

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201903 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 29, № 3. 2019

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Основан в январе 1990 г.  
Выходит один раз в квартал



Vol. 29, no. 3. 2019

SCIENTIFIC JOURNAL  
Founded in January 1990  
Issued quarterly

16+

# 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»

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

Предыдущее название (до 2019 года):  
**Вестник Мордовского университета**

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, SHERPA/RoMEO и ResearchBib

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),  
Комитета по этике научных публикаций,

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 в каталогах агентств «Роспечать» и «МК-Периодика» – **70539**

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**  
430005, Россия, Республика Мордовия,  
г. Саранск, ул. Большевистская, 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, Russia  
Tel/Fax: +7 8342 481424

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2019

## 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:

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

01.04.05 Оптика

01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Редакция журнала осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих в редакцию статей с целью экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в издательстве и редакции в течение 5 лет. Редакция журнала направляет копии рецензий авторам представленных материалов и в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении соответствующего запроса.

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/ReMeO

Журнал является членом Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Комитета по этике научных публикаций, Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef и международного сообщества рецензентов Publons

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



## “Engineering Technologies and Systems” Journal

accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering system 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 and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

To provide complex expert evaluation, all manuscripts undergo “double-blind” review. All reviewers are acknowledged experts in the areas they are responsible for. Reviews are stored in the publishing house and publishing office during five years.

The Editorial staff sends copies of reviews to the authors of the accepted materials and to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation when requested.

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

ResearchBib

SHERPA/RoMEO

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),  
Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics,  
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@mrsu.ru (Саранск, Россия)
- Сенин Петр 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, Россия)
- Гордина Светлана Викторовна** – *ответственный секретарь*, член Европейской ассоциации научных редакторов (EASE), кандидат педагогических наук, ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik\_mrsu@mail.ru (Саранск, Россия)
- Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы** – академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры лесной индустрии, Бартынский государственный университет, профессор кафедры экологии и природопользования, ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет», доктор биологических наук, профессор (Бартын, Турция)
- Булгаков Алексей Григорьевич** – профессор Института строительного дела, Дрезденский технический университет, доктор технических наук, профессор (Дрезден, Германия)
- Дмитров Валерий Петрович** – заведующий кафедрой управления качеством, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, Россия)
- 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 (Саранск, Россия)
- Железникова Ольга Евгеньевна** – директор Института электроники и светотехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)
- Игумнов Леонид Александрович** – директор Научно-исследовательского института механики, заведующий кафедрой теоретической, компьютерной и экспериментальной механики, ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», доктор физико-математических наук, профессор (Нижний Новгород, Россия)
- Кечемайкин Владимир Николаевич** – директор Рузаевского института машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук (Саранск, Россия)
- Котин Александр Владимирович** – заведующий кафедрой механизации переработки сельскохозяйственной продукции, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Саранск, Россия)
- Кусмарцев Федор Васильевич** – декан физического факультета, Университет Лафборо, кандидат физико-математических наук (Лафборо, Великобритания)
- Кухарев Олег Николаевич** – ректор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Пенза, Россия)
- Микаева Светлана Анатольевна** – профессор кафедры ПР-4 «Электротехника и электроника», ФГБОУ ВО «Московский технологический университет», доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)
- Нишев 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, Россия)
- Прытков Юрий Николаевич** – директор Аграрного института, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)
- Рябочкина Полина Анатольевна** – главный научный сотрудник лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Саранск, Россия)
- Салем Абдель-Бадех Мохамед** – руководитель Исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук, университет «Ain Shams», доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор (Каир, Египет)
- Скрябин Владимир Александрович** – профессор кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доктор технических наук, ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Пенза, Россия)
- Чучаев Иван Иванович** – декан факультета математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент (Саранск, Россия)
- Шишелова Тамара Ильинична** – профессор кафедры физики, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, профессор (Иркутск, Россия)
- Ямашкин Анатолий Александрович** – заведующий кафедрой землеустройства и ландшафтного планирования, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор географических наук, профессор (Саранск, Россия)

## EDITORIAL BOARD

- Sergey M. Vdovin** – *Editor in Chief*, Rector of National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7363-1389, rector@mrsu.ru (Saransk, Russia)
- 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, Russia)
- Svetlana V. Gordina** – *Executive Editor*, Member of European Association of Science Editors (EASE), Ph.D. (Pedagogy), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik\_mrsu@mail.ru (Saransk, Russia)
- Surhay Allahverdi** – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Forest Industry Chair, Bartin University, Professor of Ecology and Nature Management Chair, Moscow Pedagogical State University, D.Sc. (Biology), Professor (Bartın, Turkey)
- Aleksey G. Bulgakov** – Professor of Faculty of Architecture, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engineering), Professor (Dresden, Germany)
- Ivan I. Chuchayev** – Dean of Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russia)
- Valeriy V. Dimitrov** – Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Russia, Rostov-on-Don)
- Leonid A. Igumnov** – Director of Research Institute of Mechanics, Head of Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor (Nizhniy Novgorod, Russia)
- Vladimir N. Kechemaykin** – Director of Ruzaevka Campus, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economics) (Saransk, Russia)
- Aleksandr V. Kotin** – Director of Institute of Mechanics and Energy, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-0078-1866 (Saransk, Russia)
- Fedor V. Kusmartsev** – Dean of Institute of Physics, Loughborough University, Ph.D. (Phys.-Math.) (Loughborough, Great Britain)
- Oleg N. Kukharev** – Rector of Penza State Agrarian University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Penza, Russia)
- Svetlana A. Mikayeva** – Professor of Electrotechnics and Electronics Chair, Moscow Engineering University, D.Sc. (Engineering), Professor (Moscow, Russia)
- Konstantin N. Nishchev** – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7905-3700 (Saransk, Russia)
- Yuriy N. Prytkov** – Director of Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Agriculture), Professor (Saransk, Russia)
- Polina A. Ryabochkina** – Professor of Chair of General Physics, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Saransk, Russia)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (Computer Science), Emeritus Professor (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Professor of Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engineering), Scopus ID: 6507978465 (Irkutsk, Russia)
- Vladimir A. Skryabin** – Professor of Machine Engineering Technology Chair, Penza State University, D.Sc. (Engineering), ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Penza, Russia)
- Anatoliy A. Yamashkin** – Head of Land Utilization and Landscape Design Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geography), Professor (Saransk, Russia)
- Vladimir T. Yerofeyev** – 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 (Saransk, Russia)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Engineering), Associate Professor (Saransk, Russia)



## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

Харманда Г., Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Влияние значений индекса надежности на результирующие конфигурации оптимизации топологии на основе надежности: численная проверка с помощью оптимизации формы.....	332
Щёкин А. В. Автоматизация получения параметров детали для задач конструкторско-технологической параметризации.....	345

### **ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ**

Субботин И. А., Брюханов А. Ю., Тимофеев Е. В., Эрк А. Ф. Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве.....	366
Грудинин В. С., Хорошавин В. С., Зотов А. В., Грудинин С. В. Адаптивное итерационное управление температурой в теплице.....	383
Величко С. А., Чумаков П. В., Коломейченко А. В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов.....	396
Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Наумкин Н. И., Безруков А. В., Шляпников М. Г. Анализ энергоёмкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом.....	414

### **ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Сыроватка В. И., Жданова Н. В., Рассказов А. Н., Торопов Д. И. Баротермическая обработка ингредиентов комбикормов.....	428
Барышева Н. Н., Пронин С. П. Метод определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов.....	443
Савин В. Ю. Определение усилий, необходимых для очеса колоса пшеницы.....	456
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....</i>	<i>467</i>
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....</i>	<i>469</i>

## ***CONTENTS***

### ***COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT***

<b>Kharmanda G., Antypas I. R., Dyachenko A. G.</b> The Effect of Reliability Index Values on Resulting Reliability-Based Topology Optimization Configurations: Numerical Validation by Shape Optimization.....	332
<b>Shchekin A. V.</b> Automation of Obtaining Parts Parameters for Tasks of Design-Technological Parametrization.....	345

### ***PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS***

<b>Subbotin I. A., Briukhanov A. Yu., Timofeev E. V., Erk A. F.</b> Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources.....	366
<b>Grudin V. S., Khoroshavin V. S., Zotov A. V., Grudin S. V.</b> Adaptive Iterative Control of Temperature in Greenhouse.....	383
<b>Velichko S. A., Chumakov P. V., Kolomeychenko A. V.</b> Assessment of Technical Condition of C Series Power Hydraulic Cylinders of Mounted Hydraulic Systems of Tractors.....	396
<b>Kupryashkin V. F., Ulanov A. S., Naumkin N. I., Bezrukov A. V., Shlyapnikov M. G.</b> Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow.....	414

### ***TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION***

<b>Syrovatka V. I., Zhdanova N. V., Rasskazov A. N., Toropov D. I.</b> Barothermal Processing of Animal Feed Ingredients.....	428
<b>Barysheva N. N., Pronin S. P.</b> Method of Determining Seed Germination by Using Membrane Potential of Wheat Seeds.....	443
<b>Savin V. Yu.</b> Determination of the Force Required for Stripping the Wheat Ear.....	456
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i> .....	467
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i> .....	469

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ / COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 620.1.515.1:004.052

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201903.332-344



## The Effect of Reliability Index Values on Resulting Reliability-Based Topology Optimization Configurations: Numerical Validation by Shape Optimization

G. Kharmanda<sup>1</sup>, I. R. Antypas<sup>2\*</sup>, A. G. Dyachenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Institute of Applied Sciences of Rouen  
(Saint-Étienne-du-Rouvray, France)

<sup>2</sup>Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

\*[imad.antypas@mail.ru](mailto:imad.antypas@mail.ru)

**Introduction.** The classical topology optimization leads to structural type and general layout prediction and gives a rough description of the shape of both the external and internal structure boundaries. However, Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) model produces multiple reliability-based topologies with high levels of performance. The aim of this work is to study the effect of reliability changes on the obtained topologies.

**Materials and Methods.** The developed Gradient-Based Method (GBM) has been used efficiently as a general method for several applications (statics and dynamics). When considering several reliability levels, several topologies can be obtained. In order to compare the resulting topologies, a shape optimization is considered as a detailed design aspect.

**Results.** Numerical applications are carried out on an MBB (Messerschmitt-Bölkow-Blohm) beam subjected to a distributed load. The DTO model is carried out without consideration of reliability concept. However, for the RBTO model, an interval of reliability is considered that produces several topologies. Here, the randomness is applied on geometry and material parameters. The application of the shape optimization algorithm leads to reduced structural volumes when increasing the reliability levels.

**Discussion and Conclusion.** In addition to its simplified implementation, the developed GBM strategy can be considered as a generative tool to provide the designer with several solutions. The shape optimization is considered as a numerical validation of the importance of the different resulting RBTO layouts.

**Keywords:** deterministic topology optimization, reliability-based topology optimization, Gradient-Based Method

**For citation:** Kharmanda G., Antypas I.R., Dyachenko A.G. The Effect of Reliability Index Values on Resulting Reliability-Based Topology Optimization Configurations: Numerical Validation by Shape Optimization. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):332-344. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.332-344>

© Kharmanda G., Antypas I. R., Dyachenko A. G., 2019



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



## Влияние значений индекса надежности на результирующие конфигурации оптимизации топологии на основе надежности: численная проверка с помощью оптимизации формы

Г. Харманда<sup>1</sup>, И. Р. Антибас<sup>2\*</sup>, А. Г. Дьяченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный институт прикладных наук Руана  
(г. Сент-Этьен-дю-Рувре, Франция)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия)

\**imad.antypas@mail.ru*

*Введение.* Классическая оптимизация топологии приводит к прогнозированию структурного типа и общей компоновки и дает приблизительное описание формы внешних, а также внутренних границ структуры. Однако модель оптимизации топологии на основе надежности (RBTO) создает несколько топологий с высоким уровнем производительности. Целью данной работы является изучение влияния изменений надежности на полученные топологии.

*Материалы и методы.* Разработанный градиентный метод (GBM) эффективно используется в качестве общего метода для нескольких приложений (статики и динамики). При рассмотрении нескольких уровней надежности можно получить несколько топологий. Для их сравнения оптимизация формы рассматривается как аспект детального проектирования.

*Результаты исследования.* Расчеты балки, подверженной распределенной нагрузке, выполнялись с помощью вычислительного приложения на MBV (Messerschmitt-Bölkow-Blohm). DTO-модель внесена без рассмотрения принципиальной схемы надежности. Однако для RBTO-модели учитывался интервал надежности, который произвел несколько топологий. Здесь случайность применяется к геометрии и параметрам материала. Применение алгоритма оптимизации формы приводит к уменьшению структурных объемов при повышении уровня надежности.

