. *Svinovodstvo* = Pig Farming. 2020; (1):19-20. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42192531> (accessed 01.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Yarmand M., Rad A.H. Microwave Processing of Meat. In: Chandra U. ed. *Microwave Heating*. IntechOpen; 2011. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/20857>
9. Ivanov Yu.A., Skorkin V.K., Gridnev P.I., Larkin D.K. Intelligent System of Management and Providing Dairy Cattle Production Effectiveness on a Smart Farm. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019; 20(1):57-67. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.1.57-67>
10. Morozov N.M., Rasskazov A.N. [Study of Innovative Ways to Improve the Efficiency of Livestock Production]. *Tekhnika v selskom hozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2018; (6):45-48. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/55-arkhiv-zhurnala-za-2018/950-tehnika-i-oborudovanie-dlya-sela-iyun-6-252-2018> (accessed 01.12.2020). (In Russ.)
11. Vaidramidis V. Predictive Microbiology. In: Membré J.-M., Valdramidis V. (eds). *Modeling in Food Microbiology: From Predictive Microbiology to Exposure Assessment*. ISTE Press – Elsevier; 2016. p. 1-15. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-155-0.50001-0>
12. Jackson S.A., Dobson A.D.W. Yeasts and Molds: *Aspergillus Flavus*. In: Fuquay J.W. ed. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 2nd ed. Academic Press; 2011. p. 785-791. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.01086-6>
13. Lenovich L.M. Survival and Death of Microorganisms as Influenced by Water Activity. In: Rockland L.B., Beuchat L.R. (eds). *Water Activity: Theory and Applications to Food*. 1st ed. Boca Raton: Routledge; 1987. 18 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203734148>
14. Ciużyńska A., Lenart A. Freeze-Drying – Application in Food Processing and Biotechnology – a Review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2011; 61(3):165-171. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/v10222-011-0017-5>
15. Syrovatka V.I., Mishurov N.P., Komarchuk T.S., Batsazov G.V. Freeze-Dryer. Patent 2,580,964 Russian Federation. 2016 April 10. Available at: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2580/2580964/patent-2580964.pdf (accessed 01.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Zhdanov N.A., Syrovatka V.I., Batsazov G.V., Komarchuk T.S. [Line for Sublimation of Food and Products]. Patent 2,581,232 Russian Federation. 2016 April 20. Available at: <https://findpatent.ru/patent/258/2581232.html> (accessed 01.12.2020). (In Russ.)
17. Alekseev G., Kalenov A., Mukhin I., Repin V. [Determination of the Optimal Ratio Between Sampling and Quantization for Microwave ADCs]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya i biznes* = Electronics: Science, Technology and Business. 2019; (6):72-74. Available at: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/7/article_7510_450.pdf (accessed 01.12.2020). (In Russ.)
18. Valigurskiy D.I., Arustamov E.A. The Main Tasks of Ensuring Food Independence of Russia. *Vestnik evraziyskoy nauki* = The Eurasian Scientific Journal. 2018; 10(5). Available at: <https://esj.today/PDF/30ECVN518.pdf> (accessed 01.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Vasilenko V., Frolova L., Dragan I., et al. [Production Line for Fish Mixed Fodder with Vacuum Spraying]. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2019; (4):38-40. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2019-04-2-059>
20. Ponomarev S., Fedorovykh Yu., Shirina Yu., et al. [Feed for Valuable Aquaculture Facilities: Problems and Solutions]. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2019; (4):57-58. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2019-04-3-062>
21. Syrovatka V.I., Zhdanova N.V., Rasskazov A.N., Toropov D.I. Barothermal Processing of Animal Feed Ingredients. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):428-442. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.428-442>
22. Morozov N., Tsoy L., Rasskazov A. Innovative Maintenance and Feeding of Weaning Piglets Based on New Technical Means. *Inmateh – Agricultural Engineering*. 2020; 62(3):49-54. Available at: <https://inmateh.eu/api/uploads/62-05-N62-Morozova42ae020-b2d3-4bd8-a55c-4c87c9a04e59.pdf> (accessed 01.12.2020). (In Eng.)

About the authors:

Vladimir I. Syrovatka, Head of the Laboratory of Institute of Livestock Mechanization – Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (31 Poselok Znamya Oktyabrya, Moscow 108823, Russian Federation), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2846-9041>, vniimzh@mail.ru

Natalya V. Zhdanova, Research Engineer of Institute of Livestock Mechanization – Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (31 Poselok Znamya Oktyabrya, Moscow 108823, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-044X>, vniimzh@mail.ru

Aleksandr N. Rasskazov, Leading Researcher of Institute of Livestock Mechanization – Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (31 Poselok Znamya Oktyabrya, Moscow 108823, Russian Federation), Cand.Sc. (Econ.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-5404>, vniimzh@mail.ru

Andrey D. Obuhov, Chief Specialist of the Laboratory of Digital Systems and Robotics in Dairy Animal Husbandry, Department of Mechanization and Automation of Processes in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3674-5659>, a.d.obukhov@yadnex.ru

Dmitriy I. Toropov, Plenipotentiary Representative of the Republic of Mordovia to the President of the Russian Federation, Permanent Mission of the Republic of Mordovia to the President of the Russian Federation (29 Obraztsova St., Moscow 127018, Russian Federation), D.Sc. (Econ.), toropov54@mail.ru

Contribution of the authors:

V. I. Syrovatka – scientific supervision, preparation of the initial draft of the text, methodology, presentation of data in the text, curation.

N. V. Zhdanova – collecting data and evidence, examining the concept, preparing drawings.

A. N. Rasskazov – computer work, data and evidence collection, and formalized data analysis.

A. D. Obuhov – presentation of data in the text, making drawings, presentation of technological and design data in the text.

D. I. Toropov – critical analysis and revision of the text, curation of data.

All authors have read and approved the final manuscript.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / ELECTROTECHNOLOGIES AND ELECTRICAL EQUIPMENT IN AGRICULTURE

УДК 664.65.05

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.291-303

Оригинальная статья

Описание новой методики приготовления хлебобулочных изделий из пшенично-ржаной муки на закваске

И. Ю. Шелехов*ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет» (г. Иркутск, Российская
Федерация)**promteplo@yandex.ru*

Введение. В статье представлены результаты исследования по применению различных методов термообработки хлебобулочных изделий. Показано, что инфракрасный метод является одним из перспективных при термообработке. Проведенный анализ демонстрирует, что при комбинировании различных способов термообработки у продуктов сохраняются потребительские качества и уменьшается время технологического цикла. Автором предлагается применение метода термического воздействия в индустрии быстрого питания.

Материалы и методы. Предметом исследования является новый способ термической обработки хлебобулочных изделий из пшенично-ржаной муки с использованием инфракрасного излучения. Для исследования был изготовлен нагревательный блок (патент на полезную модель № 199820). Были установлены нагревательные элементы, изготовленные по технологии сеткотрафаретной печати, управление и контроль нагревательными элементами осуществлялся с помощью ПИД-регулятора марки ТРМ 148-Т с интерфейсом RS-485.

Результаты исследования. В статье показано, что с помощью данного метода можно создавать равномерное поле нагрева продукта. Приводятся результаты исследований управления температурными режимами приготовления хлебобулочных изделий. Показано, что время приготовления хлебобулочных изделий сократилось более чем на 25 %, при этом потребительские качества продукта не изменились.

Обсуждение и заключение. Исследования показали, что применение описанного способа термической обработки открывает новые возможности в индустрии быстрого питания и других отраслях народного хозяйства. Результаты показали, что при наборе экспериментальных данных метод можно применить в индивидуальном секторе и осуществить интеллектуализацию процесса приготовления различных продуктов питания.

© Шелехов И. Ю., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: инфракрасный нагревательный элемент, пшенично-ржаной хлеб, термообработка, равномерное температурное поле, индустрия быстрого питания, потребительские свойства

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шелехов, И. Ю. Описание новой методики приготовления хлебобулочных изделий из пшенично-ржаной муки на закваске / И. Ю. Шелехов. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.291-303](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.291-303) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 291–303.

Original article

Description of a New Methodology for Baking Products from Wheat and Rye Flour by the Sour Dough Method

I. Yu. Shelekhov

Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

promteplo@yandex.ru

Introduction. The article presents the results of a study of using various methods for thermal processing of bakery products. It is shown that the infrared method is one of the most promising methods of heat treatment. The analysis showed that when combining different methods of heat treatment, the products retain their consumer qualities and the time of the technological cycle is reduced. The author proposes to use the method of thermal processing in the fast food industry.

Materials and Methods. The subject of the study is a new method of thermal processing of bakery products made from wheat-rye flour using infrared radiation. For the study, a heating unit was manufactured in accordance with the patent for utility model No. 199820, where heating elements made using the grid-screen printing technology were installed; the performance of heating elements was controlled by a device with a PID controller of the TRM 148-T brand with an RS-485 interface.

Results. The article shows that this method can be used to create a uniform product heating. The results of studies on the control of temperature conditions for baking bread are presented. It has been shown that the time of baking bread decreased by more than 25%, while the consumer quality of the product did not change.

Discussion and Conclusion. The studies have shown that the use of the method for thermal processing opens up new opportunities for the fast food industry and other sectors of the national economy. The results of the study showed that together with a set of experimental data, this method will be possible to use in the individual sector and to carry out the intellectualization of the process of preparing various food products.

Keywords: infrared heating element, wheat and rye bread, heat treatment, uniform temperature field, fast food industry, consumer properties

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Shelekhov I.Yu. Description of a New Methodology for Baking Products from Wheat and Rye Flour by the Sour Dough Method. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):291-303. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.291-303>

Введение

В кулинарном производстве процесс приготовления хлебобулочных изделий относится к разряду сложных физико-химических процессов и зависит от множества различных факторов, в том числе от технологического оборудования и способа термического воздействия. В зависимости от способов термического воздействия на готовящийся продукт меняются его потребительские качества, а также количество энергетических затрат. Исследования и внедрение новых способов термического воздействия на продукты питания будут положительно влиять на степень эффективности выпечки хлеба и доступность качественного продукта массовому потребителю.

Хлебобулочные изделия играют важную роль в индустрии быстрого питания. Потребительское качество, время приготовления определяются технологическими режимами и применяемым оборудованием. Совершенствование и оптимизация технологических режимов в данной отрасли осуществляется в основном за счет внедрения систем автоматизации и применения программируемых устройств без изменения метода термического воздействия, при этом особое внимание уделяется инфракрасному методу [1]. Опыт мастеров кулинарного искусства демонстрирует преимущество инфракрасного метода приготовления продуктов питания, а системы автоматизации помогают распространить этот опыт в индустрии [2]. Для быстрого питания инновации в области оптимизации алгоритмов управления технологическими процессами являются приоритетом, так как при обработке продуктов инфракрасным излучением различной интенсивности, в совокупности с другими термическими процессами, у продукта появляются новые потребительские свойства, что позволяет расширять ассортимент выпускаемой продукции [3].

В отличие от всех других методов термического воздействия на продукты питания спектр воздействия инфракрасного излучения на любой продукт зависит от его состава и структуры. В нашем исследовании мы предлагаем осуществить воздействие инфракрасным излучением волн различной длины на продукт. Количество энергии $Q(t)$, необходимое для приготовления продукта, определяется его теплоемкостью, а время приготовления зависит от площади теплопередачи и коэффициента теплопроводности. В случае с инфракрасным излучением немаловажную роль играют три физических параметра: длина волны, интенсивность и площадь излучения. От длины волны зависит глубина проникновения тепловой энергии. Интенсивность воздействия влияет на величину передаваемой энергии в заданный объем продукта. При увеличении интенсивности с одной и той же площади мы получаем большее количество энергии, которое обеспечивает приготовление наружных и внутренних слоев продукта. Чтобы добиться необходимого качества изделия из пшенично-ржаной муки на закваске, важно обеспечить равномерное температурное поле за счет интенсивности инфракрасного излучения с различными значениями длин волн с заданной площади нагрева. Для применения новой методики термического воздействия в индустрии быстрого питания необходимо также обеспечить управление технологическими режимами при изменении объема готовящегося продукта.

Обзор литературы

Обзор литературы показывает, что среди научных работ в данном направлении особое место занимают исследования, связанные с созданием различных композиций зерновых культур для понижения количества глютена, для придания более высоких потребительских свойств в состав добавляются различные пищевые добавки [4–7]. Ученые

отмечают, что формирование продукта перед термообработкой должно сопровождаться приданием определенных реологических свойств, которые благоприятно будут влиять на процесс теплопередачи, а значит, и на процесс термообработки¹ [8–10]. Термообработка продукта – это процесс, во время которого продукт доводится до готовности и ему придаются основные потребительские свойства. Изучается непосредственный отклик на любое термическое воздействие, которое может повлиять на технологический процесс [11].

Основными факторами, влияющими на сохранение потребительских качеств, являются состав и способ термообработки. Исследования в области микробиологических и физико-химических свойств показали, что при одинаково высоком качестве получаемого продукта, в котором содержатся полезные свойства биологически активных веществ, бывших в исходном сырье, их сохранение осуществляется в зависимости от применяемого технологического режима термообработки, при этом выявлено, что определяющим фактором является равномерное температурное воздействие как на площадь, так и на объем продукта [12].