*Обсуждение и заключение.* Помимо упрощенной реализации, разработанная стратегия GBM может рассматриваться как генеративный инструмент для предоставления проектировщику нескольких решений. Оптимизация формы рассматривается как численная проверка важности различных результирующих макетов RBTO.

**Ключевые слова:** детерминированная оптимизация топологии, оптимизация топологии на основе надежности, градиентный метод

**Для цитирования:** Харманда Г., Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Влияние значений индекса надежности на результирующие конфигурации оптимизации топологии на основе надежности: численная проверка с помощью оптимизации формы // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 332–344. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.332-344>

### Introduction

Optimizing the topology seeks to answer one of the first questions regarding the nature of the structure in order to meet the required specifications. So the problem of topology is to determine the general characteristics of the studied structure, and the purpose of topology optimization is to make this initial choice as au-

tomatic as possible [1]. In addition, both macroscopic structures and microscopic materials can be found using topology optimization concepts. In other words, it is not only the optimal spatial distribution of the material on the macroscopic structural scale, but also the optimal local use of the cellular material on the microscopic scale<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Xia L. Multiscale Structural Topology Optimization. ISTE–Elsevier; 2016. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/293427993\\_Multiscale\\_Structural\\_Topology\\_Optimization](https://www.researchgate.net/publication/293427993_Multiscale_Structural_Topology_Optimization) (accessed 01.05.2019). (In Eng.)

Two basic topology optimization models can be classified in the literature: deterministic and reliability-based models. In Deterministic Topology Optimization (DTO), one can search for a single solution for a given domain<sup>2</sup>. But the Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) model studied in this article, can lead to several solutions with different advantages, allowing us to choose the best topology to meet the technical specifications. The structural weight of the solutions obtained using this model is reduced in comparison with the DTO model. In addition, when using the RBTO model, the obtained layout is more reliable in comparison with the deterministic topology at the same weight values<sup>3</sup>. To develop this model, two points of view are presented: topology optimization and reliability analysis. A literature review is presented in the next section to show the various advantages of the RBTO model. As result, several reliability-based topologies are obtained when considering several reliability levels. To compare the resulting topologies, a shape optimization is considered and shows that for the same boundary conditions, the RBTO configurations reduce the structural weight when increasing the reliability index values.

### Literature Review

The main difference between DTO and RBTO is to consider the uncertainty on the parameters having important roles for optimal topology. The main idea of reliability-based topology optimization is based on the reliability-based design optimization. When considering the reliability-based design optimization problem, the

uncertainties regarding variable sizes are taken into account to ensure greater reliability of the proposed solution. However, the reliability-based topology optimization aims to provide designers with several solutions that have several levels of reliability. Here the designer can choose the best solution. In the RBTO model, several methods have been developed. The different works can be divided into two points of view.

From point of view “topology optimization”, the reliability-based topology optimization model was developed in the article of G. Kharmanda and N. Olhoff<sup>4</sup> to provide the designer with multiple reliability-based structures, but in the classical topology optimization, the designer produces only one deterministic topology. It is shown that the importance of the reliability-based topology optimization model leads to structures that are more robust than those obtained by deterministic topology optimization for the same weight [2–4]. In addition, probabilistic neural networks in the case of highly nonlinear or disjoint problems of the failure region are used in some studies [5]. This strategy has been successfully applied on various trusses. Recently, a method of optimization of the topology of detailed design of solid structures based on probabilistic reliability has been developed<sup>5</sup>.

From a point of view “reliability analysis”, deterministic topology optimization is formulated as finding the most rigid structural arrangement with volume restriction. To maintain rigidity stability in topological design, optimization prob-

<sup>2</sup> Kharmanda G., El-Hami A. Biomechanics: Optimization, Uncertainties and Reliability. ISTE–Wiley; 2017. Available at: <http://ebook-dl.com/book/8163> (accessed 01.05.2019). (In Eng.)

<sup>3</sup> Kharmanda G., Olhoff N. Reliability-Based Topology Optimization: Report. Aalborg: Aalborg Universitetsforlag; 2001. Available at: <http://www.forskningsdatabasen.dk/en/catalog/2389380317> (accessed 01.05.2019). (In Eng.)

<sup>4</sup> Kharmanda G., Olhoff N. Reliability-Based Topology Optimization as a New Strategy to Generate Different Topologies. In: 15th Nordic Seminar in Computational Mechanics. Aalborg: Aalborg University; 2002. Pp. 11-14. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/237295035\\_Reliability-Based\\_Topology\\_Optimization\\_as\\_a\\_New\\_Strategy\\_to\\_Generate\\_Different\\_Structural\\_Topologies](https://www.researchgate.net/publication/237295035_Reliability-Based_Topology_Optimization_as_a_New_Strategy_to_Generate_Different_Structural_Topologies) (accessed 01.05.2019). (In Eng.)

<sup>5</sup> Bae K., Wang S. Reliability-Based Topology Optimization. In: 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. 2002; AIAA. 2002-5542. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2002-5542>

lem is formulated as a volume minimization problem with displacement restriction and RBDO technique is applied<sup>6</sup>. Here, the objective is to minimize the structural volume under the condition of the linear limit state function. Further, in article of H. Agarwal<sup>7</sup> a hybrid cellular automaton (HCA) was developed for the structural synthesis of a continuum material, where the state of each cell is determined by both density and strain energy. The paper [6] uses an unrelated RBDO approach in which topology optimization is separated from reliability analysis. The use of RBTO taking into account the gradient free hybrid cellular automata (HCA) method was performed<sup>8</sup>. Here, the formulation also includes uncertainty about material properties. The RBTO model using bidirectional evolutionary structural optimization and the standard response surface method was performed [7]. A computational method for reliability-based topology optimization for continuous domain under uncertainty of material properties has been developed [8].

Comparing both different points of view, the computing time of the reliability-based topology optimization methods in terms of “reliability analysis” is very high since a large number of design variables are associated with optimization problems of the continuum topology<sup>9</sup>.

Thus, the point of view “topology optimization” seems to be very interesting to topology developers because it leads to several reliability-based structures with respect to changes in the reliability index. It produces different structures while when

considering the point of view “reliability analysis”, we get the same structure with different densities that makes no sense for the next detailed design stages.

To perform RBTO tasks, some RBDO methods can be used since we deal with a different definition or philosophy. Several RBDO methods have been developed with respect to their use<sup>10</sup> [9]. The gradient-based method seems very easy to use, especially when considering static cases [2; 3]. In this work, a gradient-based method is used to create several reliability-based topologies. The resulting models are considered as the input configuration of the shape optimization algorithm in order to show their different advantages.

### Materials and Methods

#### *Deterministic Topology Optimization*

The problem of topology optimization is related to the minimization of strain energy under the condition of limiting the structural volume [10]. All load parameters and material properties are treated as deterministic values. The topology optimization problem consists of minimizing the compliance with a target percentage of the structural volume. This problem can be mathematically expressed [11]:

$$\begin{aligned} \min : & \text{Comp} \\ \text{s.t.} : & \frac{V}{V_0} \leq f, \end{aligned} \quad (1)$$

where *Comp* is the compliance considering the material densities in each element as optimization variables that belong to the interval [0, 1].  $V_0$  and  $V$  are the initial-and

<sup>6</sup> Patel N.M., Agarwal H., Tovar A., Renaud J. Reliability Based Topology Optimization Using the Hybrid Cellular Automaton Method. In: 46<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference; 2005. AIAA: 2005-2134. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2005-2134>

<sup>7</sup> Agarwal. H. Reliability Based Design Optimization: Formulations and Methodologies: PhD. Thesis. Notre Dame: University of Notre Dame; 2004. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004PhDT.....148A> (accessed 01.05.2019). (In Eng.)

<sup>8</sup> Ibid.

<sup>9</sup> Kharmanda G., Olhoff N. Reliability-Based Topology Optimization as a New Strategy...

<sup>10</sup> Yaich A., Kharmanda G., El Hami A., Walha L., et al. Reliability Based Design Optimization under Fatigue Damage Constraints of Structures Subject to Random Vibrations. In: ECSO 2017: European Conference on Stochastic Optimization; 2017. Pp. 20-22. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/jmech.2017.44>; Rozvan G.I.N. Problem Classes, Solution Strategies and Unified Terminology of FE-Based Topology Optimization. In: Topology Optimization of Structures and Composite Continua; 2000. Pp. 19-35. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0910-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0910-2_2)

current structural volume values. Formulation (1) is a basic form and can be used with several topology optimization methods such as SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalty), homogenization approach [11; 12]. In this work, SIMP method is considered. Equation (1) can be expressed by:

$$\begin{aligned} \min : C(\mathbf{x}) &= \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} = \sum_{e=1}^N (x_e)^p \mathbf{q}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{q}_e \\ \text{s.t.} : \frac{V(\mathbf{x})}{V_0} &= f \\ : \mathbf{K} \mathbf{q} &= \mathbf{F} \\ : \mathbf{0} < \mathbf{x}_{\min} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{1}, \end{aligned} \quad (2)$$

where  $q$  and  $F$  are the global displacement and force vectors, respectively.  $K$  is the global stiffness matrix.  $q_e$  and  $k_0$  are the element displacement vector and stiffness matrix, respectively.  $X$  is the vector of design variables;  $x_{\min}$  is a vector of minimum relative densities (non-zero to avoid singularity).  $N$  is the number of elements to discretize the design domain.  $p$  is the penalization power.  $V(x)$  and  $V_0$  are the material volume and design domain volume, respectively and  $f$  is the prescribed volume fraction.

#### Reliability-Based Topology Optimization

In deterministic structural optimization, the designer seeks to reduce construction costs without taking into account the effects of material uncertainty, geometry, and load. In this case, the resulting optimal configurations can represent a lower level of reliability and then result in a higher failure rate. The balance between minimizing costs and maximizing reliability is a big challenge for the designer. The importance of reliability criteria in deterministic design optimization is to increase the

level of design reliability without significantly increasing its weight. Thus, when the concept of reliability is integrated into the optimization of size and/or shape [13; 14], the model is called Reliability-Based Design Optimization (RBDO)<sup>11</sup>, which allows to design structures that meet the requirements of economy and security. However, when introducing reliability analysis to topology optimization, the non-quantitative nature is taken into account. This model is called Reliability-Based Topology Optimization (RBTO). The goal of the RBTO model is to address some of the uncertainties in geometry or design load by introducing reliability criteria into the optimization procedure. This integration takes into account the randomness of the applied loads and the description of the geometry. The RBTO task can be written as [11]:

$$\begin{aligned} \min : & \text{Comp} \\ \text{s.t.} : & \beta \geq \beta_t \\ \text{and} : & \frac{V}{V_0} \leq f_t, \end{aligned} \quad (3)$$

where  $\beta$  and  $\beta_t$  are the structural reliability index and the target reliability index, respectively (for more information about reliability methods, see<sup>12</sup> [15]). Considering that SIMP method is implemented, Equation (3) can be written as:

$$\begin{aligned} \min : C(\mathbf{x}) &= \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} = \sum_{e=1}^N (x_e)^p \mathbf{q}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{q}_e \\ \text{s.t.} : \beta(\mathbf{u}) &\geq \beta_t \\ : \mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \cdot \mathbf{q}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) &= \mathbf{F}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ : \frac{V(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})}{V_0} &= f(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ : \mathbf{0} < \mathbf{x}_{\min} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{1}. \end{aligned} \quad (4)$$

<sup>11</sup> Kharmanda G., El-Hami A. Reliability in Biomechanics. ISTE–Wiley; 2016. Available at: <https://www.wiley.com/en-tm/Reliability+in+Biomechanics-p-9781786300249> (accessed 01.05.2019). (In Eng.); Kharmanda G., Antypas I. Integration of Reliability and Optimization Concepts into Composite Yarns. In: 10th International Scientific-Practical Conference of Current Status and Prospects of Agricultural Engineering, "INTERAGROMASH-2017". Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre; 2017. p. 174-176. (In Eng.)

<sup>12</sup> Ibid.

The integration of reliability analysis into the topology optimization has been carried out by performing gradient-based method for static studies [3].

#### *Reliability index effect on resulting reliability-based topologies*

When considering deterministic topology optimization, we can modify the nature of the structure more profoundly. This way the geometry of the part is envisaged without any prior requirement as to the domains and/or the connections of the structural elements present in the solution. The topology optimization involves, in one way or another, the determination of the shape or transverse dimensions of the structure, so certain some authors also call it generalized shape optimization [16–19]. Reliability-Based Topology Optimization has the objective to introduce reliability analysis into topology optimization in order to generate several topologies relative to the values of the reliability index. In our study<sup>13</sup>, the relationship between the objective function (compliance) and the reliability index for the four studied structures<sup>14</sup>. As results, the complexity of the geometry and the multiple loading of the structures play a very important role relative to the reliability index variability, which enables the designer to choose the best solution out of the different topologies obtained by Reliability-Based Topology Optimization. However, there is no validation concern-

ing the importance of this changes. Therefore, we seek in this works to use the shape optimization to test several layouts.

### Results

#### *TOPOLOGY OPTIMIZATION RESULTS*

We consider an MBB (Messerschmitt-Bölkow-Blohm) [20; 21] beam subject to a distributed load as an example for this numerical demonstration (Fig. 1). Figure 1a shows a full design domain of the studied beam with all boundary conditions while Figure 1b illustrates the equivalent symmetry boundary conditions of a half beam.

The random input parameters are: the number of elements of meshing model, in directions  $x$  and  $y$  ( $nelx = 40$  and  $nely = 40$ ), the volume fraction ( $volfrac = 0,5$ ) and the distributed load ( $P = -1$ ).

In order to demonstrate the effect of reliability index, we generate several topologies considering different reliability levels. The code is developed using MATLAB and based on the previous codes developed by the first author [5–7]. The objective is to perform topology optimization to obtain the best distribution of the materials. The topology optimization problem is then to minimize the compliance of the structure, subject to the volume fraction (50 %). The behavior of the used material is linear-elastic-isotropic. Table 1 shows the different resulting topologies for DTO layout and RBTO configurations for  $\beta \in [1-6]$ .

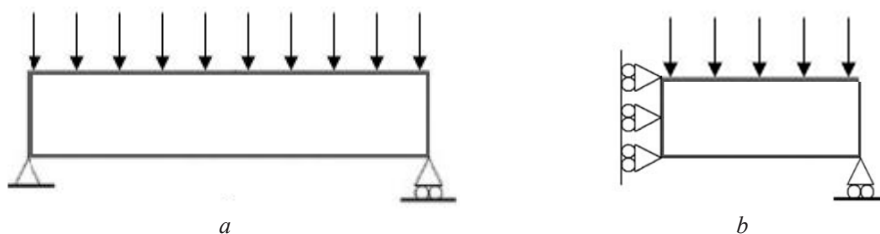


Fig. 1. Initial configuration and boundary conditions: a) full design domain; b) half of the design domain with symmetry boundary conditions















Р и с. 1. Начальная конфигурация и граничные условия: а) полная область проектирования; б) половина области проектирования с граничными условиями симметрии

<sup>13</sup> Kharmanda G., El-Hami A. Reliability-Based Topology Optimization Model. In: Biomechanics: Optimization, Uncertainties and Reliability. ISTE–Wiley; 2017. 5:121-152. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119379126.ch4>

<sup>14</sup> Bae K., Wang S. Reliability-Based Topology Optimization.

Table 1  
Таблица 1

Deterministic Topology Optimization (DTO) and Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) layouts  
Детерминированная оптимизация топологии (DTO) и схемы оптимизации топологии на основе надежности (RBTO)

Model	Half design domain	Full design domain
DTO		
RBTO $\beta = 1$		
RBTO $\beta = 2$		
RBTO $\beta = 3$		
RBTO $\beta = 4$		
RBTO $\beta = 5$		
RBTO $\beta = 6$		

Shape optimization results

In order to demonstrate the importance of the integration of reliability constraints into the deterministic topology optimization, we apply a shape optimization algorithm to the different resulting topologies. The integration of the reliability-based method leads to different topologies relative to the positions of the elements making up the structure.

The shape optimization problem is to minimize the structural volume subject to mechanical stress using ANSYS Software. An MBB beam is loaded by a vertical pressure  $P = 20 \text{ N/mm}^2$ . It is fixed at its up-

per extremities. The material in this beam is steel, which has a Young's modulus:  $E = 200 \text{ GPa}$  and a Poisson's ratio:  $\nu = 0.3$ . The allowable stress is  $\sigma_w = 970 \text{ Mpa}$ . The beam length and height are:  $L = 200 \text{ mm}$  and  $H = 100 \text{ mm}$ , respectively and the thickness is considered to be:  $20 \text{ mm}$ .

The resulting layouts are optimized considering three configurations. In figure 2a, the optimization variables are  $x$  and  $y$ . The first configuration corresponds to the DTO layout and RBTO layouts for  $\beta \in [1-3]$ . For the resulting topology, the structural volume of the optimal configuration, illustrated in figure 2b, is  $149000 \text{ mm}^3$ . figure 2b shows

the von-Mises stress distribution at the optimal configuration for the DTO layout and RBTO configurations when considering reliability indices:  $\beta \in [1-3]$ .

The second configuration corresponds to the RBTO result for  $\beta = 4$ . In figure 3a, the optimization variables are  $x$ ,  $x_1$  and  $y$ . For the resulting topology, the structural volume of the optimal configuration, illustrated in figure 3b, is 134100 mm<sup>3</sup>. Figure 3b shows the von-Mises stress distribution at the optimal configuration for the

RBTO configuration when considering reliability indices  $\beta = 4$ .

The third configuration corresponds to the RBTO results for  $\beta \in [5-6]$ . In figure 4a the optimization variable is  $x$ . For the resulting topology, the structural volume of the optimal configuration, illustrated in figure 4b, is 132130 mm<sup>3</sup>. figure 4b shows the von-Mises stress distribution at the optimal configuration for the RBTO configuration when considering reliability indices  $\beta \in [5-6]$ .

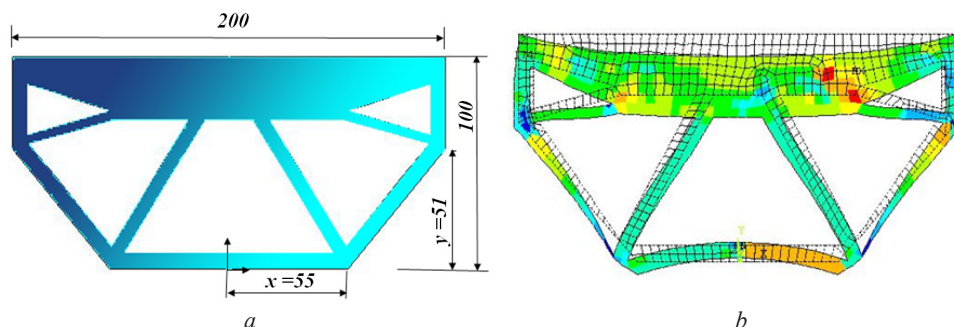


Fig. 2. Deterministic Topology Optimization (DTO) layout and Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) configuration when considering  $\beta = [1-3]$ : a) geometrical model; b) von-Mises stress distribution

Р и с. 2. Детерминированная топология оптимизации (DTO): расположение и основанная на надежности топология оптимизация (RBTO) конфигурация при рассмотрении  $\beta = [1-3]$ : а) геометрическая модель; б) распределение напряжений по Мизесу

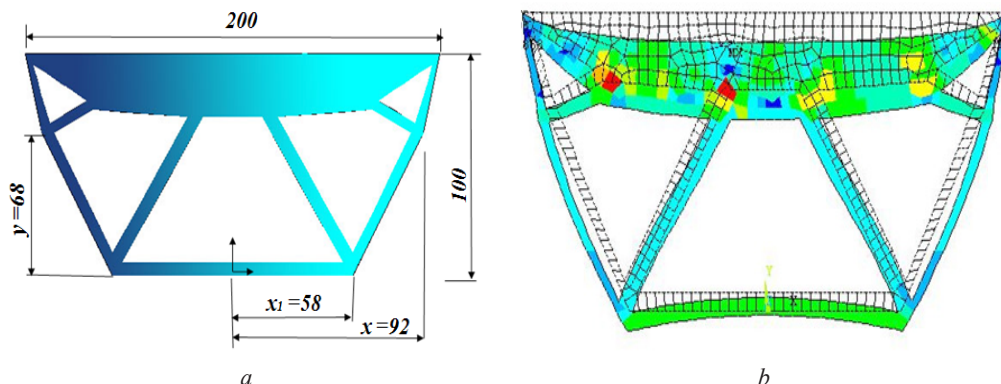


Fig. 3. Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) configuration when considering  $\beta = 4$ : a) geometrical model; b) von-Mises stress distribution

Р и с. 3. Конфигурация оптимизации топологии на основе надежности (RBTO) при рассмотрении  $\beta = 4$ : а) геометрическая модель; б) распределение напряжений по Мизесу.

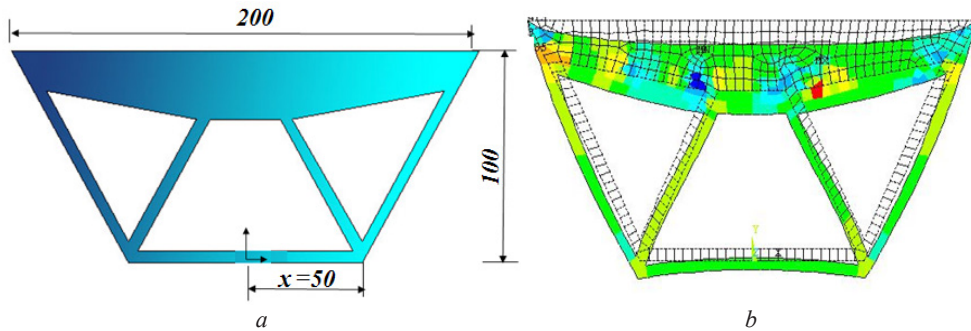


Fig. 4. Reliability-Based Topology Optimization (RBTO) configuration when considering  $\beta = [5-6]$ : a) geometrical model; b) von-Mises stress distribution

Р и с. 4. Конфигурация оптимизации топологии на основе надежности (RBTO) при рассмотрении  $\beta = [5-6]$ : а) геометрическая модель; б) распределение напряжений по Мизесу

### Discussion and Conclusion

The DTO algorithm leads to a single topology considering a given initial design space while the RBTO algorithm leads to several topologies relative to the reliability index values. Here, the reliability introduction on the topology optimization process leads to a significant change of layouts when the reliability index becomes more than 3.

To evaluate this effect, a shape optimization procedure is required. When the structural geometry evolves during the shape optimization process, the problem becomes more complex because the design variables are represented by coordinates of certain points in the geometry. The shape optimization loop contains three steps: 1) description of the geometry; 2) mesh and FEM evaluation of the model; 3) calculation of the gradients to minimize the ob-

jective function. As result, we note that for the same boundary conditions, the RBTO second configuration reduces the structural weight by 10 %. The RBTO third configuration reduces the structural weight by 11 % for the same conditions.

Thus, reliability-based topology optimization is able to generate multiple topologies, giving the designer a range of solutions by adding certain reliability constraints. The proposed RBTO model aims to consider randomness (variability) of the most important quantities of a structure such as the geometry and the applied loads. This model can provide designers with several topologies. Another advantage is the reduction of weight of structures for the same conditions. This weight reduction will manifest itself in deterministic design optimization as well as in reliability-based design optimization.

### REFERENCES

1. Bendsoe M.P., Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Optimal Design Using a Homogenization Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1988; 71(2):197-224. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
2. Kharmanda G., Olhoff N., Mohamed A., Lemaire M. Reliability-Based Topology Optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2004; 26(5):295-307. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0322-7>
3. Kharmanda G., Lambert S., Kourdi N., et al. Reliability-Based Topology Optimization for Different Engineering Applications. *International Journal of CAD/CAM*. 2007; 7(1):61-69. Available at: [http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1CDBZ\\_2007\\_v7n1\\_61](http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1CDBZ_2007_v7n1_61) (accessed 01.05.2019). (In Eng.)