Работы в данном научном направлении ведут многие российские и зарубежные исследователи. С помощью конструктивных решений они пытаются расширить функциональные возможности имеющихся нагревательных элементов инфракрасного действия. Основная задача сводится к увеличению площади равномерного воздействия инфракрасного излучения на изготавливаемый продукт. В основном это достигается включением

в конструкцию дополнительных экранов и отражателей или применением промежуточных материалов с большим коэффициентом теплоемкости [13; 14]. Инфракрасный нагрев хорошо зарекомендовал себя при приготовлении замороженных продуктов. В данном случае он помогает сохранить не только энергетическую ценность продуктов, но и вкусовые качества после замораживания полуфабрикатов при приготовлении хлебобулочных изделий.

Большой вклад в данном научном направлении делается российскими учеными, которые ведут работы по созданию безынерционных систем для выпечки хлеба с учетом сложного биохимического процесса, который происходит в продукте от начальной до конечной стадии изготовления [15; 16]. Ученые описывают электроконтактный способ приготовления хлеба, указывая на тот факт, что при управлении скоростью прогрева слоев продукта можно максимально сохранить полезные свойства и вкусовые качества. Сравнительные характеристики, которые приводят ученые, показывают, что данный контактный способ превосходит традиционный радиационно-конвекционный, который используется в большинстве хлебопекарных производств [17]. В работах зарубежных авторов также показано, что процесс выпечки и упек хлеба определяются равномерностью распределения температурного поля и скоростью регулирования температуры [18].

Особо хочется отметить результаты натурных исследований, которые показывают, что в создании конвейерных технологий переработки сельскохозяйственных продуктов, а именно хлебобулочных изделий, определяющими являются технология термического

¹ Kaplan S. L. Good Bread Is Back: A Contemporary History of French Bread, the Way It Is Made, and the People Who Make It. Durham. London: Duke University Press, 2006. 384 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/37720453_Good_bread_is_back_a_contemporary_history_of_French_bread_the_way_it_is_made_and_the_people_who_make_it (дата обращения: 10.03.2021).

воздействия и конструкции нагревательных элементов [19].

Многие ученые указывают на то, что необходима разработка альтернативных ускоренных способов производства, при которых повысятся качество и физиологическая полноценность хлеба как традиционного продукта питания, включая общую теорию равномерного распределения инфракрасных волн при готовке продуктов [20–22].

Материалы и методы

Для исследования была взята рецептура хлебобулочного изделия из пшенично-ржаной муки на закваске «Домашний хлеб». Он подается к блюдам в одном из ресторанов итальянской кухни г. Иркутска. Оговоримся, что в классическом понимании хлебом может называться изделие весом больше 500 г. Исследуемый объект весит 125 г, но по рецепту является итальянским хлебом кафоне. Хлебобулочное изделие в миниатюрной форме готовится без добавок, имеет округлую форму.

Многие производители стараются изменить рецептуру и способ приготовления для увеличения производительности и снижения себестоимости продукта [23]. Продукция данного ресторана не является исключением: у кафоне мучная база готовится на основе старого или оставленного после предыдущей выпечки теста, используется закваска из ржаной муки. Изделие выпекается при 180 °C в увлажненной духовке 1 ч, предварительно их выкладывают на противень и дают подняться.

Для выпекания изделий использовалась стандартная духовка марки Gorenje, в которой были удалены штатные нагревательные элементы и установлены нагревательные блоки инфракрасного действия, изготовленные в соответствии с патентом на полезную модель № 199820 [24]. Нагревательные элементы для блоков изготавливались по технологии сеткотрафаретной печати

(патент № 2463748) [25]. Нагревательные блоки были расположены в два ряда, в каждом ряду по четыре нагревательных элемента (рис. 1), два горизонтальных 4 и два вертикальных 5. В общей сложности в печи устанавливаются 8 нагревательных элементов.

Данные нагревательные элементы, в зависимости от технологического цикла, можно подключать совместно или автономно, создавая необходимое температурное поле для приготовления продукта.

Продукт может быть различного размера: на рисунке 1 показан минимальный 1, средний 2 и большой 3. Для создания равномерного поля на маленьком пространстве задействованы греющие слои у горизонтальных нагревателей из области RT , а у вертикальных ZV . Соответственно, равномерное поле на среднем размере обеспечивается областями QO и YI , а на большом размере областями PW и XJ .

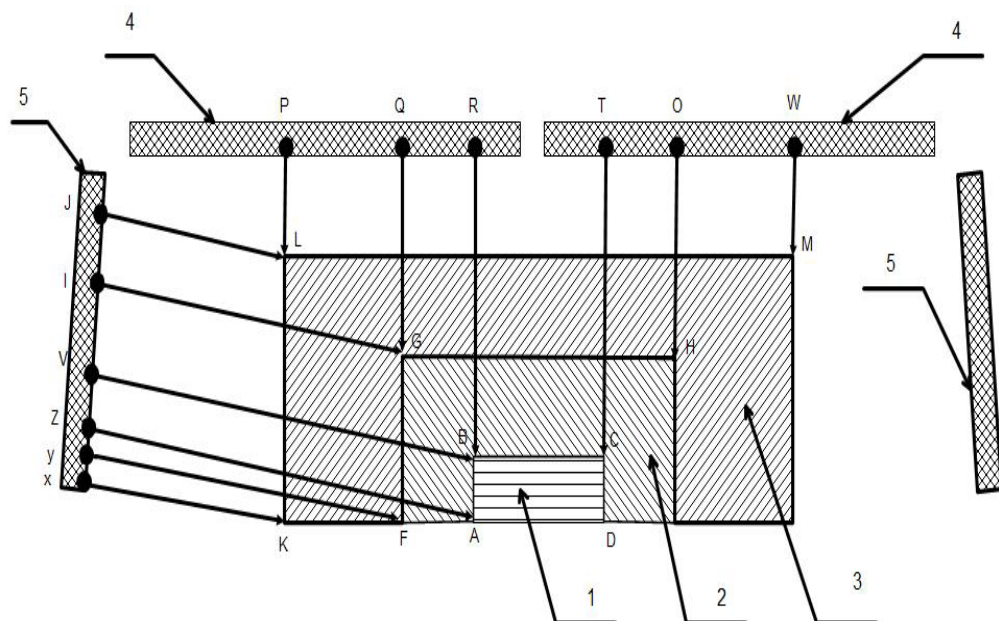
Для управления греющими слоями был использован прибор с ПИД-регулятором температуры ТРМ 148-Т с интерфейсом RS-485, время воздействия установленной температурой контролируется таймером.

В процессе экспериментов отслеживалась температура на нагревательных элементах, а для оптимизации технологических параметров – температура в готовящемся продукте.

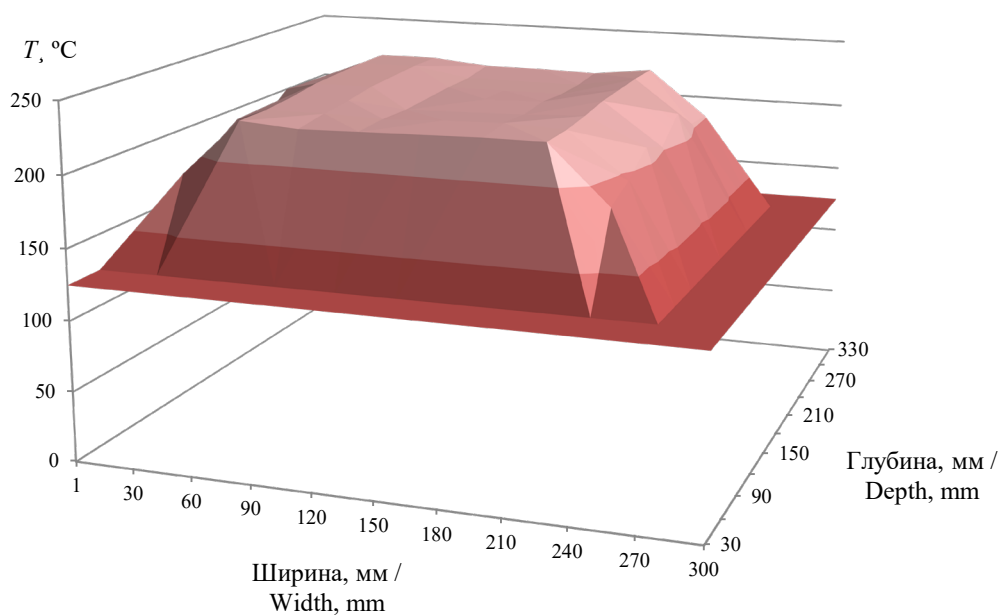
Результаты исследования

Контроль температурных параметров в печи показал, что путем изменения конфигурации подключения нагревательных элементов и контроля выделяемой мощности можно создавать равномерное распределение температурного поля необходимого размера.

На рисунке 2 показано минимальное распределение температурного поля при потреблении 400 Вт, отклонение от заданного интервала ± 5 °C на площади 200 см².



Р и с. 1. Модель воздействия нагревателей инфракрасного действия на изготавливаемый продукт
F i g. 1. Model of the effect of infrared heaters on the prepared product



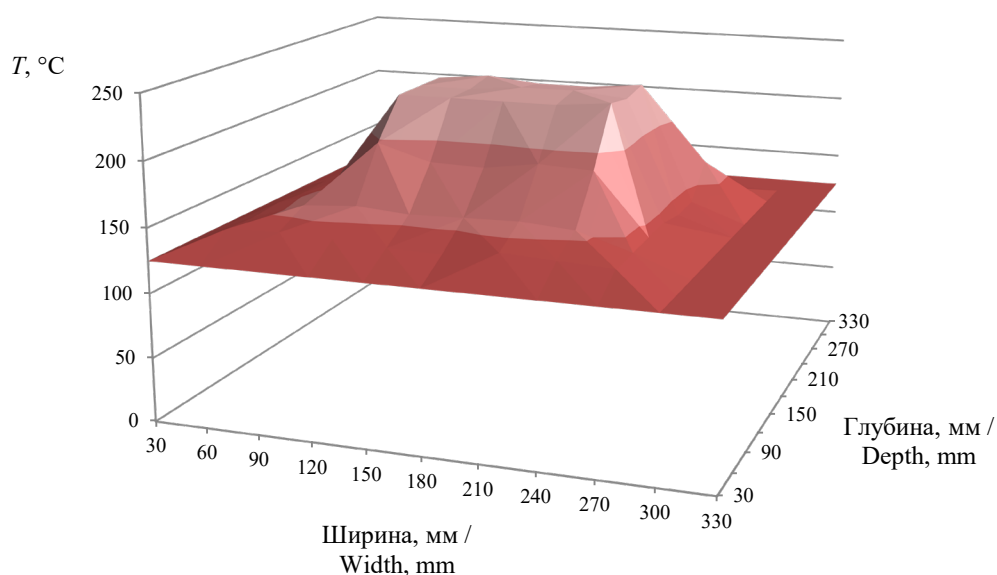
Р и с. 2. Параметры линейности распределения температуры при мощности 400 Вт
F i g. 2. Parameters of the linearity of the temperature distribution at a power of 400 W

На рисунке 3 показано распределение температурного поля при потреблении 1 440 Вт, отклонение от заданного интервала $\pm 10^\circ\text{C}$ на площади 600 см^2 .

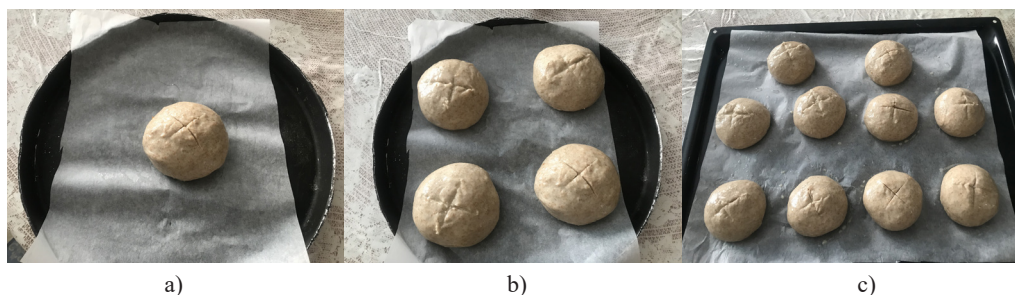
Из графиков, представленных на рисунках 2 и 3 видно, что нагревательные блоки могут создавать равномерное температурное поле на заданном пространстве и вырабатывать необходимое количество энергии для технологического процесса. Соответственно, в зависимости от количества изготавливаемого продукта в одной

и той же камере можно задать локализованную зону нагрева. После серии экспериментов были выбраны оптимальный технологический режим для приготовления хлебобулочного изделия из ржано-пшеничной муки и время выпекания.

Для подтверждения экспериментальных расчетов было приготовлено тесто по рецептуре указанного выше ресторана: выпечка одного образца (рис. 4а), четырех образцов (рис. 4б) и десяти образцов (рис. 4с).