4. Patel J., Choi S.K. Classification Approach for Reliability-Based Topology Optimization Using Probabilistic Neural Networks. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2012; 45(4):529-543. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0711-2>
5. Wang L., Liu D., Yang Y., et al. A Novel Method of Non-Probabilistic Reliability-Based Topology Optimization Corresponding to Continuum Structures with Unknown but Bounded Uncertainties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017; 326:573-595. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.08.023>
6. Eom Y.-S., Yoo K.-S., Park J.-Y., Han S.-Y. Reliability-Based Topology Optimization Using a Standard Response Surface Method for Three-Dimensional Structures. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2011; 43(2):287-295. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0569-8>
7. Jalalpour M., Tootkaboni M. An Efficient Approach to Reliability-Based Topology Optimization for Continua under Material Uncertainty. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2016; 53(4):759-772. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1360-7>
8. Kharmanda G. The Safest Point Method as an Efficient Tool for Reliability-Based Design Optimization Applied to Free Vibrated Composite Structures. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2017; 17(2):46-55. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>
9. Yaich A., Kharmanda G., El Hami A., Walh L., et al. Reliability-Based Design Optimization for Multiaxial Fatigue Damage Analysis Using Robust Hybrid Method. *Journal of Mechanics*. 2017; 34(5):551-566. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/jmech.2017.44>
10. Kharmanda G., Antypas I.R., Dyachenko A.G. Inverse Optimum Safety Factor Method for Reliability-Based Topology Optimization Applied to Free Vibrated Structures. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(1):8-19. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.008-019>
11. Bendsoe M.P. Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem. *Structural Optimization*. 1989; 1(4):193-202. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01650949>
12. Bendsoe M.P., Sigmund O. Material Interpolations in Topology Optimization. *Archive of Applied Mechanics*. 1999; 69(9-10):635-654. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s004190050248>
13. Kharmanda G., Antypas I. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2015; (2):22-31. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/integration-of-reliability-concept-into-soil-tillage-machine-design> (accessed 01.05.2019). (In Russ.)
14. Kharmanda G., Antypas I. Reliability-Based Design Optimization Strategy for Soil Tillage Equipment Considering Soil Parameter Uncertainty. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2016; 16(2):136-147. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.12737/19690>
15. Ibrahim M.-H., Kharmanda G., Charki A. Reliability-Based Design Optimization for Fatigue Damage Analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015; 76(5-8):1021-1030. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6325-2>
16. Rozvany G.I.N., Zhou M., Birker T. Generalized Shape Optimization without Homogenization. *Structural Optimization*. 1992; 4(3-4):250-252. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF01742754.pdf> (accessed 01.05.2019). (In Eng.)
17. Zhou M., Rozvany G.I.N. The COC Algorithm, Part II: Topological, Geometrical and Generalized Shape Optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1991; 89(1-3):309-336. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90046-9)
18. Rozvany G.I.N., Bendsee M.P., Kirsch U. Addendum "Layout Optimization of Structures". *Applied Mechanics Reviews*. 1995; 48(2):41-119. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3101884>
19. Duysinx P., Van Mieghroet L., Jacobs T., Fleury C. Generalized Shape Optimization Using X-FEM and Level Set Methods. *Solid Mechanics and its Applications*. 2006; 137:23-32. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/1-4020-4752-5\\_3](https://doi.org/10.1007/1-4020-4752-5_3)

20. Madsen S., Lange N.P., Giuliani L., et al. Topology Optimization for Simplified Structural Fire Safety. *Engineering Structures*. 2016; 124:333-343. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.018>
21. Rostami S.A.L., Ghoddosian A. Topology Optimization under Uncertainty by Using the New Collocation Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019; 63(1):278-287. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3311/PPci.13068>

*Received 18.01.2019; revised 14.02.2019; published online 30.09.2019*

*About authors:*

**Ghias Kharmanda**, Researcher of Mechanics Laboratory of Normandy, National Institute of Applied Sciences of Rouen (685 University Avenue, Saint-Étienne-du-Rouvray 76801, France), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: O-6690-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8344-9270>, [g.kharmanda@gmail.com](mailto:g.kharmanda@gmail.com)

**Imad R. Antypas**, Associate Professor of Chair of Design Principles of Machines, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: O-4789-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-9529>, [imad.antypas@mail.ru](mailto:imad.antypas@mail.ru)

**Alexey G. Dyachenko**, Associate Professor of Chair of Design Principles of Machines, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: O-4796-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-4193>, [dyachenko\\_aleshka@bk.ru](mailto:dyachenko_aleshka@bk.ru)

*Contribution of the authors:*

G. Kharmanda – scientific guidance, statement of the problem, definition of research methodology, collection and analysis of analytical and practical materials on the research topic, critical analysis and finalization of the solution, computer realization of the solution of the problem; I. R. Antypas – statement of the problem, definition of research methodology, collection and analysis of analytical and practical materials on the research topic; A. G. Dyachenko – analysis of scientific sources on the topic of research, critical analysis and revision of the text.

**Acknowledgements:** The research is done within the frame of the independent R&D. The authors would like to thank Engs. I. Al-Khatib and A. Abadi from University of Aleppo, for their valuable contribution in RBTO code which is elaborated by the first author.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Bendsoe M. P., Kikuchi N.** Generating Optimal Topologies in Optimal Design Using a Homogenization Method // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1988. Vol. 71, Issue 2. Pp. 197–224. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
2. Reliability-Based Topology Optimization / G. Kharmanda [et al.] // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2004. Vol. 26, Issue 5. Pp. 295–307. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0322-7>
3. Reliability-Based Topology Optimization for Different Engineering Applications / G. Kharmanda [et al.] // *International Journal of CAD/CAM*. 2007. Vol. 7, no. 1. Pp. 61–69. URL: [http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1CDBZ\\_2007\\_v7n1\\_61](http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1CDBZ_2007_v7n1_61) (дата обращения: 01.05.2019).
4. **Patel J., Choi S. K.** Classification Approach for Reliability-Based Topology Optimization Using Probabilistic Neural Networks // *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2012. Vol. 45, Issue 4. Pp. 529–543. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0711-2>
5. A Novel Method of Non-Probabilistic Reliability-Based Topology Optimization Corresponding to Continuum Structures with Unknown but Bounded Uncertainties / L. Wang [et al.] // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 326. Pp. 573–595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.08.023>

6. Reliability-Based Topology Optimization Using a Standard Response Surface Method for Three-Dimensional Structures / Y.-S. Eom [et al.] // Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. Vol. 43, Issue 2. Pp. 287–295. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0569-8>
7. **Jalalpour M., Tootkaboni M.** An Efficient Approach to Reliability-Based Topology Optimization for Continua under Material Uncertainty // Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization. 2016. Vol. 53, Issue 4. Pp. 759–772. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1360-7>
8. **Харманда Г.** Точечный метод как самый безопасный и эффективный инструмент для оптимизации на основе надежности // Вестник Донского государственного университета. 2017. Т. 17, № 2. С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>
9. Reliability-Based Design Optimization for Multiaxial Fatigue Damage Analysis Using Robust Hybrid Method / A. Yaich [et al.] // Journal of Mechanics. 2017. Vol. 34, Issue 5. Pp. 551–566. DOI: <https://doi.org/10.1017/jmech.2017.44>
10. **Kharmanda G., Antypas I. R., Dyachenko A. G.** Inverse Optimum Safety Factor Method for Reliability-Based Topology Optimization Applied to Free Vibrated Structures // Engineering Technologies and Systems. 2019. Vol. 29, no. 1. Pp. 8–19. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.008-019>
11. **Bendsoe M. P.** Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem // Structural Optimization. 1989. Vol. 1, Issue 4. Pp. 193–202. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01650949>
12. **Bendsoe M. P., Sigmund O.** Material Interpolations in Topology Optimization // Archive of Applied Mechanics. 1999. Vol. 69, Issue 9–10. Pp. 635–654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004190050248>
13. **Харманда Г., Антибас И.** Интеграция концепции надежности в проектирование почвообрабатывающих машин // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. № 2 (81). С. 22–31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/integration-of-reliability-concept-into-soil-tillage-machine-design> (дата обращения: 01.05.2019).
14. **Харманда М. Г., Антибас И. П.** Стратегия оптимизации проектирования надежности почвообрабатывающей техники с учетом параметрической неопределенности почвы // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. Т. 16, № 2. С. 136–147. DOI: <https://doi.org/10.12737/19690>
15. **Ibrahim M.-H., Kharmanda G., Charki A.** Reliability-Based Design Optimization for Fatigue Damage Analysis // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 76, Issue 5–8. Pp. 1021–1030. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6325-2>
16. **Rozvany G. I. N., Zhou M., Birker T.** Generalized Shape Optimization without Homogenization // Structural Optimization. 1992. Vol. 4, Issue 3–4. Pp. 250–252. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF01742754.pdf> (дата обращения: 01.05.2019).
17. **Zhou M., Rozvany G. I. N.** The COC Algorithm, Part II: Topological, Geometrical and Generalized Shape Optimization // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1991. Vol. 89, Issue 1–3. Pp. 309–336. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90046-9)
18. **Rozvany G. I. N., Bendsee M. P., Kirsch U.** Addendum “Layout Optimization of Structures” // Applied Mechanics Reviews. 1995. Vol. 48, Issue 2. Pp. 41–119. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3101884>
19. **Duysinx P., Van Miegroet L., Jacobs T., Fleury C.** Generalized Shape Optimization Using X-FEM and Level Set Methods // Solid Mechanics and its Applications. 2006. Vol. 137, Pp. 23–32. DOI: [https://doi.org/10.1007/1-4020-4752-5\\_3](https://doi.org/10.1007/1-4020-4752-5_3)
20. **Madsen S., Lange N. P., Giuliani L., et al.** Topology Optimization for Simplified Structural Fire Safety // Engineering Structures. 2016. Vol. 124. Pp. 333–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.018>
21. **Rostami S. A. L., Ghoddosian A.** Topology Optimization under Uncertainty by Using the New Collocation Method // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2019. Vol. 63, Issue 1. Pp. 278–287. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPci.13068>

*Поступила 18.01.2019; принята к публикации 14.02.2019; опубликована онлайн 30.09.2019*

*Об авторах:*

**Харманда Гиас**, исследователь лаборатории механики Нормандии, Национальный институт прикладных наук Руана (76801, Франция, г. Сент-Этьен-дю-Рувре, Авеню-дель-Университе, д. 685), доктор технических наук, ResearcherID: O-6690-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8344-9270>, [g.kharmanda@gmail.com](mailto:g.kharmanda@gmail.com)

**Антибас Имад Ризакалла**, доцент кафедры основ конструирования машин, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: O-4789-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-9529>, [imad.antypas@mail.ru](mailto:imad.antypas@mail.ru)

**Дьяченко Алексей Геннадьевич**, доцент кафедры основ конструирования машин, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: O-4796-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9934-4193>, [dyachenko\\_aleshka@bk.ru](mailto:dyachenko_aleshka@bk.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Г. Харманда – научное руководство, постановка задачи, определение методологии исследования, критический анализ и доработка решения, компьютерная реализация решения задачи; И. Р. Антибас – анализ теоретических и практических материалов по теме исследования; А. Г. Дьяченко – анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка текста.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках инициативной НИР. Авторы выражают признательность И. Аль-Хатибу и А. Абади, представителям Университета Алеппо, за их ценный вклад в изучение RBTO.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



## Автоматизация получения параметров детали для задач конструкторско-технологической параметризации

**А. В. Щёкин**

*ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)*

*schekin@inbox.ru*

*Введение.* Автоматизация получения конструкторских параметров обрабатываемой детали является одним из этапов интеграции конструкторских систем автоматизированного проектирования с системами технологической подготовки производства. Целью данной работы является получение параметров детали, значения которых могут использоваться в составе информационных связей, реализуемых с применением технологической параметризации.

*Материалы и методы.* Работа является развитием концепции сквозной конструкторско-технологической параметризации применительно к автоматизированному программированию станков с числовым программным управлением. В основе теоретических исследований лежат формальная теория представления и обработки данных, теория множеств, теория иерархических многоуровневых систем. Программная реализация выполнена в среде Visual Studio C++ с использованием интерфейсов прикладного программирования КОМПАС-3D и геометрического ядра СЗД. *Результаты исследования.* Разработан способ получения исходных параметров обрабатываемой детали при передаче информации из конструкторских систем автоматизированного проектирования в системы технологической подготовки производства. Приведена логическая структура данных в реляционной форме, которая позволяет исключить избыточность и обеспечить непротиворечивость представления параметров детали с учетом приоритетов источников данных, связанных с конструкторской 3D-моделью. Способ программного реализован в составе коммерческой системы автоматизированного программирования станков с числовым программным управлением для платформы КОМПАС-3D. Исходные параметры (метаданные, свойства материала, параметры аннотаций, параметрические переменные) извлекаются из 3D-модели с использованием прикладного программного интерфейса. Для получения свойств материала реализована интеграция со справочником материалов системы КОМПАС-3D.