Р и с. 3. Параметры линейности распределения температуры при мощности 1 440 Вт
F i g. 3. Parameters of the linearity of the temperature distribution at a power of 1,440 W



Р и с. 4. Образцы для выпечки хлебобулочного изделия из ржано-пшеничной муки
F i g. 4. Samples for baking products from rye-wheat flour

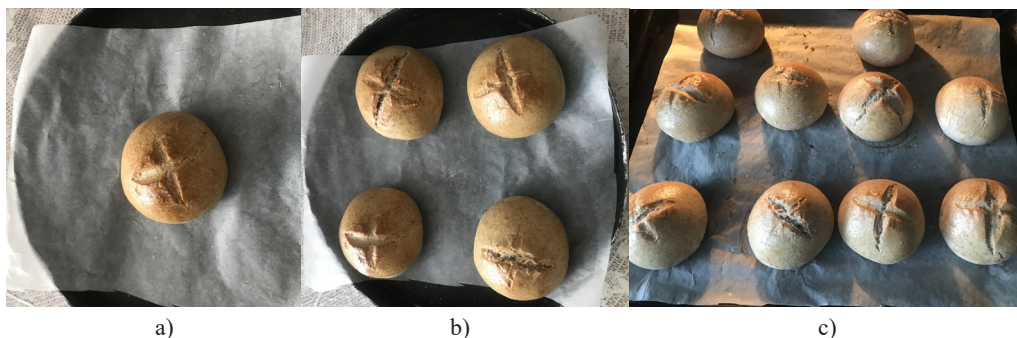
На рисунке 5 представлена полученная выпечка, время выпекания во всех трех случаях составила 44 минуты. Визуальная разница между полученным продуктом и изделием, предлагаемым рестораном, не наблюдается (рис. 6), потребительские свойства идентичны.

Обсуждение и заключение

Инфракрасный способ приготовления – перспективное направление в области обработки пищевой продукции. С его помощью возможна термообработка широкого спектра продуктов без снижения качества, оптимизация энергетических затрат и существенное сокращение технологического цикла.

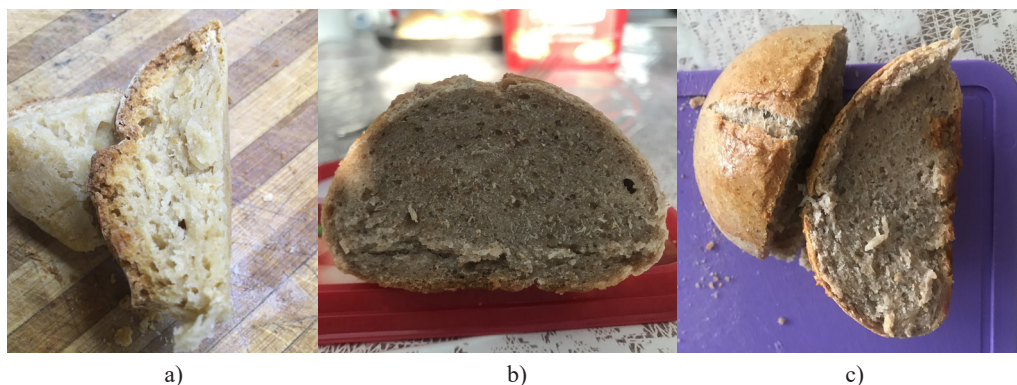
Работы в области совершенствования инфракрасного метода термического воздействия на продукты питания остаются актуальными. Благодаря новой технологии производства нагревательных элементов инфракрасного действия открываются перспективы по их применению не только в индустрии питания, но и в других отраслях народного хозяйства [26].

Описанный метод позволяет снизить время приготовления продуктов питания, удешевить процесс производства технологического оборудования, увеличить степень надежности и универсальности.



Р и с. 5. Выпечка, осуществленная в соответствии с новой методикой

F i g. 5. Products baked in accordance with the new method



Р и с. 6. Визуальное представление приготовленного продукта

F i g. 6. A visual representation of the prepared product

Дальнейшие работы в данной области помогут увеличить набор экспериментальных данных, благодаря чему появится возможность не только расширить спектр продуктов, но и осуществить интеллектуализацию

процесса приготовления. На текущий момент данный метод предназначен для индустрии быстрого питания, дальнейшие исследования позволят адаптировать его для индивидуального сектора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2145403 Российская Федерация, МПК F24C 7/00, H05B 6/68. Устройство для приготовления пищевых продуктов с датчиком инфракрасного излучения : № 98105419 : заявл. 17.03.1998 : опубл. 10.02.2000 / Уехаси Х., Таино К., Такимото К. [и др.] ; патентообладатель Санио Электрик Ко., Лтд. – 23 с. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/40/43/72/f44912ee8dd2e7/RU2145403C1.pdf> (дата обращения: 10.03.2021). – Рез. англ.
2. **Ermoshin, N. A.** The Electrohydraulic Method for Meat Tenderization and Curing / N. A. Ermoshin, S. A. Romanchikov, O. I. Nikolyuk. – DOI [10.21323/2414-438X-2020-5-2-45-49](https://doi.org/10.21323/2414-438X-2020-5-2-45-49) // Theory and Practice of Meat Processing. – 2020. – Vol. 5, no. 2. – Pp. 45–49. – URL: <https://www.meatjournal.ru/jour/article/view/140> (дата обращения: 10.03.2021).
3. Патент № 2638546 Российская Федерация, МПК A23L 5/30, A47J 37/00. Способы тепловой обработки мясных полуфабрикатов с использованием современных электрофизических методов нагрева : № 2016131786 : заявл. 02.08.2016 : опубл. 14.12.2017 / Беляева М. А., Безотосова О. К. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова». – 10 с. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/66/75/c8/eb9034b7bd0c3f/RU2638546C1.pdf> (дата обращения: 10.03.2021). – Рез. англ.
4. Разработка технологии и оценка эффективности нового продукта – функционального безглютенового кекса / И. М. Жаркова, Ю. А. Сафонова, В. Г. Густиневич, Т. Л. Ильева. – Текст : непосредственный // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2020. – № 1. – С. 70–85.
5. **Laheri, Z.** Awareness of Alternative Gluten-Free Grains for Individuals with Coeliac Disease / Z. Laheri, J. M. Soon. – DOI [10.1108/BFJ-05-2018-0329](https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2018-0329) // British Food Journal. – 2018. – Vol. 120, Issue 12. – Pp. 2793–2803. – URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/BFJ-05-2018-0329/full/html> (дата обращения: 10.03.2021).
6. **Dennett, A. L.** The Genotypic and Phenotypic Interaction of Wheat and Rye Storage Proteins in Primary Triticale / A. L. Dennett, K. V. Cooper, R. M. Trethowan. – DOI [10.1007/s10681-013-0950-y](https://doi.org/10.1007/s10681-013-0950-y) // Euphytica. – 2013. – Vol. 194, no. 2. – Pp. 235–242. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10681-013-0950-y> (дата обращения: 10.03.2021).
7. Prediction of Triticale Grain Quality Properties, Based on Both Chemical and Indirectly Measured Reference Methods, Using Near-Infrared Spectroscopy / M. Manley, C. M. McGoverin, F. Snyders [et al.]. – DOI [10.1094/CCHEM-02-13-0021-R](https://doi.org/10.1094/CCHEM-02-13-0021-R) // Cereal Chemistry. – 2013. – Vol. 90, Issue 6. – Pp. 540–545. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1094/CCHEM-02-13-0021-R> (дата обращения: 10.03.2021).
8. Baking Properties and Microstructure of Pseudocereal Flours in Gluten-Free Bread Formulations / L. Alvarez-Jubete, M. Auty, E. K. Arendt, E. Gallagher. – DOI [10.1007/s00217-009-1184-z](https://doi.org/10.1007/s00217-009-1184-z) // European Food Research and Technology. – 2010. – Vol. 230. – Pp. 437–445. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00217-009-1184-z#citeas> (дата обращения: 10.03.2021).
9. Application of Response Surface Methodology in the Development of Gluten-Free Bread / D. F. McCarthy, E. Gallagher, T. R. Gormley [et al.]. – DOI [10.1094/CC-82-0609](https://doi.org/10.1094/CC-82-0609) // Cereal Chemistry. – 2005. – Vol. 82, Issue 5. – Pp. 609–615. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1094/CC-82-0609> (дата обращения: 10.03.2021).

10. **Rakha, A.** Rheological Characterisation of Aqueous Extracts of Triticale Grains and Its Relation to Dietary Fibre Characteristics / A. Rakha, P. Aman, R. Andersson. – DOI [10.1016/j.jcs.2012.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.11.005) // Journal of Cereal Science. – 2013. – Vol. 57, Issue 2. – Pp. 230–236. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521012002378?via%3Dihub> (дата обращения: 10.03.2021).
11. Production of Gluten-Free Bread Using Soybean Flour / P. D. Ribotta, S. F. Ausar, M. H. Morcillo [et al.]. – DOI [10.1002/jsfa.1915](https://doi.org/10.1002/jsfa.1915) // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2004. – Vol. 84, Issue 14. – Pp. 1969–1974. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jsfa.1915> (дата обращения: 10.03.2021).
12. **Backashi, A. K.** Study of Physicochemical, Reological, Baking and Noodle Quality of Improved Durum and Bread Wheat Cultivars / A. K. Bakhshi, G. S. Bains. – Текст : непосредственный // Journal of Food Science and Technology. – 1987. – Vol. 24, Issue 5. – Pp. 217–221.
13. Патент № 2049419 Российская Федерация, МПК А47J27/06. Устройство для тепловой обработки пищевых продуктов : заявл. 05.05.1991 : опубл. 10.12.1995 / Кулаков С. В. – URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2049419> (дата обращения: 10.03.2021).
14. Патент № 2699690 Российская Федерация, МПК А47J27/62. Способы и системы для приготовления пищи на роботизированной кухне : № 2016134234 : заявл. 20.02.2015 : опубл. 09.09.2019 / Олейник М. ; заявитель и патентообладатель Олейник М. – 430 с. – URL: <https://patenton.ru/patent/RU2699690C2.pdf> (дата обращения: 10.03.2021). – Рез. англ.
15. **Верболюз, Е. И.** Энергосберегающие нагреватели для выпечки хлеба / Е. И. Верболюз, А. П. Савельев // Ползуновский вестник. – 2017. – № 4. – С. 31–35. – URL: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2017_04/pdf/031Verboloz.pdf (дата обращения: 10.03.2021).
16. Перспективы применения электроконтактного способа выпечки хлеба / Б. А. Кулишов, А. Г. Новоселов, С. Ю. Иващенко, В. А. Еськов // Ползуновский вестник. – 2017. – № 2. – С. 14–18. – URL: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2017_02/pdf/014kulishiv.pdf (дата обращения: 10.03.2021).
17. Электроконтактный энергоподвод при выпекании хлеба / Г. А. Сидоренко, В. П. Попов, Г. Б. Зинюхин [и др.] // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2012. – № 1. – С. 214–221. – URL: <https://elck.ru/UTPEe> (дата обращения: 10.03.2021).
18. **Boggini, G.** Qualita Panifactoria Di Miscele Di Sfarinati Di Frumento Duro Con Farina Di Tenero / G. Boggini, M. A. Pagani, M. Lusiano. – Текст : непосредственный // Tecn. molit. – 1997. – Vol. 48, Issue 7. – Pp. 781–780.
19. **Титова, Н. Е.** Обеспечение снижения экологической нагрузки и ресурсосбережения при хлебопечении / Н. Е. Титова, И. П. Кумпан // Вестник современных исследований. – 2018. – Т. 7, № 3 (22). – С. 319–322. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35351218> (дата обращения: 10.03.2021).
20. **Громцев, С. А.** Особенности производства ржано-пшеничного хлеба в полевых условиях / С. А. Громцев, А. С. Громцев, О. М. Червяков. – Текст : электронный // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2013. – № 3. – URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/7623.pdf> (дата обращения: 10.03.2021). – Рез. англ.
21. Innovative Trends in the Development of Advanced Triticale Grain Processing Technology / E. P. Meleshkina, G. N. Pankratov, I. S. Vitol. – DOI [10.21603/2308-4057-2017-2-70-82](https://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-70-82) // Foods and Raw Materials. – 2017. – Vol. 5, no. 2. – Pp. 70–82. – URL: <http://jfrm.ru/en/issues/703/1170/> (дата обращения: 10.03.2021).
22. Infrared Thermographic Measurement of the Surface Temperature and Emissivity of Glossy Materials / P. Alexa, J. Solař, F. Čmiel [et al.]. – DOI [10.1177/1744259117731344](https://doi.org/10.1177/1744259117731344) // Journal of Building Physics. – 2018. – Vol. 41, Issue 6. – Pp. 533–546. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1744259117731344> (дата обращения: 10.03.2021).
23. **Давидович, Е. А.** Разработка и исследование улучшителей для пшенично-ржаных сортов хлеба [На основе соевой муки] / Е. А. Давидович // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2008. – № 2. – С. 417. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11453482> (дата обращения: 10.03.2021).

24. Патент на полезную модель № 199820 Российская Федерация, МПК H05B 3/06, A47J 37/04. Устройство с нагревательными элементами инфракрасного действия для приготовления различных продуктов питания : № 2020114473 : заявл. 13.04.2020 : опубл. 21.09.2020 / Шелехов М. И., Шелехова А. И. ; заявитель и патентообладатель ООО «Иркутское профессиональное оборудование». – 13 с. – URL: https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0000199820_20200921_U1_RU?page=1&rotate=0&theme=white (дата обращения: 10.03.2021).

25. Патент № 2463748 Российская Федерация, МПК H05B 3/00. Способ изготовления толстопленочного резистивного нагревателя : № 2011103148 : заявл. 28.01.2011 : опубл. 10.10.2012 / Шелехов И. Ю., Шелехова И. В., Иванов Н. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ООО «Термостат». – 9 с. – URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/54/2463748/patent-2463748.pdf> (дата обращения: 10.03.2021).

26. **Анисимов, А. В.** Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу / А. В. Анисимов, Ф. Я. Рудик. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201904.594-613](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 594–613. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/86-19-4/743-10-15507-0236-2910-029-201904-8> (дата обращения: 10.03.2021).

Поступила 16.03.2021; одобрена после рецензирования 15.04.2021; принята к публикации 26.04.2021

Об авторе:

Шелехов Игорь Юрьевич, доцент кафедры городского строительства и хозяйства Института архитектуры, строительства и дизайна ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), кандидат технических наук, Researcher ID: V-3045-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7677-3187>, promptplo@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Uekhasi Kh., Taino K., Takimoto K., et al. Cooking Appliance with Infrared Radiation Sensor. Patent 2,145,403 Russian Federation. 2000 February 10. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/40/43/72/f44912ee8dd2e7/RU2145403C1.pdf> (accessed 10.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Ermoshin N.A., Romanchikov S.A., Nikolayuk O.I. The Electrohydraulic Method for Meat Tenderization and Curing. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2020; 5(2):45-49. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2020-5-2-45-49>
3. Belyaeva M.A., Bezotosova O.K. Methods for Thermal Processing of Meat Semi-Finished Products Using Modern Electrophysical Heating Methods. Patent 2,638,546 Russian Federation. 2017 December 14. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/66/75/c8/eb9034b7bd0c3f/RU2638546C1.pdf> (accessed 10.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Zharkova I.M., Safonova Yu.A., Gustinovich V.G., Ileva T.L. [Development of Technology and Evaluation of the Effectiveness of a New Product – A Functional Gluten-Free Muffin]. *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2020; (1):70-85. (In Russ.)
5. Laheri Z., Soon J.M. Awareness of Alternative Gluten-Free Grains for Individuals with Coeliac Disease. *British Food Journal*. 2018; 120(12):2793-2803. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2018-0329>
6. Dennett A.L., Cooper K.V., Trethowan R.M. The Genotypic and Phenotypic Interaction of Wheat and Rye Storage Proteins in Primary Triticale. *Euphytica*. 2013; 194(2):235-242. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-013-0950-y>

7. Manley M., McGoverin C.M., Snyders F., et al. Prediction of Triticale Grain Quality Properties, Based on Both Chemical and Indirectly Measured Reference Methods, Using Near-Infrared Spectroscopy. *Cereal Chemistry*. 2013; 90(6):540-545. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM-02-13-0021-R>
8. Alvarez-Jubete L., Auty M., Arendt E.K., Gallagher E. Baking Properties and Microstructure of Pseudocereal Flours in Gluten-Free Bread Formulations. *European Food Research and Technology*. 2010; 230:437-445. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1184-z>
9. McCarthy D.F., Gallagher E., Gormley T.R., et al. Application of Response Surface Methodology in the Development of Gluten-Free Bread. *Cereal Chemistry*. 2005; 82(5):609-615. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1094/CC-82-0609>
10. Rakha A., Aman P., Andersson R. Rheological Characterisation of Aqueous Extracts of Triticale Grains and Its Relation to Dietary Fibre Characteristics. *Journal of Cereal Science*. 2013; 57(2):230-236. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.11.005>
11. Ribotta P.D., Ausar S.F., Morcillo M.H., et al. Production of Gluten-Free Bread Using Soybean Flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2004; 84(14):1969-1974. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.1915>
12. Backashi A.K., Bains G.S. Study of Physicochemical, Reological, Baking and Noodle Quality of Improved Durum and Bread Wheat Cultivars. *Journal of Food Science and Technology*. 1987; 24(5):217-221. (In Eng.)
13. Kulakov S.V. [Device for Thermal Processing of Food Products]. Patent 2,049,419 Russian Federation. 1995 December 10. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2049419> (accessed 10.03.2021). (In Russ.)
14. Oleynik M. Methods and Systems for Cooking in Robotic Kitchen. Patent 2,699,690 Russian Federation. 2019 September 9. Available at: <https://patenton.ru/patent/RU2699690C2.pdf> (accessed 10.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
15. Verboloz Ye.I., Savelev A.P. [Energy-Saving Heaters for Baking Bread]. *Polzunovskiy vestnik* = Polzunov's Bulletin. 2017; (4):31-35. Available at: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2017_04/pdf/031Verboloz.pdf (accessed 10.03.2021). (In Russ.)
16. Kulishov B.A., Novoselov A.G., Ivashchenko S.Yu., Yeskov V.A. [Prospects for the Application of the Electrocontact Method of Baking Bread]. *Polzunovskiy vestnik* = Polzunov's Bulletin. 2017; (2):14-18. Available at: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2017_02/pdf/014kulishiv.pdf (accessed 10.03.2021). (In Russ.)
17. Sidorenko G.A., Popov V.P., Zinyukhin G.B., et al. [Electro-Contact Power Supply for Baking Bread]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of the Orenburg State University. 2012; (1):214-221. Available at: <https://clck.ru/UTPEe> (accessed 10.03.2021). (In Russ.)
18. Boggini G., Pagani M.A., Lusiano M. Qualita Panifactoria Di Miscele Di Sfarinati Di Frumento Duro Con Farina Di Tenero. *Tecn. molit.* 1997; 48(7):781-780. (In It.)
19. Titova N.Ye., Kumpan I.P. [Ensuring the Reduction of Environmental Load and Resource Conservation in Baking]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* = Bulletin of Modern Research. 2018; 7(3):319-322. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35351218> (accessed 10.03.2021). (In Russ.)
20. Gromtsev S.A., Gromtsev A.S., Chervyakov O.M. Rye-Wheat Bread Production Technology in Field Condition. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Ser. "Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv"* = Scientific Journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment". 2013; (3). Available at: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/7623.pdf> (accessed 10.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Meleshkina E.P., Pankratov G.N., Vitol I.S. Innovative Trends in the Development of Advanced Triticale Grain Processing Technology. *Foods and Raw Materials*. 2017; 5(2):70-82. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-70-82>
22. Alexa P., Solář J., Čmiel F., et al. Infrared Thermographic Measurement of the Surface Temperature and Emissivity of Glossy Materials. *Journal of Building Physics*. 2018; 41(6):533-546. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1744259117731344>



23. Davidovich Ye.A. [Development and Research of Improvers for Wheat and Rye Bread [Based on Soya Flour]]. *Pishchevaya i pererabatyvayushchaya promyshlennost. Referativnyy zhurnal* = Food and Processing Industry. Abstract Journal. 2008; (2):417. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11453482> (accessed 10.03.2021). (In Russ.)
24. Shelekhov M.I., Shelekhova A.I. [Device with Infrared Heating Elements for Cooking Various Foods]. Patent 199,820 Russian Federation. 2020 September 12. Available at: https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0000199820_20200921_U1_RU?page=1&rotate=0&theme=white (accessed 10.03.2021). (In Russ.)
25. Shelekhov I.Yu., Shelekhova I.V., Ivanov N.A., et al. [Method for Manufacturing a Thick-Film Resistance Heater]. Patent 2,463,748 Russian Federation. 2012 October 10. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/54/2463748/patent-2463748.pdf> (accessed 10.03.2021). (In Russ.)
26. Anisimov A.V., Rudik F.Ya. The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):594-613. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>

Submitted 16.03.2021; approved after reviewing 15.04.2021; accepted for publication 26.04.2021

About the author:

Igor Yu. Shelekhov, Associate Professor of the Chair of Urban Construction and Economy of Institute of Architecture, Construction and Design, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermonov St., Irkutsk 664074, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: V-3045-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7677-3187>, promteplo@yandex.ru

The author has read and approved the final manuscript.



МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.048.7:621.43

DOI: [10.15507/2658-4123.031.202102.304-320](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.304-320)

Оригинальная статья



Повышение эффективности работы жидкостного подогревателя при предпусковой подготовке двигателя внутреннего сгорания

Р. Ф. Самиков¹, Ш. Ф. Нигматуллин¹, М. М. Разяпов¹,
А. А. Козеев¹, А. В. Смольянов^{2*}, Д. А. Галин²

¹ФГБОУ ВО «Бакинский государственный аграрный университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Российская Федерация)

*alexsmol013@yandex.ru

Введение. В данной статье объектом исследования является система энергоснабжения предпускового подогревателя. Цель – оценить возможность использования термоэлектрического генератора для питания жидкостного предпускового подогревателя с оптимизацией проточной части теплообменника термоэлектрического генератора.

Материалы и методы. Предложено использовать термоэлектрический генератор в качестве дополнительного источника энергии для снижения потребления электроэнергии предпусковым подогревателем. В процессе выполнения работы были смоделированы различные конструкции проточной части теплообменника термоэлектрического генератора. Был проведен термический и гидродинамический анализ в программных средах ANSYS Workbench, Solidworks Flow Simulation, по результатам которого определена наиболее эффективная конструкция проточной части теплообменника термоэлектрического генератора.

Результаты исследования. Была собрана экспериментальная установка, и выведена зависимость влияния температурных режимов работы предпускового подогревателя на выходные показатели термоэлектрического генератора.

Обсуждение и заключение. Доказана возможность снижения энергопотребления аккумуляторной батареи автотранспортного средства при тепловой подготовке двигателя внутреннего сгорания путем применения термоэлектрического генератора, адаптированного к системе энергоснабжения жидкостного предпускового подогревателя.

Ключевые слова: предпусковой подогреватель, термоэлектрический генератор, теплообменник, тепловая подготовка, гидродинамический расчет теплообменника

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Самиков Р. Ф., Нигматуллин Ш. Ф., Разяпов М. М., Козеев А. А., Смольянов А. В., Галин Д. А., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Повышение эффективности работы жидкостного подогревателя при предпусковой подготовке двигателя внутреннего сгорания / Р. Ф. Самиков, Ш. Ф. Нигматуллин, М. М. Разяпов [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.304-320](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.304-320) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 304–320.

Original article

Improving the Efficiency of the Liquid Heater in the Pre-Start Preparation of the Internal Combustion Engine

R. F. Samikov^a, Sh. F. Nigmatullin^a, M. M. Razyapov^a,
A. A. Kozeev^a, A. V. Smolyanov^{b*}, D. A. Galin^b

^aBashkir State Agrarian University (Ufa, Russian Federation)

^bNational Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

*alexsmol013@yandex.ru

Introduction. In this article the study subject is the power supply system of the pre-start heater. The purpose of the study is to evaluate the possibility of using a thermoelectric generator to power the liquid preheater with optimization of the flow section of the thermoelectric generator heat exchanger.

Materials and Methods. It is proposed to use a thermoelectric generator as an additional energy source to reduce electric power consumption by a pre-start heater. In the course of the study, various structures of the flow section of the thermoelectric generator heat exchanger have been modeled. The thermal and hydrodynamic analyses were carried out in the software environment ANSYS Workbench, Solidworks Flow Simulation to develop the most effective design for the flow section of the thermoelectric generator heat exchanger.

Results. An experimental installation was assembled and the dependence of the temperature modes of the pre-start heater on the output parameters of the thermoelectric generator was determined.

Discussion and Conclusion. It has been proved the possibility of reducing the power consumption of the vehicle battery during thermal preparation of the internal combustion engine by using a thermoelectric generator adapted to the power supply system of the liquid pre-start heater.

Keywords: preheater, thermoelectric generator, heat exchanger, thermal preparation, hydrodynamic calculation of heat exchanger

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

For citation: Samikov R.F., Nigmatullin Sh.F., Razyapov M.M., et al. Improving the Efficiency of the Liquid Heater in the Pre-Start Preparation of the Internal Combustion Engine. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):304-320. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.304-320>

Введение

Запуск двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при отрицательных температурах окружающей среды остается актуальной проблемой для всех видов транспортных средств. Прежде всего, это связано с отрицательным влиянием

низких температур на работу ДВС. Вследствие быстрого нагревания отдельных деталей «холодного» двигателя в нем возникают температурные напряжения, которые вместе с механическими нагрузками приводят к быстрому износу деталей и сокращению ресурса [1].

Предпусковой подогрев охлаждающей жидкости в двигателе является одним из наиболее распространенных и эффективных методов прогрева при пониженных температурах. Жидкостные подогреватели подходят практически для всех типов ДВС, поэтому применяются как в легковых и грузовых автомобилях, так и в автобусах.

Несмотря на ряд положительных свойств, автомобильные подогреватели штатно не используются, а являются вспомогательным оборудованием. Одна из причин – дополнительное потребление невосполняемой электрической энергии от аккумуляторной батареи для питания компонентов предпусковых подогревателей: топливного насоса, вентилятора для подачи воздуха в камеру сгорания, циркуляционного насоса для прокачки жидкого теплоносителя. Исследования показали, что при работе жидкостного нагревателя тепловой мощностью 4 кВт и потребляемой электрической мощностью 37–40 Вт (со штатным вентилятором системы отопления автомобиля до 60 Вт) аккумулятор емкостью 60 А·ч теряет 50 % емкости за 4,5 ч. Следует учесть и тот факт, что в условиях отрицательных температур емкость автомобильного аккумулятора дополнительно снижается более чем на 20 %. Поэтому жидкостные предпусковые подогреватели рекомендуют использовать не больше 20 минут для автомобилей с двигателем до 3 л и не больше одного часа для двигателей объемом более 3 л, однако этого может быть недостаточно для прогрева ДВС до рабочей температуры [2; 3]. В этой связи вопрос снижения потребляемой предпусковым подогревателем электроэнергии без изменения его потребительских качеств представляется актуальным [4–6].