*Обсуждение и заключение.* Автоматизация подготовки исходной информации о детали является первым этапом в реализации сквозной параметризации в задачах конструкторского и технологического проектирования. Благодаря конструкторско-технологической параметризации и ассоциативности траекторий обработки можно построить сквозное проектное решение, когда изменения, внесенные конструктором в деталь, будут автоматически передаваться в технологическую модель и далее через постпроцессор в управляющую программу для станка с числовым программным управлением. Сквозную параметризацию наиболее эффективно использовать для деталей, имеющих несколько размерных модификаций. Дальнейшее развитие конструкторско-технологической параметризации в составе интегрированной системы автоматизированного программирования станков с программным управлением планируется направить на решение задач автоматического подбора режущих инструментов и приспособлений на основе алгоритмов, реализуемых пользователями посредством параметрических информационных связей.

© Щёкин А. В., 2019



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

**Ключевые слова:** параметризация, система автоматизированного проектирования, КОМПАС-3D, управляющая программа, 3D-модель, интеграция, интерфейс прикладного программирования

**Для цитирования:** Щёкин А. В. Автоматизация получения параметров детали для задач конструкторско-технологической параметризации // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 345–365. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.345-365>

## Automation of Obtaining Parts Parameters for Tasks of Design-Technological Parametrization

**A.V. Shchekin**

*National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)*

*schekin@inbox.ru*

*Introduction.* Automation of obtaining design parameters of the part is the most important step in the integration of the design, process planning and manufacturing. The aim of this work is to obtain part parameters, the numerical values of which can be used in parametric calculations.

*Materials and Methods.* The work is the development of the concept of end-to-end design and technological parametrization in Computer-Aided Manufacturing. The theoretical research is based on the formal theory of data representation and processing, the set theory, and the theory of hierarchical multilevel systems. The software implementation was carried out in the Visual Studio C++ environment using KOMPAS-3D application program interface and the C3D geometric kernel application program interface.

*Results.* A method has been developed for obtaining the initial part parameters during the transfer of information from the design engineering Computer-Aided Manufacturing systems to the technological preparation of production. A logical data structure in a relational form was developed, which made it possible to eliminate redundancy and ensure the consistency of the presentation of part parameters, taking into account the priorities of the sources of design information. The software method is implemented as part of the commercial Computer-Aided Manufacturing system for the KOMPAS-3D platform. Source parameters (metadata, material properties, annotation parameters, parametric variables) are extracted from the 3D-model using application program interface. Integration with the KOMPAS-3D materials directory has been implemented to obtain material properties.

*Discussion and Conclusion.* The obtaining of initial information about the part is the first step in the implementation of the end-to-end design and technological parameterization in the field of Computer-Aided Manufacturing. Due to the design and technological parameterization and associativity of the toolpath, a through technological project can be built when changes made by the designer to the part will be automatically transferred to the technological model and to the control program for the CNC machine. End-to-end parameterization is most efficiently used for parametrized parts that have several dimensional modifications. Further development of the technological parameterization is expected to focus on the tasks of the automatic workpiece selection, cutting tools and devices.

**Keywords:** parametrization, Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing, KOMPAS-3D, control program, 3D-model, integration, Application Program Interface

**For citation:** Shchekin A.V. Automation of Obtaining Parts Parameters for Tasks of Design-Technological Parametrization. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):345-365. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.345-365>

## Введение

Конструкторско-технологическая параметризация является мощным инструментом повышения уровня автоматизации технологической подготовки производства. Устанавливая информационные связи между параметрами конструкторской модели и параметрами технологического процесса, инженеры-технологи могут самостоятельно автоматизировать типовые расчетные методики, сократить время разработки технологической документации, достичь повторного использования технологического проекта.

Конструкторско-технологическая параметризация обычно применяется в системах автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) для автоматизированного заполнения шаблонов технологической документации, являясь эффективным инструментом инженеров-технологов [1; 2]. Например, используя штатные параметрические возможности САПР ТП и готовый редактор переменных, современные исследователи запрограммировали простейшие алгоритмы для вычисления значений параметров в ячейках технологической документации [3–6].

В одной из предыдущих работ автором данной статьи впервые был предложен подход к организации подсистемы конструкторско-технологической параметризации для задач в области автоматизированного программирования станков с числовым программным управлением (ЧПУ) [7]. Начальным этапом работы подсистемы является этап подготовки исходной информации об обрабатываемой детали. Числовые значения исходных параметров детали в дальнейшем могут использоваться в параметрических расчетах, например, свойства материала – для расчета режимов резания, размеры и шероховатости поверхностей – для создания параметризованных траекторий, а параметры конструкторско-технологических эле-

ментов – для программирования постпроцессоров.

Автоматизация получения конструкторских параметров обрабатываемой детали является важнейшим этапом интеграции конструкторских систем автоматизированного проектирования (САПР) с системами технологической подготовки производства. Она позволяет свести к минимуму или полностью исключить повторный ввод информации и обеспечить сквозную передачу данных по цепочке «конструкторская 3D-модель» – «программирование обработки» – «изготовление на станке с ЧПУ» (CAD-CAM-CNC).

В контексте CAD/CAM-интеграции выделяют две задачи: распознавание конструкторско-технологических элементов (задача *feature recognition* [8–10]) и получение негеометрических параметров детали (задача *technical information processing* [11–13]). Задача *feature recognition* представляет собой отдельную сложную тему и выходит за рамки настоящей публикации. Целью данной работы является получение негеометрических (инженерных) параметров детали, числовые значения которых в дальнейшем могут использоваться в составе параметрических расчетов, а текстовые значения передаваться в управляющую программу.

## Обзор литературы

Как в САПР технологической подготовки производства, так и в системах автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ параметры обрабатываемой детали могут быть получены различными способами. Например, в работе Д. Е. Максимовского приведены пять групп методов преобразования конструкторской информации к табличному виду, пригодному «для использования в технологических САПР»:

- непосредственное кодирование таблиц с чертежа;
- использование конструкторской и технологической параметризации

при проектировании технологических процессов (ТП) на основе унификации (деталей аналогов, типизации и группирования);

- идентификация поверхностей (конструктивно-технологических элементов) на основе использования OLE- или API-функций;

- установление свойств поверхностей в активном режиме на основе диалога;

- использование универсальных методов группировки чертежных элементов (примитивов) в классы (поверхностями) при обработке геометрических форматов» [14].

Похожие группы методов преобразования конструкторской информации рассматриваются и в обзорной части диссертации С. Ю. Калякулина:

«1-я группа. Математические, связанные с распознаванием свойств поверхностей для 2D и 3D графических моделей;

2-я группа. Использование специальных языков описания деталей;

3-я группа. Диалоговые средства преобразования одномерных примитивов в свойства поверхностей;

4-я группа. Средства параметризации;

5-я группа. Обычное кодирование таблиц с помощью текстовых редакторов»<sup>1</sup>.

В работе Д. С. Шишигина сравниваются три способа интеграции научного программного обеспечения с системой AutoCAD: на основе обмена данными в формате DXF, COM-технология и программный интерфейс API ObjectARX (AutoCAD Runtime Extension) [15]. Перечисленные технологии также могут использоваться для получения исходных параметров обрабатываемой детали.

Как писал М. Месарович, один из основателей общей теории систем, «... классификацию не следует понимать

как строгое разделение; она лишь подчеркивает различия, но отнюдь не исключает возможности существования систем, принадлежащих одновременно к нескольким классам»<sup>2</sup>. Это утверждение справедливо и для методов решения задач в области САПР.

Поэтому все методы преобразования конструкторской информации логичнее разделить в зависимости от степени участия человека на ручные, автоматические и автоматизированные. К ручным методам можно отнести непосредственное кодирование таблиц параметров с чертежа или с 3D-модели. При этом могут использоваться диалоговые средства САПР и специальные идентификаторы, коды или языки описания деталей. При автоматическом способе весь процесс извлечения информации полностью скрыт от пользователя: могут применяться как математические методы распознавания поверхностей по исходной геометрии, так и лингвистический анализ входной информации, представленной на специальных языках. Для извлечения данных могут использоваться как обменные форматы, так и COM-технология и разного рода API. Однако, вследствие того что технологические задачи являются трудноформализуемыми и многокритериальными, современные методы автоматического решения подобного класса задач не обеспечивают безупречного результата. Поэтому в САПР предпочтительнее использовать автоматизированные способы, которые сочетают в себе автоматические методы с их ручным управлением или корректировкой результата. Для этого могут применяться интерактивные средства, с помощью которых пользователь может задавать настройки распознавания информации или вводить вручную часть исходных параметров.

<sup>1</sup> Калякулин С. Ю. Система автоматизированной конструкторско-технологической параметризации процессов изготовления деталей типа тел вращения: дис. ... канд. тех. наук. М., 2016. 185 с.

<sup>2</sup> Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.



В современных САПР ведущая роль принадлежит твердотельному моделированию. 3D-модель может содержать в себе не только геометрию изделия, но и метаданные, состав изделия, технические требования и аннотации. Для извлечения информации из 3D-модели достаточно выделить две группы методов:

- на основе анализа открытых форматов CAD-систем, в том числе общеизвестных обменных форматов STEP, IGES, DWG, DFX, STL, SAT, X\_T и т. д.;
- на основе прикладных интерфейсов API.

Использование файловых форматов является исторически первым способом передачи информации между компонентами PLM-среды. Наибольшее развитие получил протокол STEP, который изначально подразумевался как механизм обмена данными между разными этапами поддержки жизненного цикла изделия в рамках концепции CALS<sup>3</sup>. Нейтральные форматы экспорта/импорта наиболее активно используются технологическими САПР, работающими автономно от CAD-систем. Но у этого метода есть существенный недостаток – это потеря точности при передаче геометрической информации, если программа-приемник и программа-источник работают на разных математических ядрах. Эта проблема является особенно критичной для САМ-систем, математические задачи которых привязаны к геометрии 3D-модели. Но если даже рассматривать передачу только негеометрических параметров, то коммерческие САПР по причине своей

закрытости не позволяют и это делать в полной мере. Например, такие распространенные в России CAD-системы, как SolidWorks и КОМПАС-3D, не экспортируют в step-файл технологические параметры детали, хотя соответствующие спецификации в стандарте STEP давно предусмотрены<sup>4</sup>. Таким образом, использование обменных форматов влечет за собой потерю не только геометрической точности, но и большей части инженерных параметров.

Рассмотрим некоторые работы, связанные с анализом нейтральных форматов.

Например, в диссертации Э. В. Митина, выполняется ручной разбор файла ядра Parasolid в формате xmt\_txt с целью формирования общего описания детали, определения ориентации и положения поверхностей для задачи автоматического выбора технологических баз<sup>5</sup> [16; 17]. Но при этом не приведены ни алгоритм автоматического разбора формата xmt\_txt, ни его программная реализация. Результаты, полученные в этой работе, являются сомнительными для практического применения, поскольку не известны самостоятельные работы автора в части разработки интегрированного программного обеспечения в области САПР. Источником данной работы является диссертация Э. В. Элементова, в которой выполнен аналогичный разбор файла dxf с целью установления технологических свойств поверхностей детали<sup>6</sup>.

В диссертации А. В. Аверченкова предлагается способ автоматического

<sup>3</sup> Судов Е. В., Левин А. И. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России // НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика». М., 2002. URL: [http://cals.ru/sites/default/files/downloads/mdocs/concept\\_ipi.pdf](http://cals.ru/sites/default/files/downloads/mdocs/concept_ipi.pdf) (дата обращения: 23.04.2019).

<sup>4</sup> ISO 10303-224. Industrial Automation Systems and Integration. Product Data Representation and Exchange // Part 224: Application Protocol: Mechanical Product Definition for Process Planning Using Machining Features. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2006. URL: <https://www.iso.org/standard/36000.html> (дата обращения: 23.04.2019).

<sup>5</sup> Митин Э. В. Автоматизация выбора технологических баз корпусных деталей на основе трехмерных моделей: дис. ... канд. тех. наук. М., 2005. 192 с.

<sup>6</sup> Элементов М. В. Установление точности показателей пространственных технологических размерных связей при проектировании технологических процессов механической обработки: дис. ... канд. тех. наук. М., 2001. 192 с.

распознавания КТЭ на основе 3D-моделей и чертежей в формате IGES<sup>7</sup>. На основе данного метода разработан программный комплекс на языке JAVA2, позволяющий независимо от CAD-системы производить декомпозицию чертежа и 3D-модели на КТЭ с последующей передачей конструкторской информации в САПР ТП «ТехноПро». Предлагаемый метод подходит только для тел вращения, а распознавание конструкторских обозначений (аннотаций) возможно только по чертежам в формате IGES.