Цель исследования – оценить возможность использования термоэлектрического генератора (ТЭГ) для питания

жидкостного предпускового подогревателя с оптимизацией проточной части теплообменника ТЭГ.

Обзор литературы

Автономные предпусковые подогреватели для тепловой подготовки ДВС автотранспортных средств при низких температурах окружающего среды серийно производятся на ряде предприятий: Eberspacher, Webasto, Truma (Германия), Ateso (Чехия), Mikuni (Япония), «Теплостар» (Россия).

В настоящее время ни одна из известных моделей предпусковых подогревателей не решает проблему разрядки аккумуляторной батареи при тепловой подготовке автомобильного транспортного средства (АТС) [7]. Обзор научной и учебной литературы показал, что существуют несколько способов снижения потребления энергии аккумуляторной батареи при тепловой подготовке ДВС [8–11]. Первый способ решения проблемы – использование в качестве теплового модуля генератора горячих газов со сниженным энергопотреблением, где в качестве источника тепловой энергии выступает разогретый поток воздуха [12]. Снижение энергопотребления реализовано преобразованием тепловой энергии потерь в электрическую с помощью усовершенствованной направляющей насадки, где установлен термоэлектрический генератор.

Второй способ снижения энергопотребления осуществлен с помощью внедрения в конструкцию предпускового подогревателя ТЭГ. В этом случае подогреватель работает следующим образом: тепловая энергия, полученная вследствие сгорания топлива, нагревает горячий теплообменник, проходит через термоэлектрический преобразователь и отводится жидким теплоносителем, который циркулирует в теплообменнике подогревателя и системе охлаждения ДВС. Вследствие различия температур между

горячей и холодной сторонами термопреобразователя генерируется электрический ток [13; 14].

В рассмотренных работах не уделено внимание тому, что для снижения потребления энергии аккумуляторной батареи необходимо изменять конструкцию устройств тепловой подготовки ДВС.

Методы и материалы

При проектировании ТЭГ в качестве генераторных модулей были выбраны ТГМ-199-1,4-1,2 фирмы Kryotherm [15]. Основные характеристики представлены в таблице 1: $I_{\max}$ – максимальный электрический ток, А; $Q_{\max}$ – максимальная холодопроизводительность при нулевой разности температур между его сторонами, Вт; НТ – температура эксплуатации до 200 °С.

Энергоотдача ТЭГ зависит от разницы температур на сторонах термоэлектрических генераторных модулей (ТГМ), поэтому важно обеспечить подвод тепла к горячей стороне и отвод температуры от холодной стороны ТГМ

с помощью теплообменников. Для наиболее эффективного выбора конструкций теплообменников ТЭГ необходимо произвести гидродинамические расчеты движения потоков выхлопных газов предпускового подогревателя и теплоносителя системы охлаждения двигателя, а также проанализировать температурное поле распределения тепла на поверхности теплообменника ТЭГ.

При проектировании конструкций ТЭГ был разработан ряд моделей (рис. 1).

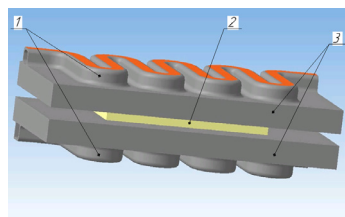
Модель, представленная на рисунке 1а, состоит из ТГМ 2, на противоположных сторонах которого установлены пластины 3, к ним плотно прижаты трубчатые теплообменники 1, имеющие спиралевидную форму. Следующая модель (рис. 1б) состоит из ТГМ 2, теплообменников 3, выполненных в виде коробов прямоугольного сечения, во внутренней части которых расположены пластины 1; каждая пластина находится на определенном расстоянии друг от друга в шахматном порядке.

Таблица 1

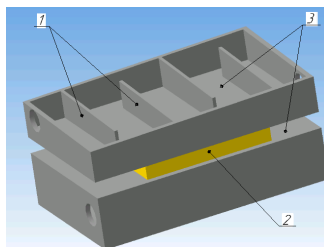
Table 1

Характеристики ТГМ-199-1,4-1,2
Specification TGM-199-1,4-1,2

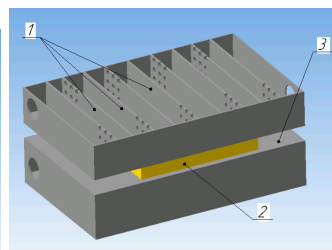
$\frac{I_{\max}, \text{ A}}{I_{\max}, \text{ A}}$	$\frac{Q_{\max}, \text{ Вт}}{Q_{\max}, \text{ W}}$	$\frac{U, \text{ В}}{U, \text{ V}}$	$\frac{R, \text{ Ом}}{R, \text{ }\Omega}$	НТ, °С	$T_c, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_h, \text{ }^\circ\text{C}$
2,1	9,8	4,6	1,54	200	30	150



а)



б)



в)

Р и с. 1. Модель теплообменника отработавших газов с использованием:

а) медных трубок в форме спирали; б) металлических пластин;

в) металлических пластин с отверстиями

Fig. 1. Model of an exhaust gas heat exchanger using: а) copper tubes in the form of a spiral; б) metal plates; в) metal plates with holes

Данная конструкция позволяет создавать лабиринт при движении потоков различных сред. На рисунке 1с представлена расчетная модель, состоящая из ТГМ 2, теплообменников 3, пластин со сквозными отверстиями 1. В отличие от выше рассмотренной модели пластины имеют сквозные отверстия, которые создают завихренность движению потока.

Для расчета поставленной задачи был выбран пакет ANSYS Thermal Steady State, реализующий метод конечных элементов. Его применение позволяет с малой погрешностью рассчитать тепловое поле нагрева поверхности теплообменника. Для проведения расчетов в качестве граничных условий были заданы следующие параметры: давление выхлопных газов предпускового подогревателя 150 кПа; температура выхлопных газов 420 °С; давление циркуляционного насоса охлаждающей жидкости 130 кПа; начальная температура теплоносителя –15 °С; модель твердотельная; составные компоненты газовой среды не вступают в химическое взаимодействие друг с другом; задача стационарная; отсутствуют подвижные элементы; геометрия модели неизменная.

Для оптимального выбора модели ТЭГ расчета температурного поля нагрева недостаточно. Необходимо установить распределение поля давления во внутренней полости теплообменника. В качестве программного модуля для проведения гидродинамического расчета был выбран комплекс CAE Solidworks Flow Simulation.

Для описания движения и теплообмена газа в проточной области теплообменника применили систему дифференциальных уравнений Навье – Стокса. В нее входят уравнения сохранения энергии и неразрывности и сохранения количества движения.

Для дальнейшего исследования турбулентного течения гомогенных

отработавших газов предпускового подогревателя применяется модифицированная модель турбулентности k - ε . В данной модели использовали два дополнительных уравнения для переноса кинетической энергии турбулентности и переноса диссипации турбулентности, чтобы добиться замыкания системы уравнений Навье – Стокса [16]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tau_{ij}^R \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B \right) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k}, \quad (2)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности, Дж/кг; ε – диссипация энергий турбулентности, Дж/(кг·с); $P_B = -g_i \partial \rho / (\sigma_{Bj} \partial x_j)$ – коэффициент, отвечающий за генерацию турбулентности; $C_\mu, C_{s1}, C_{s2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_B$ – константы.

Для вычисления тензора напряжений Рейнольдса использовали гипотезу Буссинеска [16]:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \cdot \rho k \delta_{ij}. \quad (3)$$

Турбулентная вязкость вычисляется по формуле:

$$\mu_t = f_\mu \cdot C_\mu \cdot \rho k^2 / \varepsilon. \quad (4)$$

Демпфирующие функции являются особенностью рассматриваемой модели:

$$f_\mu = \left(1 - e^{-0,025 R_y} \right)^2 \cdot (1 + 20,5 / R_T), \quad (5)$$

$$f_1 = 1 + (0,05 / f_\mu)^3, \quad (6)$$

$$f_2 = 1 - e^{-R_y^2 / T}, \quad (7)$$

где $R_y = \rho \sqrt{ky} / \mu R_t = \rho \cdot k^2 / (\mu \cdot \varepsilon)$, м;
 y – расстояние до сетки, м.

Данные функции гарантируют уменьшение энергии турбулентности и вязкости и увеличение диссипации турбулентности при низких значениях числа Рейнольдса.

В дальнейших исследованиях при описании пограничного слоя применена двухуровневая модель, в которой принимались два разных метода описания тонких и толстых пограничных слоев. Преимуществом данной модели является значительное снижение трудоемкости сравнительного анализа существующих конструкций теплообменников, а также решение уравнений Навье – Стокса и модели турбулентности методом конечных объемов. В деталях ТЭГ для определения значений теплопроводности применимо уравнение Фурье:

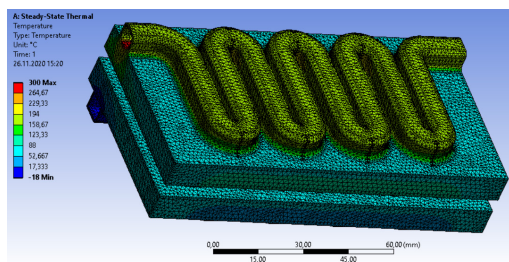
$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \Delta u, \quad (8)$$

где u – температура, К; a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

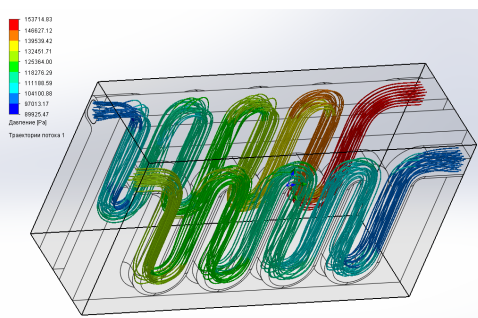
Предварительные расчеты изменения температурного поля теплообмен-

ников при использовании в качестве теплоносителей охлаждающей жидкости и отработавших газов показали, что при последующих расчетах можно не моделировать процессы с применением охлаждающей жидкости, так как температура стенок теплообменника по всей его длине изменяется незначительно. В качестве граничного условия здесь используется температура окружающей среды [17].

На рисунке 2 представлены результаты расчетов распределения температурного поля (рис. 2а) и давления (рис. 2б) в теплообменнике с использованием медных трубок в форме синусоиды. По температурному полю нагрева теплообменника видно, что максимальная температура равномерно распределена по всей площади трубки и достигает 230 °С. По карте распределения давления в теплообменнике 1 видно, что при подаче горячего газа максимальное давление 153 кПа снижается с каждым витком трубки на 10 кПа, на выходе давление приближено к атмосферному. Во второй теплообменник противоточно подается охлаждающая жидкость с заданным начальным давлением 130 кПа, которое плавно снижается до 120 кПа из-за местных гидравлических сопротивлений [18].



а)



б)

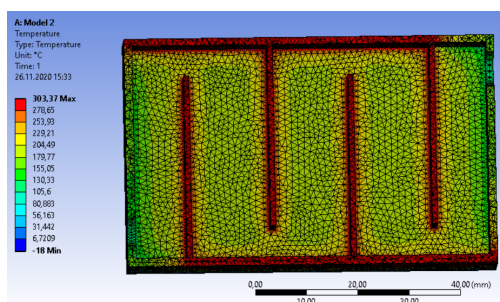
Р и с. 2. Модель с использованием медных трубок в форме спирали: а) температурное поле;
 б) карта результатов давления

Fig. 2. Model using helical copper tubes: a) temperature field; b) map of pressure results

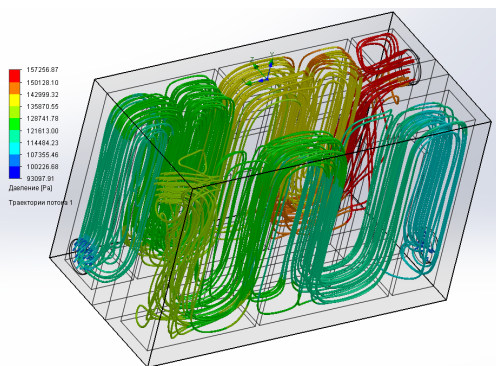
На рисунке 3 представлены результаты расчетов распределения температурного поля (рис. 3а) и давления (рис. 3б) модели с использованием металлических пластин. По карте распределения давления видно, что есть локальные участки падения и повышения давления, движение потоков газа и жидкости имеет завихренности внутри полости теплообменников. Максимальное давление при подаче отработавшего газа составляет 157 кПа, минимальное – 110 кПа. Термический

анализ показал, что максимальная температура металлических пластин достигает 300 °С.

На рисунке 4 представлены результаты расчетов распределения температурного поля (рис. 4а) и давления (рис. 4б) модели с использованием металлических пластин с отверстиями. По карте результатов температурного поля при течении горячего газа видно, что температура от максимального значения 250 °С плавно уменьшается до 46 °С.