В работе иностранных коллег описывается система автоматического извлечения геометрической и негеометрической информации из чертежей, представленных в форматах DXF или IGES [12]. Для распознавания параметров размерных обозначений (линейных, диаметральных, радиальных и угловых), допусков и установления их связи с геометрическими объектами чертежа используются эвристические правила. Текстовые выноски интерпретируются методами обработки естественного языка с использованием конечных автоматов. Распознанная информация представлена в виде иерархии объектно-ориентированных классов.

Методы на основе API подразумевают доступ к внутренним возможностям базовой CAD-системы. Доступ к ним может быть реализован как на основе макросов (например, в КОМПАС-3D в качестве языка для написания макросов используется язык Python, в SolidWorks – Basic, в AutoCAD – AutoLisp), так и на основе компилируемых языков высокого уровня (Pascal, C++ и т. д.). Механизм доступа тоже может быть различным: например, на основе экспортных функций, COM, CORBA или .NET. Для интегрированных CAD/CAM-систем, построенных на базе единой CAD-платформы, использование API является наиболее функциональным

и производительным способом анализа конструкторской модели. Недостатками этого метода являются сложность программирования API и необходимость постоянного согласования версий API, используемых прикладной программой, с версиями базовой CAD-системы.

На практике различные методы обмена информацией переплетаются между собой. Могут использоваться одновременно как обменные форматы, так и API базовой САПР (и даже API геометрического ядра). Между этими двумя подходами нет четкой границы, и их следует рассматривать только как крайние случаи в практике разработки и интеграции САПР. Например, в одной из работ зарубежных исследователей представлено программное обеспечение, которое экспортирует исходную геометрическую модель (созданную в любой CAD-системе) из формата STEP AP203 в файл STEP AP224, добавляя к исходной геометрии технологическую информацию [13]. Для этого реализовано считывание входного файла в формате STEP AP203, извлечение геометрии и перевод ее в структуру данных геометрического ядра Parasolid и визуализация модели Parasolid на экране компьютера средствами OpenGL. Далее пользователь в диалоговом режиме задает свойства материала, геометрические и размерные допуски, шероховатости поверхностей и другие дополнительную информацию. Структура данных детали вместе с технологической информацией и распознанными конструкторско-технологическими элементами записывается в файл в формате AP224. Для импорта и экспорта файлов STEP и интерпретации информационной модели EXPRESS используется библиотека классов C++ ROSE, для преобразования структуры BRep в модель данных Parasolid – функции API ядра Parasolid. Однако данная схема интеграции не устраняет участия че-

<sup>7</sup> **Аверченков А. В.** Автоматизация распознавания и идентификации конструкторско-технологических элементов деталей в интегрированных САПР: дис. ... канд. тех. наук. Брянск, 2004. 260 с.

ловека в подготовке исходных данных и не избавляет от потери точности при передаче геометрии через нейтральный формат между системами, работающими на разных математических ядрах.

Анализ приведенных источников показывает, что в них используются различные модели данных для промежуточного представления параметров детали, но при этом не обращается внимание на то обстоятельство, что параметры могут быть получены из разных источников, связанных с конструкторской моделью, и потенциально могут дублировать друг друга, создавая избыточность и противоречивость исходной информации.

### **Материалы и методы**

В одной из предыдущих работ автором впервые был предложен подход для построения подсистемы конструкторско-технологической параметризации в контексте задач, решаемых пользователями в процессе моделирования обработки в САМ-системе [7]. В рамках данного подхода подсистема технологической параметризации рассматривается как иерархическая система, элементами которой являются параметры, структурно организованные на пяти уровнях подчиненности:

- параметры обрабатываемой детали;
- общие параметры плана обработки;
- параметры инструментальных переходов;
- параметры конструкторско-технологических элементов;
- параметры инструкций управляющей программы.

Такое разделение параметров соответствует реальной структуре технологического процесса и модульному принципу обработки поверхностей на станках с ЧПУ.

На самом верхнем уровне иерархии находятся конструкторские параметры детали, которые доступны для использования на всех нижних уров-

нях, в частности, для расчета режимов резания, программирования параметризованных траекторий, разработки постпроцессоров. Доступ к параметрам детали в составе математических выражений реализуется посредством синтаксической конструкции *MODEL.имя параметра*. В общем случае к исходным параметрам детали можно отнести метаданные 3D-модели (наименование, обозначение, масса детали и т. д.), свойства материала, параметры аннотаций 3D-модели, параметрические переменные 3D-модели.

Как правило, эти данные неструктурированы, а параметры детали могут дублировать друг друга. Например, твердость материала может присутствовать как в свойствах материала, так и в технических требованиях. В разных местах твердость может быть указана как в единицах HRC, так и HB. При этом конструктор или технолог могут дополнительно создать параметрические переменные, совпадающие с именами других параметров. Поэтому в первую очередь необходимо разработать непротиворечивую модель данных, которая должна описать логическую структуру параметров детали, обеспечить целостность и устранить избыточность информации.

В основе теоретических исследований лежат формальная теория представления и обработки данных, теория множеств, теория иерархических многоуровневых систем. Для графического отображения процессов передачи и обработки информации использовалась методология IDEF0. Программная реализация САМ-системы выполнена в среде Visual Studio C++ с использованием программных интерфейсов API КОМПАС-3D и API геометрического ядра С3D. Тестирование выполнялось в среде КОМПАС-3D V18.1.

### **Результаты исследования**

Для моделирования обработки в САМ-системе в качестве источника конструкторской информации рассма-

тривается 3D-модель детали. С этой точки зрения, используя теорию множеств, конструкторскую 3D-модель можно представить следующей формулой:

$$Model = \langle P_{Attr}, P_{Geom} \rangle, \quad (1)$$

где  $P_{Attr}$  – множество атрибутивных (негеометрических) параметров;  $P_{Geom}$  – множество геометрических параметров (к которым, в частности, относятся параметры конструкторско-технологических элементов).

Распознавание конструкторско-технологических элементов и извлечение их числовых параметров из 3D-модели в настоящей работе не рассматриваются (это тема отдельной публикации). Негеометрические параметры представим в виде кортежа четырех упорядоченных множеств:

$$P_{Attr} = \langle P_{Par}, P_{Meta}, P_{D\&T}, P_{Mtrl} \rangle, \quad (2)$$

где  $P_{Par}$  – множество параметрических переменных 3D-модели;  $P_{Meta}$  – множество метаданных 3D-модели;  $P_{D\&T}$  – множество параметров аннотаций (размеры, допуски, шероховатости поверхностей, обозначение D&T от англ. dimensions and tolerances);  $P_{Mtrl}$  – свойства материала (твердость, показатели обрабатываемости).

Все параметры должны иметь единое описание, допускающее их хранение как во внутреннем представлении

САМ-системы, так и при необходимости во внешней базе данных. Для структурирования параметров детали используется реляционная модель данных, графически представленная в таблице 1.

Для однозначной идентификации параметра применяется его уникальное имя. Параметр может принимать либо числовое, либо текстовое значение. Большинство параметров являются числовыми (они могут входить в состав математических формул). Но деталь может содержать и текстовые данные, например, наименование детали, обозначение материала, фамилию разработчика, которые необходимы для передачи в управляющую программу в качестве сопроводительной информации. Числовые и текстовые значения параметра размещены в разных полях таблицы. Тогда принимается следующая схема отношения:

$$P = R(Name, Value, Text, Type, Comment), \quad (3)$$

где *Name* – уникальное имя параметра, которое является одновременно и первичным ключом для идентификации строки таблицы; *Value* содержит значение параметра типа *double*; *Text* – строку с текстовым значением параметра; *Type* – тип параметра (*d* – число, *s* – строка); *Comment* – комментарий к параметру.

Таблица 1

Table 1

**Реляционная форма представления параметров детали**  
**Relational form of the representation of the detail parameters**

Имя (ключ) / Name (key)	Значение / Value	Текст / Text	Тип / Type	Комментарий / Comment
Наименование / Name	0	Фланец	s	Наименование детали / Name of part
Материал / Material	0	Сталь 20X	s	Материал / Material
Масса / Mass	5,73	–	d	Масса детали, кг / Mass of part, kg
Плотность / Density	7,83	–	d	Плотность материала, г/см <sup>3</sup> / Density of material, g/sm <sup>3</sup>

Некоторые параметры могут быть связаны с дополнительными структурами данных, например, размеры могут содержать допуск и предельные отклонения. Дополнительные структуры данных целесообразно хранить в отдельных отношениях, связывая их с таблицей параметров детали посредством внешних ключей.

Информация о детали извлекается из разных источников, связанных с 3D-моделью. Для исключения избыточности данных установлены следующие приоритеты (в порядке их уменьшения) для пяти источников информации: параметрические переменные 3D-модели, метаданные, аннотации, справочник материалов, технические требования. На рисунке 1 приведена последовательность считывания параметров детали в порядке уменьшения приоритета их источников. Для исключения дублирования информации параметр добавляется в список только в том случае, если в списке нет параметра с таким же именем. Любой параметр может быть вручную переопределен пользователем CAD/CAM-системы путем создания одноименной параметрической переменной 3D-модели, благодаря чему обеспечивается возможность ручного управления составом параметров.

Способ получения конструкторских параметров детали на основе API программно реализован в составе коммерческой САМ-системы для платформы КОМПАС-3D. С общим описанием функциональных возможностей модулей САМ-системы и примерами их использования можно ознакомиться по ссылкам в Интернете<sup>8</sup>, а также в рекламных публикациях [18–21]. САМ-система интегрирована в рабочую среду КОМПАС-3D по принципу одного окна с использованием эле-

ментов пользовательского интерфейса САД-системы (рис. 2). Ассоциативность траекторий обеспечивает автоматическую актуализацию управляющей программы для станка с ЧПУ при изменении размеров или положения опорных объектов обрабатываемой детали [22]. Интеграция на уровне интерфейса пользователя выполнена с помощью API КОМПАС-3D, на уровне геометрических расчетов посредством API математического ядра С3D [23].

Перед началом моделирования обработки технолог должен поставить на 3D-модель как минимум одну локальную систему координат (ЛСК), задающую ноль детали и направление осей станка. Далее порядок работы пользователя в рассматриваемой САМ-системе включает в себя следующие действия:

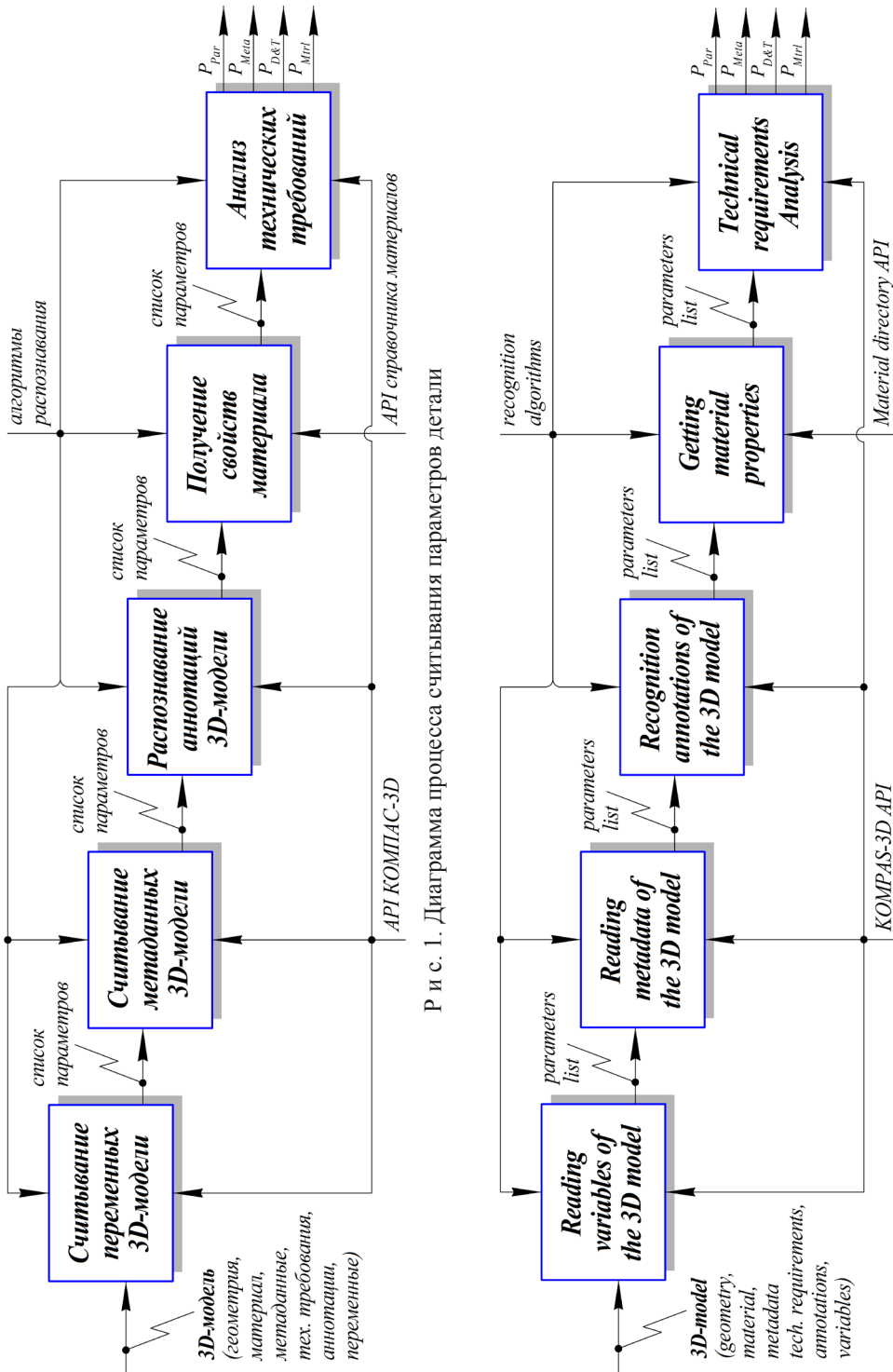
- выбор ЛСК и системы ЧПУ (постпроцессора), задание заготовки, формирование таблицы инструментов, выбор приспособлений;