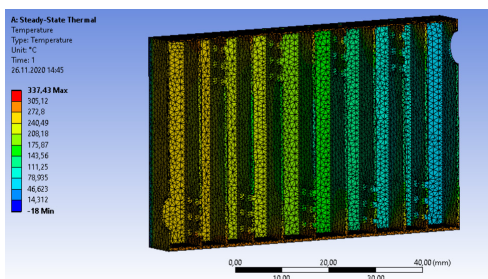
a)



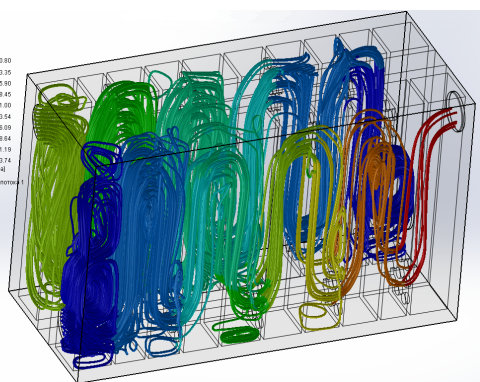
b)

Р и с. 3. Модель с использованием металлических пластин: а) температурное поле (вид в разрезе); б) карта результатов давления

F i g. 3. Model using metal plates: a) temperature field (sectional view); b) map of pressure results



a)



b)

Р и с. 4. Модель с использованием металлических пластин с отверстиями: а) температурное поле (вид в разрезе); б) карта результатов давления

F i g. 4. Model using metal plates with holes: а) temperature field (sectional view); б) map of pressure results

Различные конструкции проточной части определяют газодинамическое сопротивление теплообменника. Для сравнения различных конструкций используются безразмерные критерии Nu / Nu_0 , ξ / ξ_0 , где Nu_0 – критерий Нуссельта, ξ_0 – коэффициент потерь. Для оценки рациональности применения различных конструкций сравнение проводится по отношению $(Nu / Nu_0) / (\xi / \xi_0)$. Критерий Нуссельта является безразмерным коэффициентом теплоотдачи и рассчитывается по формуле:

$$Nu = \alpha \cdot l / \lambda, \quad (9)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К); l – характерный размер (в нашем случае длина проточной части теплообменника), м.

После проведения расчетов для оптимального выбора конструкций теплообменников термоэлектрического

генератора была составлена сравнительная таблица 2.

Из таблицы 2 можно сделать вывод, что расчетная модель с использованием металлических пластин без отверстий имеет самую высокую температуру нагрева со слабовыраженной завихренностью, траекторией потока движения и наибольшим значением $(Nu / Nu_0) / (\xi / \xi_0)$, то есть модель с использованием пластин наиболее оптимальна [19].

Результаты исследования

После проведения теоретических расчетов и выбора оптимальной конструкции теплообменника на кафедре автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» был собран экспериментальный образец ТЭГ и установка на базе предпускового подогревателя «Теплостар 14ТС-12» (рис. 5).

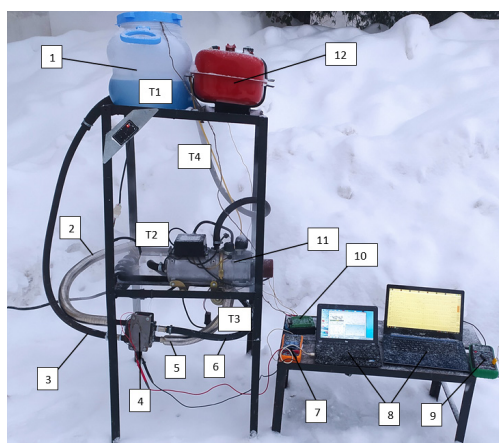
Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

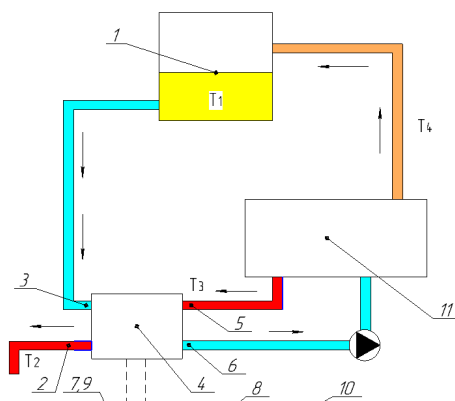
Параметры оценки эффективности конструкций теплообменников

Parameters for evaluating the efficiency of heat exchanger designs

Оцениваемый параметр / Estimated parameter	Модель с использованием медных трубок в форме спирали / Helical copper tube model	Модель с использованием металлических пластин / Model using metal plates	Модель с использованием металлических пластин с отверстиями / Model using metal plates with holes
Термический анализ в ANSYS Thermal Steady State / Thermal analysis in ANSYS Thermal Steady State			
Максимальная температура нагрева теплообменника, °C / Maximum heating temperature of heat exchanger, °C	230	300	250
Газогидродинамический анализ в Solidworks Flow Simulation / Hydrodynamic analysis in Solidworks Flow Simulation			
Максимальное давление, кПа / Maximum pressure, kPa	153	157	151
Завихренность потока / Flow swirl	Отсутствует / Is absent	Слабая / Loose	Высокая / High
Nu / Nu_0	1,52	1,75	1,61
ξ / ξ_0	4,93	2,10	2,00
$(Nu / Nu_0) / (\xi / \xi_0)$	0,31	0,83	0,81
Mechanical engineering			



a)



b)

Р и с. 5. Фотография и схема экспериментальной установки: 1 – бак с охлаждающей жидкостью; 2, 5 – выхлопные трубопроводы подогревателя; 3, 6 – трубопроводы охлаждающей жидкости; 4 – термоэлектрический генератор с теплообменниками; 7 – USB-мультиметр; 8 – персональный компьютер; 9 – мультиметр; 10 – АЦП Zetlab 210; 11 – предпусковой подогреватель «Теплостар 14TC-10-12»; 12 – топливный бак

F i g. 5. Photography and diagram of the experimental installation: 1 – cooling liquid tank; 2, 5 – preheater exhaust pipes; 3, 6 – coolant pipelines; 4 – thermoelectric generator with heat exchangers; 7 – USB multimeter; 8 – personal computer; 9 – multimeter; 10 – Zetlab 210 ADC; 11 – pre-start heater Teplostar 14TS-10-12; 12 – fuel tank

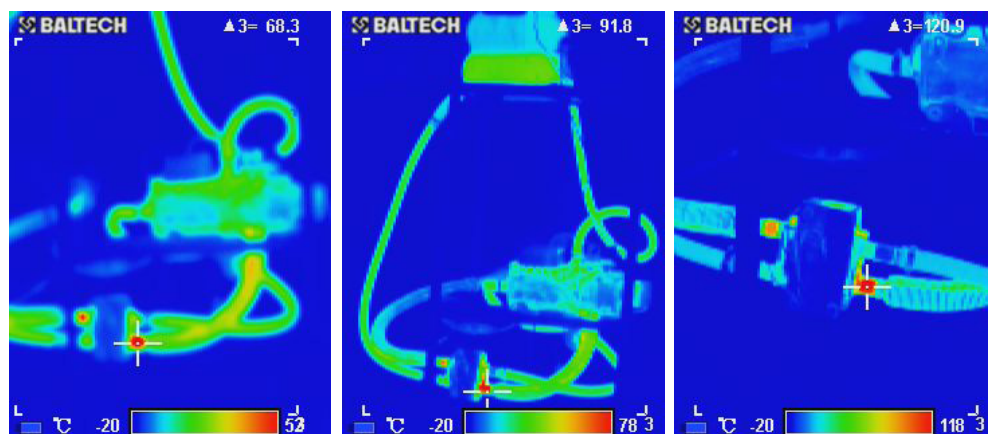
Размещение термпар T1, T2, T3, T4 типа хромель-копель на экспериментальной установке показано на рисунке 5. Термпары измеряют изменение температуры: T1 – охлаждающей жидкости в баке; T2 – выхлопных газов на выходе из теплообменника; T3 – выхлопных газов на входе в теплообменник; T4 – охлаждающей жидкости на выходе из подогревателя.

Данная экспериментальная установка работает следующим образом. После подачи питания на предпусковой подогреватель 11 циркуляционный насос начинает перекачивать охлаждающую жидкость из бака 1 в холодный теплообменник термоэлектрического генератора 4 и далее во внутреннюю полость подогревателя, где жидкость нагревается до температуры 90 °С. Выхлопные газы предпускового подогревателя входят в горячий теплообменник термоэлектрического генератора 4 и выходят из трубопровода 2. ТГМ, установленные между теплообменниками ТЭГ 4,

генерируют электрическую энергию за счет созданной разности температур. Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 10 регистрирует изменение температур в местах установки термпар, мультиметры 7, 9 записывают и сохраняют показания генерируемой электрической энергии ТЭГ 4.

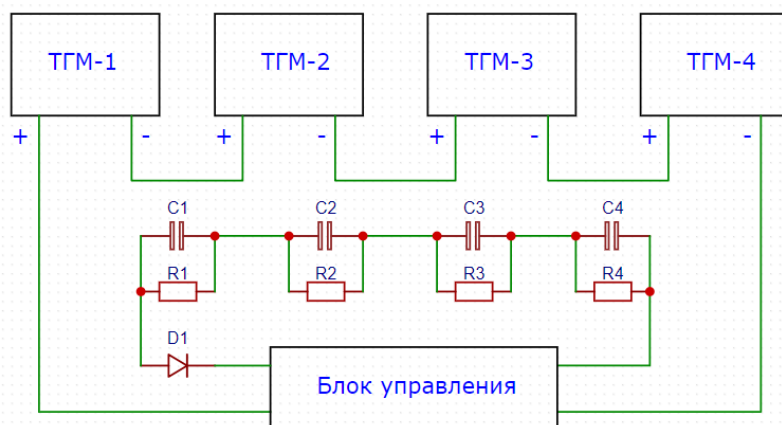
Значение вырабатываемой электроэнергии будет тем выше, чем больше разница температур между холодным и горячим теплообменниками. Контроль температуры теплообменников ТЭГ осуществлялся путем тепловизионных исследований (рис. 6), по результатам которых были сопоставлены температурные и временные режимы.

На рисунке 7 представлена принципиальная схема подключения ТГМ и конденсаторов с балансирующими резисторами. Установлены конденсаторы большой емкости, которые сглаживают падение напряжения в момент уменьшения разницы температур и накапливают заряд в период роста.



Р и с. 6. Фотографии тепловизионного исследования

F i g. 6. Photographs of thermal imaging examination



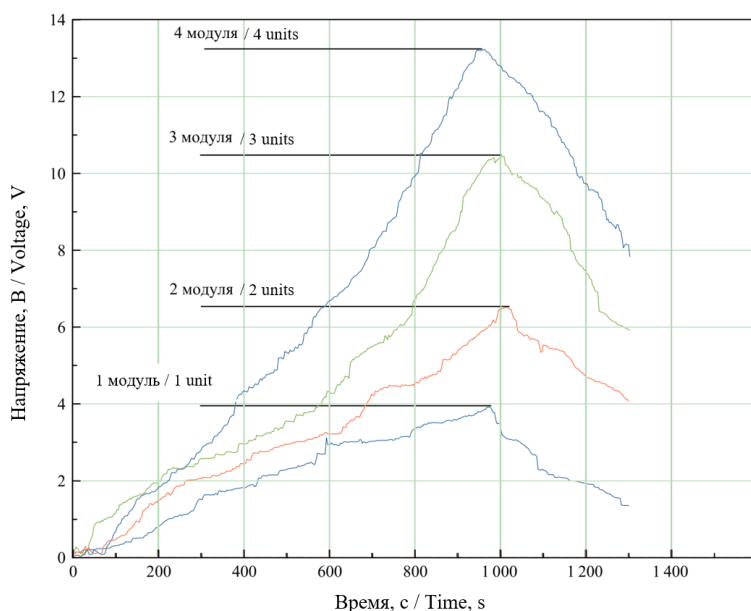
Р и с. 7. Принципиальная схема подключения ТГМ к блоку управления предпусковым подогревателем

F i g. 7. Schematic diagram of TGM connection to the pre-start heater control unit

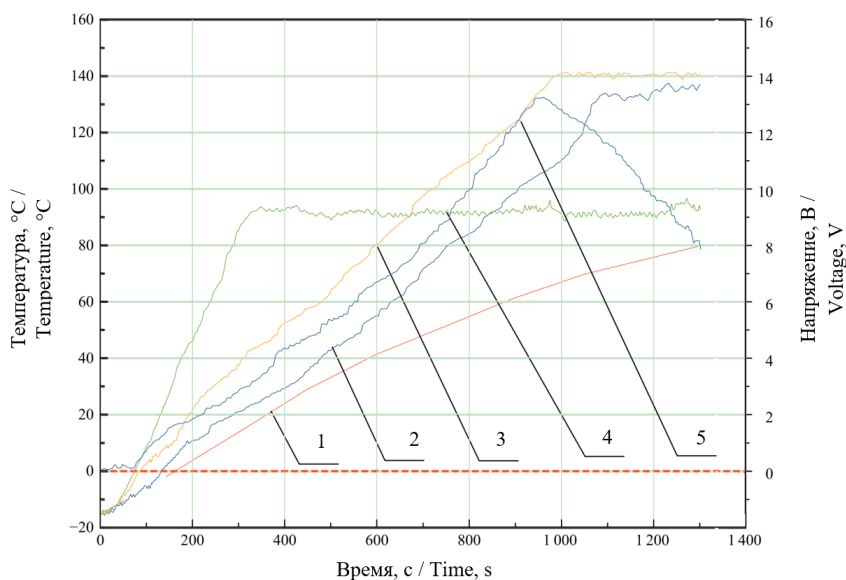
На рисунке 8 представлен график зависимости генерируемого напряжения с разным количеством ТГМ от времени работы предпускового подогревателя. По полученным данным можно сделать вывод, что через 15 минут после запуска при использовании 1 модуля максимальное генерируемое напряжение составляет $U_{\max 1} = 3,8$ В, при использовании 2 модулей – $U_{\max 2} = 6,5$ В, трех модулей – $U_{\max 3} = 10,6$ В, четырех

модулей – $U_{\max 4} = 13,1$ В. Таким образом, для автотранспортных средств с бортовым напряжением 12 В наиболее эффективно использовать ТГМ с 4 модулями.