- формирование последовательности инструментальных переходов (плана обработки). Для каждого перехода технолог должен задать область обработки, выбрать инструмент, настроить параметры траектории, назначить режимы резания. На данном этапе инициализируются параметры инструментальных переходов и параметры конструкторско-технологических элементов;

- постпроцессирование. На данном этапе в процессе создания управляющей программы инициализируются параметры пятого уровня иерархии переменных (параметры инструкций УП) и создается управляющая программа в кодах системы ЧПУ;

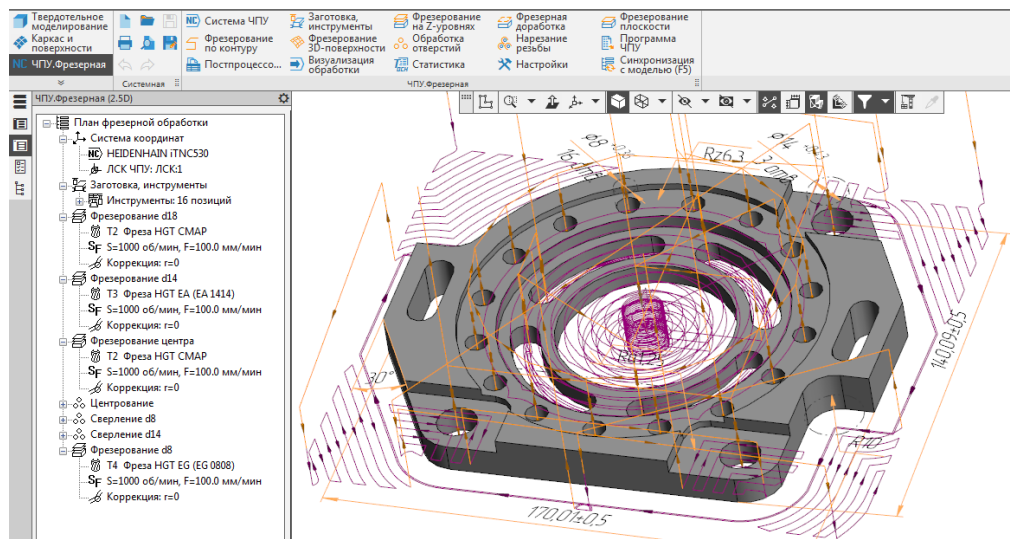
- визуализация обработки, в ходе которой технолог может проверить траекторию перемещения инструментов,

<sup>8</sup> Компас-3D: Модуль ЧПУ. Токарная обработка [Электронный ресурс]. URL: <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu>; Компас-3D: Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка [Электронный ресурс]. URL <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu-fo>; Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NI-FH8uyjNU> (дата обращения: 23.04.2019).



Р и с. 1. Диаграмма процесса считывания параметров детали

Fig. 1. Diagram of the process of reading part parameters



Р и с. 2. Моделирование фрезерной обработки в КОМПАС-3D

F i g. 2. Modeling milling in KOMPAS-3D

обнаружить столкновения инструментов с приспособлениями, врезания в заготовку на ускоренной подаче.

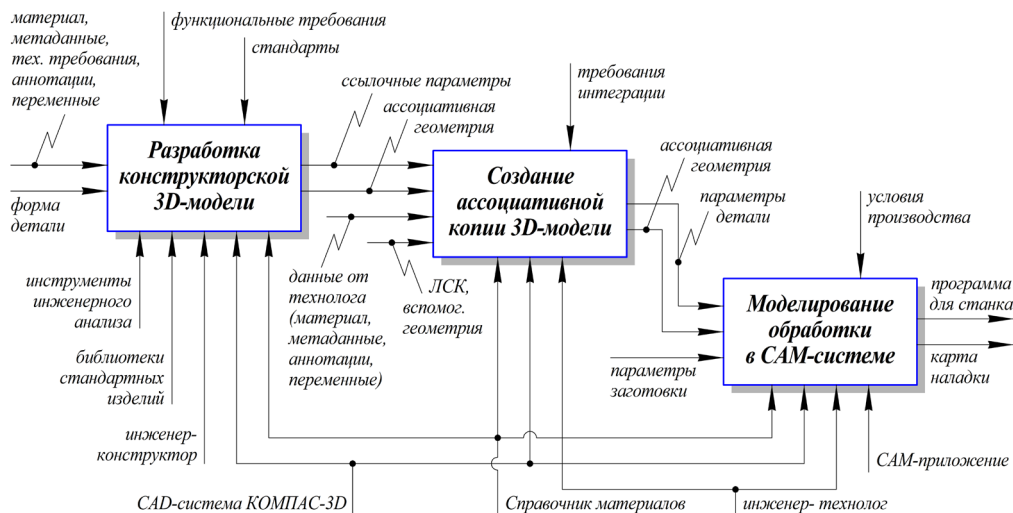
Результатом работы САМ-системы является управляющая программа, которая записывается технологом в отдельный текстовый файл и передается оператору станка с ЧПУ.

Обработка детали возможна с использованием нескольких планов обработки (например, на нескольких станках). Поэтому технологу рекомендуется работать не напрямую с моделью конструктора, а с ее ассоциативной копией (рис. 3). Причем для каждого плана обработки рекомендуется использовать отдельную копию конструкторской модели. В этом случае технолог, работая со своей моделью, не будет нагружать исходную конструкторскую модель вспомогательными построениями и затрагивать сферу деятельности конструктора.

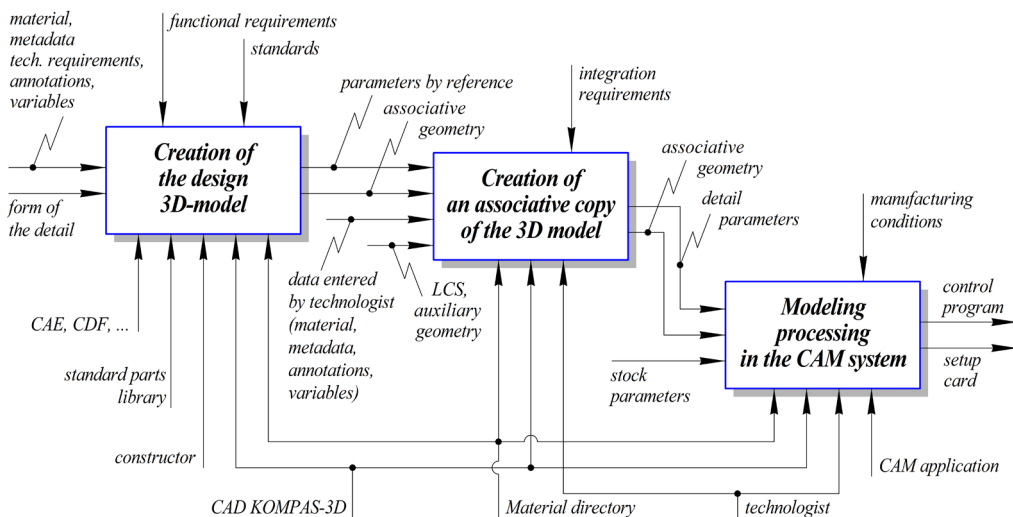
Способ взаимодействия технолога с конструктором через ассоциативную копию 3D-модели можно использовать при работе как в рамках единого информационного пространства промышленного предприятия, так и в рамках учеб-

но-научного виртуального предприятия (УНВП) в вузе [24].

Создание ассоциативной копии в КОМПАС-3D занимает у технолога минимум времени: для этого он должен открыть новый документ, вызвать команду КОМПАС-3D «Копировать объекты» и указать на исходной модели объекты для копирования. Технолог может использовать ассоциативную копию модели любым способом: упростить ее, создать дополнительные построения, добавить собственные аннотации и параметрические переменные. Если конструктор внесет изменения в свою модель, то перестроится и ассоциативная копия у технолога, а вместе с ней и траектории обработки для станка с ЧПУ. Через команду «Копировать объекты» в ассоциативную копию наследуется только геометрия детали. Для установления связи с переменными и аннотациями исходной модели технолог может создать внутри своей ассоциативной копии собственные параметрические переменные, содержащие ссылки на переменные и аннотации модели-источника.



Р и с. 3. Диаграмма процесса передачи параметров детали из конструкторской модели в САМ-систему



F i g. 3. Diagram of the process of transferring part parameters from the design model to the CAM system

Принципы функционирования подсистемы конструкторско-технологической параметризации, ее архитектура, UML-диаграмма иерархии классов, отображающих уровни параметров САМ-системы, подробно описаны в одной из наших работ [7]. В данной статье детализируется процесс считывания параметров обрабатываемой

3D-модели (начальный этап работы подсистемы).

Таблица параметров описывается классом `DETAIL_PARAMETERS` (рис. 4). Класс `DETAIL_PARAMETERS` является производным от абстрактного класса `PARAMETERS`, который содержит данные и методы, общие для всех уровней иерархии параметров



```

struct Parameter
{
    ~Parameter() { if( pRef ) delete pRef; }
    _bstr_t sName; // имя параметра
    double Value; // числовое значение параметра
    _bstr_t sText; // текстовое значение параметра
    char type; // тип параметра
    _bstr_t sNote; // комментарий к параметру
    RefParameters* pRef; // указатель на структуру дополнительных параметров
};

struct DETAIL_PARAMETERS : public PARAMETERS
{
    ~DETAIL_PARAMETERS();
    _bstr_t sMaterial;
    FILETIME timeCopy;
    TArray<Parameter*> MP; // динамический список параметров 3D-модели
    double* GetParameter( char* s );
    char* GetParameterS( char* s );
    bool ReadModelParameters( bool isSM );
    bool GetMaterial( IPart7Ptr& pPart7 );
};

```

Р и с. 4. Структуры данных для описания таблицы параметров

F i g. 4. Data structures for describing the parameters table

САМ-системы, в том числе средства для синтаксического анализа и вычисления математических формул. Класс `DETAIL_PARAMETERS` инкапсулирует динамический список `MP` указателей на экземпляры параметров.

Формулы, связывающие параметрические переменные, могут содержать алгебраические и тригонометрические функции, логические операции и скобки. В результате лексического анализа распознаются последовательности символов (лексемы), которые потенциально могут являться именами параметров. Для получения числового значения

параметра используется виртуальная функция `GetParameter` базового класса, которая переопределяется в производных классах. Метод `DETAIL_PARAMETERS::GetParameter` (рис. 5) принимает на вход лексему и возвращает адрес соответствующей переменной типа `double`. Использование указателей на переменные обеспечивает получение актуальных значений параметров. Нулевое значение адреса означает, что параметр по входному имени не обнаружен. Аналогично работает и метод `DETAIL_PARAMETERS::GetParameterStr`, возвращая адрес первого символа стро-

```

double* DETAIL_PARAMETERS::GetParameter( char* s )
{
    if( ::strstr( s, "MODEL." ) )
    {
        for( int i=0; i<MP.Count(); i++ )
            if( MP[i]->type == 'd' )
                if( !strcmp( s+6, (char*)(MP[i]->sName) ) ) return &MP[i]->Value;
                else if( MP[i]->pRef )
                    { if( double* p = MP[i]->pRef->GetParameter( s+6 ) ) return p; }
    }
    return NULL;
}

```

Р и с. 5. Функция получения числового значения параметра

F i g. 5. Function for getting the numeric value of a parameter

ки, если параметр содержит текстовое значение.