На рисунке 9 представлены результаты исследований, по которым видно, что интенсивность роста температуры охлаждающей жидкости в баке экспериментальной установки 1 возрастает практически линейно и достигает целевого значения 80 °C за 20 минут.



Р и с. 8. Сравнительный график генерируемого термоэлектрическим генератором напряжения
F i g. 8. The comparative schedule generated thermoelectric voltage generator



Р и с. 9. Графики зависимости температур в измеряемых точках экспериментальной установки и изменение генерируемого напряжения ТГМ: 1 – температура охлаждающей жидкости в баке установки; 2 – температура выхлопных газов на выходе из теплообменника ТЭГ; 3 – температура выхлопных газов на входе в теплообменник ТЭГ; 4 – температура охлаждающей жидкости на выходном канале предпускового подогревателя; 5 – выходное генерируемое напряжение с 4 модулей ТЭГ
F i g. 9. Graphs of temperature dependence in the measured points of the experimental installation and change of generated voltage of TGM: 1 – temperature of the coolant in the unit tank; 2 – temperature of the exhaust gases at the TEG heat exchanger outlet; 3 – temperature of the exhaust gases at the TEG heat exchanger inlet; 4 – temperature of the coolant at the preheater outlet channel; 5 – output generated voltage from 4 TEG modules

Температура выхлопных газов 2 на выходе из теплообменника термоэлектрического генератора растет равномерно в течении 1 080 секунд, далее температура стабилизируется на отметке 133 °С. Падение температуры выхлопных газов после теплообменника термоэлектрического генератора, в сравнении с показателями температуры до теплообменника, обусловлено потерями тепловой энергии. Оно направлено на генерирование электрической энергии. Температура выхлопных газов на входе в теплообменник термоэлектрического генератора 3 (на выходе из выпускного трубопровода предпускового подогревателя) растет линейно до температуры 140 °С и стабилизируется. Температура охлаждающей жидкости на выходном канале предпускового подогревателя 4 стремительно растет от -15 до 90 °С и поддерживается до окончания цикла работы подогревателя.

Как видно из графика, генерируемое напряжение ТЭГ после запуска предпускового подогревателя постоянно растет до максимального значения 13,1 В, что соответствует 950 с от начала работы данного подогревателя. Далее происходит снижение вырабатываемого напряжения, обусловленное тем, что температура горячего теплообменника ТЭГ стабилизировалась, а температура холодного теплообменника растет.

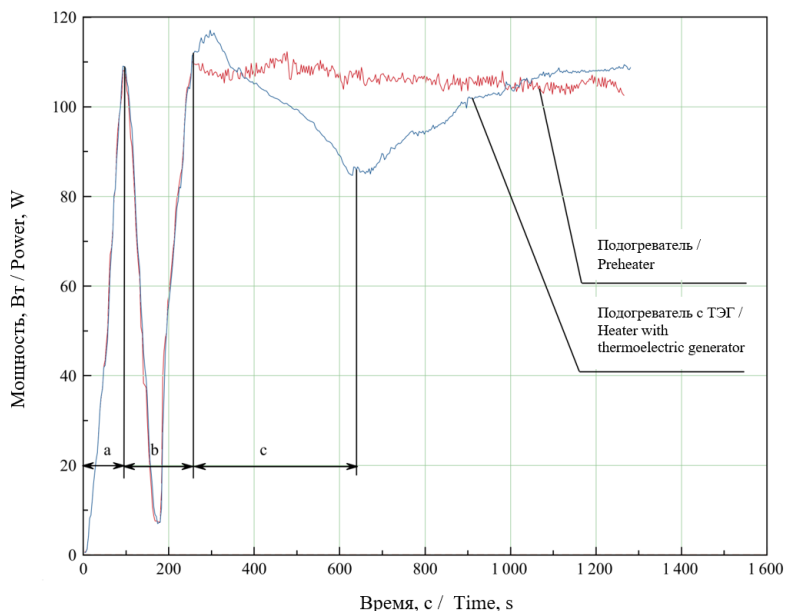
После внедрения ТЭГ в систему электропитания экспериментальной установки был получен график зависимости потребления электрической энергии предпусковым подогревателем от времени его работы без ТЭГ и с ним (рис. 10). Снижение потребления в этой точке обусловлено уменьшением числа оборотов центробежного вентилятора. После запуска подогревателя потребление электроэнергии возрастает и стабилизируется в случае работы штатного

подогревателя без ТЭГ на протяжении всего цикла.

Как видно из графика (рис. 10), при применении подогревателя с ТЭГ происходит снижение потребления электрической энергии автомобильной аккумуляторной кислотной батареи (АКБ). Максимальное снижение потребляемой энергии соответствует диапазону с, что свидетельствует о том, что применение ТЭГ в системе предпускового подогрева ДВС снижает потребление электрической энергии АКБ.

Обсуждение и заключение

Был проведен термический и гидродинамический анализ теплообменников, по результатам которого была определена наиболее эффективная конструкция проточной части теплообменника ТЭГ. Собран ТЭГ с 4 ТГМ, их выходное напряжение составило 13,1 В. Также была сконструирована экспериментальная установка, в результате использования которой получена зависимость влияния температурных режимов работы предпускового подогревателя на выходные показатели термоэлектрического генератора. После установки ТЭГ в систему работы жидкостного предпускового подогревателя удалось снизить энергопотребление на 12 %. Таким образом, определена и экспериментально доказана возможность снижения энергопотребления аккумуляторной батареи путем применения термоэлектрических генераторных модулей. Накопленную энергию можно адаптировать к системе питания самого предпускового подогревателя либо направить на зарядку аккумуляторной батареи или иных потребителей электрооборудования АТС. Такой способ использования термоэлектрического генератора снижает процент разрядки аккумуляторной батареи автомобиля в процессе тепловой подготовки.



Р и с. 10. График зависимости потребления электрической энергии АКБ предпусковым подогревателем от времени его работы: а – потребление электроэнергии подогревателем при продувке камеры сгорания; б – потребление электрической энергии при воспламенении топливовоздушной смеси; с – диапазон максимального снижения потребляемой энергии

Fig. 10. Diagram of dependence of electric power consumption of the fuel tank by the pre-start heater on the time of its operation: a – power consumption of the heater when blowing out the combustion chamber; b – electrical energy consumption during the ignition of the fuel-air mixture; c – maximum energy consumption reduction range

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Неговора, А. В.** Обоснование конструктивно-режимных параметров предпускового подогревателя / А. В. Неговора, Д. А. Гусев // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 125. – С. 90–96. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27657634> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.
2. **Михайловский, В. Я.** Режимы работы автомобилей при пониженных температурах. Необходимость использования нагревателей и рациональность применения термогенераторов для их работы / В. Я. Михайловский, Н. В. Максимук // Термоэлектричество. – 2015. – № 3. – С. 20–30. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ter_2015_3_5 (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.
3. **Bell, L. E.** Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems / L. E. Bell. – DOI 10.1126/science.1158899 // Science. – 2008. – Vol. 321, Issue 5895. – Pp. 1457–1461. – URL: <https://science.sciencemag.org/content/321/5895/1457> (дата обращения: 01.03.2021).
4. New Perspectives in Thermoelectric Energy Recovery System Design Optimization / T. J. Hendricks, N. K. Karri, T. P. Hogan, Ch. J. Cauchy. – DOI 10.1007/s11664-012-2406-x // Journal of Electronic Materials. – 2013. – Vol. 42. – Pp. 1725–1736. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-012-2406-x#citeas> (дата обращения: 01.03.2021).
5. **Максимук, М. В.** Проектування автомобільного передпускового джерела тепла з термоелектричним генератором / М. В. Максимук. – DOI 10.20535/1970.54(2).2017.119531 // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: приладобудування. – 2017. – № 54 (2). – С. 53–60. – URL: <http://visnykpb.kpi.ua/article/view/119531> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.



6. **Анатычук, Л. И.** Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя / Л. И. Анатычук, Р. В. Кузь, Ю. Ю. Розвер // Термоэлектричество. – 2012. – № 2. – С. 97–104. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ter_2012_2_11 (дата обращения: 01.03.2021).
7. **LeBlanc, S.** Thermoelectric Generators: Linking Material Properties and Systems Engineering for Waste Heat Recovery Applications / S. LeBlanc. – DOI 10.1016/j.susmat.2014.11.002 // Sustainable Materials and Technologies. – 2014. – Vol. 1-2. – Pp. 26–35. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993714000062?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).
8. The Influence of Inner Topology of Exhaust Heat Exchanger and Thermoelectric Module Distribution on the Performance of Automotive Thermoelectric Generator / Y. Wang, S. Li, Y. Zhang [et al.]. – DOI 10.1016/j.enconman.2016.08.009 // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 126. – Pp. 266–277. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416306811?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).
9. Heat Transfer Enhancement of a Modularised Thermoelectric Power Generator for Passenger Vehicles / B. Li, K. Huang, Y. Yan [et al.]. – DOI 10.1016/j.apenergy.2017.08.092 // Applied Energy. – 2017. – Vol. 205. – Pp. 868–879. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917311121?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).
10. Design of a Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery Application on a Drivable Heavy Duty Vehicle / A. E. Risseh, H.-P. Nee, O. Erlandsson [et al.]. – DOI 10.4271/2017-01-9178 // SAE International Journal of Commercial Vehicles. – 2017. – Vol. 10, Issue 1. – Pp. 26–44. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-9178/> (дата обращения: 01.03.2021).
11. Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis / S. Kumar, S. D. Heister, X. Xu [et al.]. – DOI 10.1007/s11664-013-2471-9 // Journal of Electronic Materials. – 2013. – Vol. 42. – Pp. 665–674. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11664-013-2471-9#citeas> (дата обращения: 01.03.2021).
12. Efficient Use of Energy Resources of the Generator of Hot Gases in the Thermal Preparation of Motor Vehicles / S. Nigmatullin, I. Gabitov, A. Izmailov [et al.]. – DOI 10.32479/ijeeep.8503 // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2020. – Vol. 10, Issue 1. – Pp. 228–235. – URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeeep/article/view/8503> (дата обращения: 01.03.2021).
13. Патент № 192532 Российская Федерация, МПК F02N 19/00 (2010.01). Автономная система предпусковой подготовки двигателя с термоэлектрическим генератором : № 2019111818 : заявл. 18.04.2019 : опубл. 23.09.2019 / Габитов И. И., Неговора А. В., Разяпов М. М., Самиков Р. Ф. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». – Текст : электронный. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU192532U1_20190923 (дата обращения: 01.03.2021).
14. Патент № 72304 Украина, МПК F01N 5/00, H01L 35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення : № и 2012 02055 : заявл. 23.02.2012 : опубл. 10.08.2012 / Анаитчук Л. І., Михайловський В. Я. ; Власник Інститут термоелектрики Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України. – 7 с. – URL: <https://uapatents.com/7-72304-avtomobilnij-obigrivach-z-termoelektrichnim-dzherelom-zhivlennya.html> (дата обращения: 01.03.2021).
15. **Шостаковский, П. Г.** Инновационная деятельность компании «Криотерм» в области разработки и производства термоэлектрических приборов и устройств / П. Г. Шостаковский // Инновации. – 2014. – № 2 (184). – С. 137–141. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22671285> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.
16. **Леонтьев, А. И.** Выбор оптимального метода интенсификации теплообмена для повышения эффективности термоэлектрического генератора / А. И. Леонтьев, Д. О. Онищенко, Г. А. Арутюнян // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 5. – С. 779–787. – URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/13e/13e2d1b431080b1dcc8d87186d951529.pdf> (дата обращения: 01.03.2021).
17. Повышение эффективности рабочего процесса поршневого двигателя путем прямого преобразования теплоты выпускных газов в электрическую энергию / А. И. Леонтьев, Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко [и др.]. – DOI 10.7868/S0040364416010051 // Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54, № 1. – С. 99–107. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0040364416010051> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

18. Теоретические и экспериментальные исследования генератора горячих газов с термоэлектрической насадкой / А. В. Неговора, Ш. Ф. Нигматуллин, М. М. Разяпов, Р. Ф. Самиков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 57. – С. 123–128. – URL: <https://clck.ru/UnX6h> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

19. Разработка стенда для испытания предпусковых подогревателей силовых агрегатов сельскохозяйственной и строительной техники / Ш. Ф. Нигматуллин, М. М. Разяпов, С. С. Акимов, Р. Ф. Самиков // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2020. – № 2 (54). – С. 100–105. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42982359> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

Поступила 16.03.2021; одобрена после рецензирования 20.04.2021; принята к публикации 11.05.2021

Об авторах:

Самиков Руслан Фанзилович, аспирант кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3263-3825>, 89173711415@mail.ru

Нигматуллин Шамиль Файзрахманович, доцент кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6689-1481>, shamil.bosch@mail.ru

Разяпов Махмут Магдатович, доцент кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-736X>, mahmut_23@mail.ru

Козеев Арсений Александрович, доцент кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2613-0247>, kozeevbsau@mail.ru

Смолянов Алексей Викторович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7852-1146>, alexsmol013@yandex.ru

Галин Дмитрий Александрович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-2685>, tehosmotr.yalga@yandex

Заявленный вклад соавторов:

Р. Ф. Самиков – подготовка текста, анализ литературных данных.

Ш. Ф. Нигматуллин – научное руководство, анализ и доработка текста.

М. М. Разяпов – научное руководство, анализ и доработка текста.

А. А. Козеев – подготовка текста, анализ данных.

А. В. Смолянов – подготовка и анализ литературных данных, редактирование текста.

Д. А. Галин – подготовка и анализ литературных данных, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Negovora A.V., Gusev D.A. Substantiation of Constructive-Regime Parameters of Preheater. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2016; 125:90-96. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27657634> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Mikhaylovskiy V.Ya., Maksimuk N.V. [Modes of Operation of Vehicles at Low Temperatures. Necessity of Using Heaters and Rationality of Using Thermogenerators for Their Operation]. *Termoelektrichestvo* = Thermoelectricity. 2015; (3):20-30. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ter_2015_3_5 (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Bell L.E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. *Science*. 2008; 321(5895):1457-1461. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
4. Hendricks T.J., Karri N.K., Hogan T.P., Cauchy Ch.J. New Perspectives in Thermoelectric Energy Recovery System Design Optimization. *Journal of Electronic Materials*. 2013; 42:1725-1736. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2406-x>
5. Maksymuk M.V. Designing of Automotive Pre-Start Heat Sources with Thermoelectric Generator. *Visnik natsionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiivskiy politekhnichniy institu". Seriya: priladobuduvannya* = Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series: Instrument Engineering. 2017; (54):53-60. Available at: <http://visnykpb.kpi.ua/article/view/119531> (accessed 01.03.2021). (In Ukr., abstract in Eng.)
6. Anatyshchuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. [Thermoelectric Generator for Gasoline Engine]. *Termoelektrichestvo* = Thermoelectricity. 2012; (2):97-104. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ter_2012_2_11 (accessed 01.03.2021). (In Russ.)
7. LeBlanc S. Thermoelectric Generators: Linking Material Properties and Systems Engineering for Waste Heat Recovery Applications. *Sustainable Materials and Technologies*. 2014; 1-2:26-35. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.002>
8. Wang Y., Li S., Zhang Y., et al. The Influence of Inner Topology of Exhaust Heat Exchanger and Thermoelectric Module Distribution on the Performance of Automotive Thermoelectric Generator. *Energy Conversion and Management*. 2016; 126:266-277. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.009>
9. Li B., Huang K., Yan Y., et al. Heat Transfer Enhancement of a Modularised Thermoelectric Power Generator for Passenger Vehicles. *Applied Energy*. 2017; 205:868-879. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.092>
10. Risseh A.E., Nee H.-P., Erlandsson O., et al. Design of a Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery Application on a Drivable Heavy Duty Vehicle. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. 2017; 10(1):26-44. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-9178>
11. Kumar S., Heister S.D., Xu X., et al. Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis. *Journal of Electronic Materials*. 2013; 42:665-674. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2471-9>
12. Nigmatullin S., Gabitov I., Izmailov A., et al. Efficient Use of Energy Resources of the Generator of Hot Gases in the Thermal Preparation of Motor Vehicles. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020; 10(1):228-235. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.8503>
13. Gabitov I.I., Negovora A.V., Razyapov M.M., Samikov R.F. [Stand-Alone Engine Preparation System with Thermoelectric Generator]. Patent 192,532 Russian Federation. 2019 September 23. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU192532U1_20190923 (accessed 01.03.2021). (In Russ.)
14. Anatyshchuk L.I., Mikhaylovskiy V.Ya. Car Heater with a Thermo-Electric Power Source. Patent 72,304 Ukraine. 2012 August 10. Available at: <https://uapatents.com/7-72304-avtomobilnij-obigrivach-z-termoelektrichnim-dzherelom-zhivlennya.html> (accessed 01.03.2021). (In Ukr.)
15. Shostakovskiy P.G. Innovation Activity of the Kriotherm Company in Development and Production of Thermoelectric Devices and Equipment. *Innovatsii* = Innovations. 2014; (2):137-141. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22671285> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Leontev A.I., Onishchenko D.O., Arutyunyan G.A. [Selection of the Optimal Method of Heat Exchange Intensification to Increase the Efficiency of Thermoelectric Generator]. *Teplofizika*

i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics. 2016; 23(5):779-787. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/13e/13e2d1b431080b1dcc8d87186d951529.pdf> (accessed 01.03.2021). (In Russ.)

17. Leontiev A.I., Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., et al. Improvement of Piston Engine Operation Efficiency by Direct Conversion of the Heat of Exhaust Gases into Electric Energy. *Teplotfizika vysokikh temperatur* = High Temperature. 2016; 54(1):99-107. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364416010051>

18. Negovora A.V., Nigmatullin Sh.F., Razyapov M.M., Samikov R.F. Theoretical and Experimental Studies of a Hot Gas Generator with a Thermoelectric Nozzle. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2019; (57):123-128. Available at: <https://clck.ru/UnX6h> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

19. Nigmatullin Sh.F., Razyapov M.M., Akimov S.S., Samikov R.F. For Testing Pre-Starting Heaters of Power Units of Autotractor and Construction Equipment. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of the Bashkir State Agrarian University. 2020; (2):100-105. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42982359> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 16.03.2021; approved after reviewing 20.04.2021; accepted for publication 11.05.2021

About the authors:

Ruslan F. Samikov, Postgraduate Student in the Chair of Automobiles and Machine-Tractor Complexes, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3263-3825>, 89173711415@mail.ru

Shamil F. Nigmatullin, Associate Professor of the Chair of Automobiles and Tractor-Specific Machines, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6689-1481>, shamil.bosch@mail.ru

Makhmut M. Razyapov, Associate Professor of the Department of Automobiles and Tractor-Specific Machines, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-736X>, mahmut_23@mail.ru

Arseniy A. Kozeev, Associate Professor of the Chair of Automobiles and Tractor-Specific Machines, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2613-0247>, kozeevbsau@mail.ru

Alexey V. Smolyanov, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7852-1146>, alexsmol013@yandex.ru

Dmitriy A. Galin, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-2685>, tehosmotr.yalga@yandex

Contribution of the authors:

R. F. Samikov – text preparation, analysis of literary data.

Sh. F. Nigmatullin – scientific guidance, analysis and revision of the text.

M. M. Razyapov – scientific guidance, analysis and revision of the text.

A. A. Kozeev – text preparation, data analysis.

A. V. Smolyanov – preparation and analysis of literary data, text editing.

D. A. Galin – preparation and analysis of literary data, text editing.

All authors have read and approved the final manuscript.

DOI: [10.15507/2658-4123.031.202102.321](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.321)

ОТЗЫВ ПУБЛИКАЦИИ

Отзыв из печати статьи Калякулина С. Ю., Кузьмина В. В., Митина Э. В., Сульдина С. П., Тюрбеевой Т. Б. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 77–84. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.077-084

Статья, опубликованная в научном журнале «Вестник Мордовского университета» (2018. Т. 28, № 1. С. 77–84) под названием «Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза», авторами которой являются Калякулин Сергей Юрьевич (rim-tm@mail.ru), Кузьмин Владимир Владимирович (kvv2607@yandex.ru), Митин Эдуард Валерьевич (rimnauka@rambler.ru), Сульдин Сергей Петрович (rimstanok@mail.ru), Тюрбеева Татьяна Борисовна (turbeev@mail.ru), отзывается из печати редактором с согласия издателя.

Изъятие (ретракция) публикации обусловлено выявлением значительной части масштабных заимствований из источника: Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е. Выбор технологических баз на основе решения прямой задачи размерного анализа // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2012. № 2 (20). С. 64–69.

RETRACTION NOTE

Retracted article: Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Suldin S.P., Tyurbееva T.B. Designing the Structure of Technological Processes Based on Synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):77–84. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.077-084 (In Russ.)

This article by Sergey Yu. Kalyakulin (rim-tm@mail.ru), Vladimir V. Kuzmin (kvv2607@yandex.ru), Eduard V. Mitin (rimnauka@rambler.ru), Sergey P. Suldin (rimstanok@mail.ru), Tatyana B. Tyurbееva (turbeev@mail.ru) has been retracted (i.e. withdrawn from the press) by the editor with permission of the publisher.

The reason for the article retraction is detection of large-scale borrowings from the article: Kuzmin V.V., Maksimovskiy D.E. Choice of Technological Bases on the Basis of the Decision of a Direct Problem of the Dimensional Analysis. *Vestnik MGTU STANKIN* = MSTU STANKIN Bulletin. 2012; (2):64–69. (In Russ.)

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.322

ОТЗЫВ ПУБЛИКАЦИИ

Отзыв из печати статьи Калякулина С. Ю., Кузьмина В. В., Митина Э. В., Сульдина С. П., Тюрбеевой Т. Б. Синтез структуры технологических процессов // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 2. С. 287–299. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002.287-299

Статья, опубликованная в научном журнале «Инженерные технологии и системы» (2020. Т. 30, № 2. С. 287–299) под названием «Синтез структуры технологических процессов», авторами которой являются Калякулин Сергей Юрьевич (rim-tm@mail.ru), Кузьмин Владимир Владимирович (kvv2607@yandex.ru), Митин Эдуард Валерьевич (rimnauka@rambler.ru), Сульдин Сергей Петрович (rimstanok@mail.ru), Тюрбеева Татьяна Борисовна (turbeev@mail.ru), отзывается из печати редактором с согласия издателя.

Изъятие (ретракция) публикации обусловлено выявлением значительной части масштабных заимствований из источника: Кузьмин В. В., Схиртладзе А. Г. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения. М.: Высшая школа, 2008. 280 с. ISBN: 978-5-06-004837-7

RETRACTION NOTE

Retracted article: Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Suldin S.P., Tyurbeeva T.B. Synthesis of the Structure of Technological Processes. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):287-299. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002.287-299 (In Russ.)

This article by Sergey Yu. Kalyakulin (rim-tm@mail.ru), Vladimir V. Kuzmin (kvv2607@yandex.ru), Eduard V. Mitin (rimnauka@rambler.ru), Sergey P. Suldin (rimstanok@mail.ru), Tatyana B. Tyurbeeva (turbeev@mail.ru) has been retracted (i.e. withdrawn from the press) by the editor with permission of the publisher.

The reason for the article retraction is detection of large-scale borrowings from the book: Kuzmin V.V., Skhirtladze A.G. [Mathematical Modeling of Technological Processes of Assembly and Machining of Mechanical Engineering Products]. Moscow: Higher School Publ.; 2008. 280 p. ISBN: 978-5-06-004837-7 (In Russ.)

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

01.03.02 Приборы и методы экспериментальной физики

01.03.06 Оптика

01.03.13 Электрофизика, электрофизические установки

04.03.01 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

04.03.02 Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение агропромышленного комплекса

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты.

1. Указать УДК.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Материалы и методы (Materials and Methods);

3) Результаты исследования (Results);

4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.100–2018). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(и) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

Допускается свободное воспроизведение материалов журнала в личных целях и свободное использование в информационных, научных, учебных и культурных целях в соответствии со ст. 1273 и 1274 гл. 70 ч. IV Гражданского кодекса РФ. Иные виды использования возможны только после заключения соответствующих письменных соглашений с правообладателем.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Сенин Петр Васильевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

Engineering Technologies and Systems journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Sciences should be published for scientific specialties and branches of science:

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Technologies, Machinery and Equipment for Agro-Industries

Electrotechnics, Electrical Equipment and Power Supply in Agro-Industries

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of AntiPlagiat and CrossCheck systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Materials and Methods;

3) Results;

4) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) **Introduction.** It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) **Literature Review.** It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) **Materials and Methods.** This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) **Results.** This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) **Discussion and Conclusion.** In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.100–2018* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. Manuscript Format Guidelines.

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Free reproduction of the journal's materials for personal purposes and free use for information, scientific, educational and cultural purposes is allowed in accordance with articles 1273 and 1274 of Chapter 70, part 4 of the Civil Code of the Russian Federation. Other types of use are possible only after the conclusion of relevant written agreements with the right holder.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Sergey M. Vdovin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 244888.

Petr V. Senin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *А. Д. Карпов*
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 08.06.2021 г. Дата выхода в свет 30.06.2021 г.

Формат 70 × 100 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 12,03.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 664. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»)



Editor *A. D. Karpov*
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 08.06.2021. Date of publishing 30.06.2021.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$, Conventional printed sheets 12,03.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 664. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)