Метод ReadModelParameters() класса DETAIL\_PARAMETERS реализует считывание параметров из 3D-модели в порядке их приоритета от наибольшего к наименьшему (рис. 1). Считывание параметров выполняется в момент синхронизации внутренних данных САМ-системы с 3D-моделью.

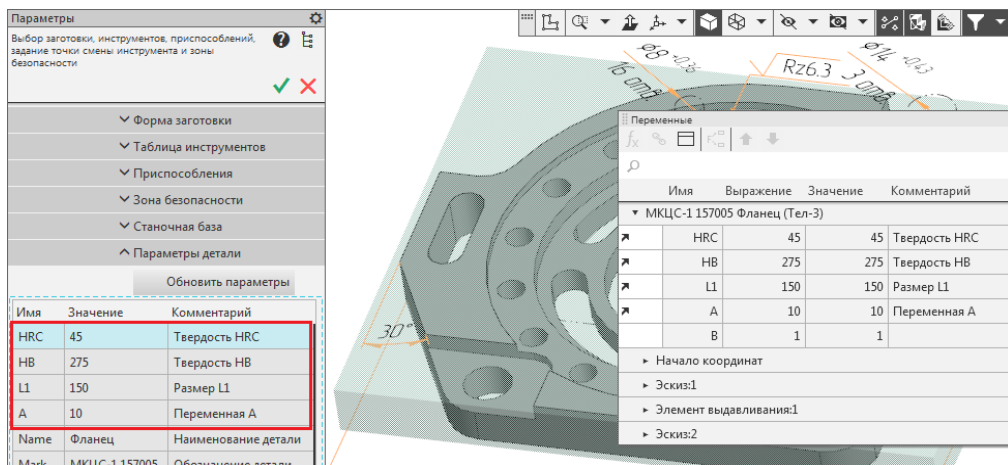
Сначала посредством API КОМПАС-3D извлекаются параметрические переменные. Чтобы переменные были доступны для САМ-системы, они должны быть предварительно объявлены со статусом «внешние». Переменные 3D-модели могут быть как геометрическими, то есть ассоциативно связанными с какими-либо объектами 3D-модели (например, с аннотациями или размерами эскиза), так и негеометрическими (например, свойства материала). Твердость материала (HВ или HRC), предел прочности и иные параметры могут быть заданы конструктором или технологом как параметрические переменные детали, тогда они будут иметь приоритет над свойствами материала, хранящимися в справочнике материалов. Параметры выводятся на панель параметров САМ-системы, чтобы пользователь мог ви-

деть, какие параметры детали можно применить в параметрических расчетах (рис. 6).

Далее с помощью API КОМПАС-3D считываются метаданные и аннотации 3D-модели (рис. 7). Метаданные извлекаются из свойств 3D-документа, параметры аннотаций – из обозначений размеров и шероховатостей. При получении параметра шероховатости распознается ее условное обозначение *Ra* или *Rz*. Размеры распознаются вместе с их предельными отклонениями и допусками. Аннотации, значения которых планируется использовать в параметрических расчетах, должны быть предварительно проставлены на 3D-модели.

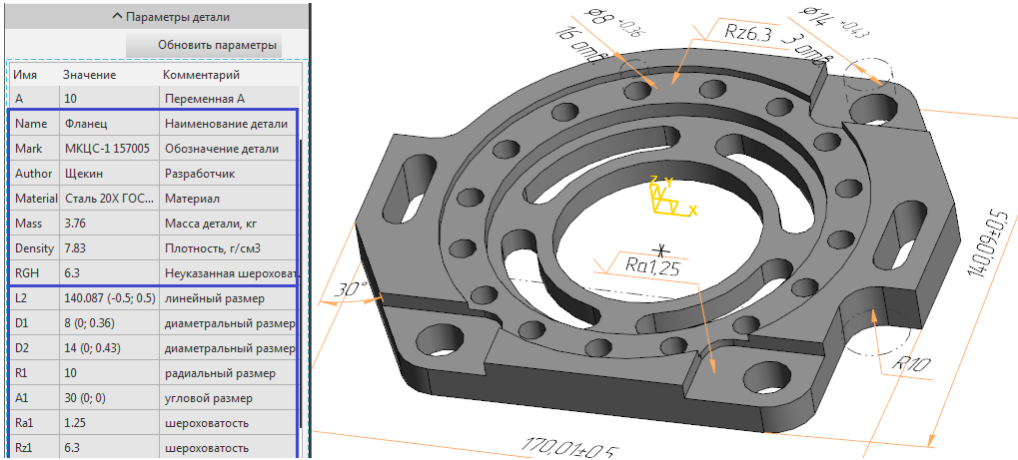
Для автоматического получения свойств материала реализована интеграция САМ-приложения с библиотекой «Материалы и Сортаменты» системы КОМПАС-3D. Из справочника автоматически извлекаются предел прочности  $\sigma_s$ , МПа (*SigmaV*), коэффициенты обрабатываемости *KVMet* и *Xmat* (рис. 8), твердость (HRC или HВ).

Материал должен быть предварительно назначен конструктором детали или технологом. При обращении к справочнику происходит его загрузка в память, и это занимает некоторое

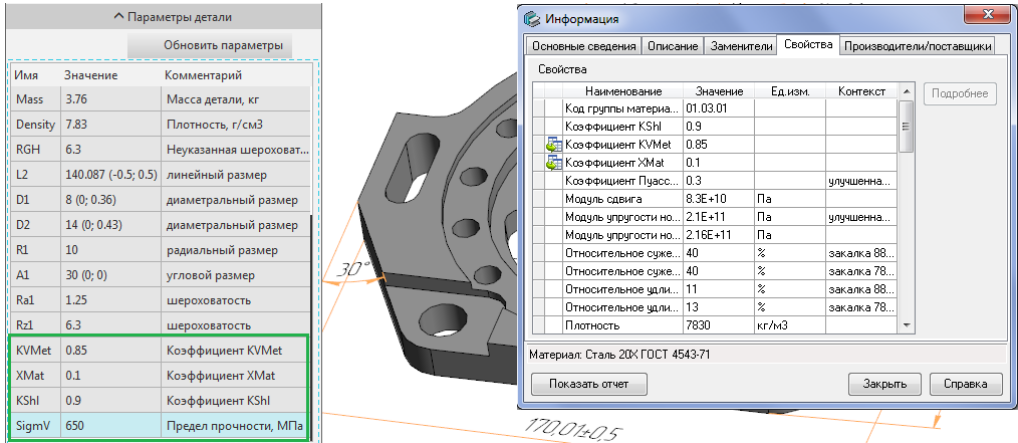


Р и с. 6. Извлечение внешних параметрических переменных 3D-модели

F i g. 6. Extraction of external parametric variables of the 3D model



Р и с. 7. Извлечение метаданных и параметров аннотаций 3D-модели  
 F i g. 7. Extracting metadata and annotation parameters of a 3D model



Р и с. 8. Извлечение свойств материала из справочника материалов  
 F i g. 8. Extraction of material properties from the directory of materials

время. Поэтому процесс считывания свойств материала из справочника запускается только в том случае, если изменился материал с момента последней записи 3D-модели на диск компьютера. Обозначение материала и время сохранения файла 3D-модели запоминаются в переменных sMaterial и time класса DETAIL\_PARAMETERS (рис. 4).

Твердости материала соответствуют два параметра (HRC и HB). При считывании одного из них второй параметр рассчитывается автоматически

по таблице соответствия между единицами измерения HRC и HB, и в список параметров добавляются сразу оба параметра. Наличие двух параметров для твердости представляет собой пример контролируемой избыточности. Их одновременное присутствие в списке параметров объясняется тем, что разные методики расчета режимов резания используют либо HRC, либо HB (для быстрорежущих инструментальных сталей обычно используется HB, для обработки закаленных сталей – HRC, в каталогах

современных твердосплавных инструментов обычно приводятся формулы, в состав которых входит HRC).

Справочник материалов может содержать свойства материала для нескольких контекстов, связанных с состоянием поставки или термообработки, что может являться причиной семантической несогласованности параметров материала. В данной программной реализации выбирается контекст, соответствующий минимальной твердости материала.

Имена параметрам (кроме переменных 3D-модели) назначаются автоматически. Линейным размерам имена присваиваются в формате  $Li$ , где  $i$  – порядковый номер линейного размера. Доступ к предельным отклонениям размеров и их допускам пользователь может получить посредством символов  $h$  (верхнее отклонение),  $l$  (нижнее отклонение) и  $t$  (допуск). Например, синтаксическая конструкция  $MODEL.L1.h$  возвращает верхнее отклонение размера  $L1$ , а формула  $MODEL.L1+MODEL.L1.h$  вычисляет его максимальное значение.

Для параметрических переменных 3D-модели имена и комментарии берут-

ся такими, какими они были назначены пользователем. В случае совпадения имен параметров приоритет отдается параметрическим переменным 3D-модели. Создав одноименную переменную 3D-модели, пользователь может переопределить значение любого параметра. Допустим, параметр  $HRC$ , извлеченный из справочника материала, не согласуется с его реальным значением во время механической обработки, тогда пользователь может объявить внешнюю параметрическую переменную с таким же именем, и значение параметра  $MODEL.HRC$  будет определяться параметрической переменной 3D-модели.

Последними считаются технические требования. В данном варианте программной реализации из технических требований извлекается только твердость материала, если она не была получена из других источников.

Ниже на рисунках 9 и 10 показан пример автоматической настройки зажимного размера станочного приспособления. В системе КОМПАС-3D создается деталь в виде параллелепипеда (рис. 10). Ширины детали ставится в соответствие параметрическая переменная  $W$ . Для закрепления детали

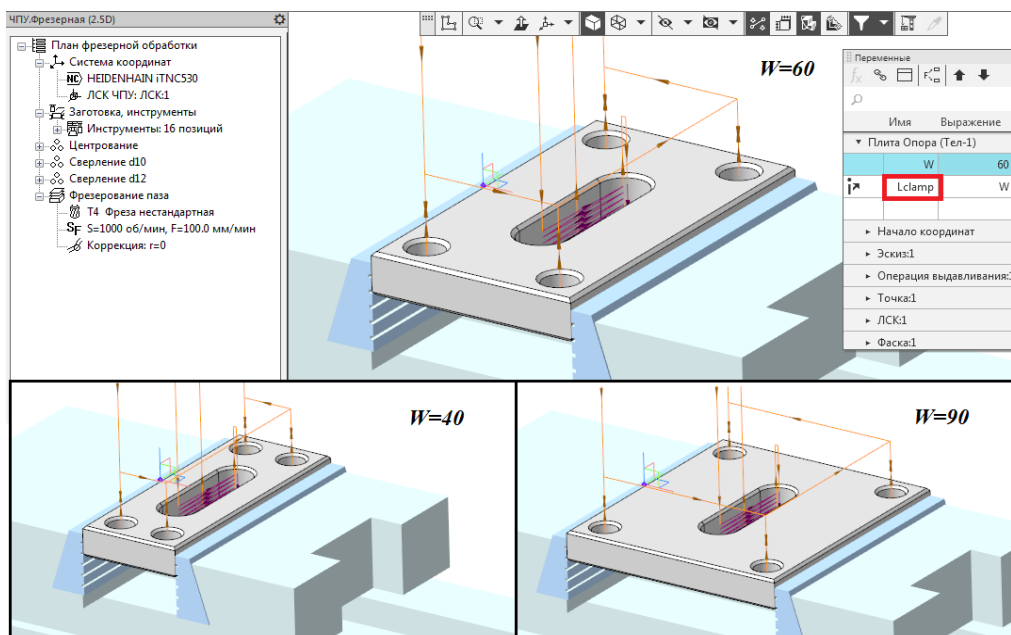
Имя	Выраж..	Значе..	Комментарий
▼ Деталь (Тел-1)			
A	70	70	Размер между губками { MODEL.Lclamp }
Amax	200	200	размер для справок*
W	150	150	размер для справок*
B	50	50	размер для справок*
C	50	50	размер для справок*

Комментарий	Amax	W	B	C	D	G	m	F
3.01.00000	100	100	30	35	270	75	7.3	10
3.02.10000	150	125	40	40	345	95	12.9	12
3.03.20000	200	150	50	50	420	125	25.5	13

Р и с. 9. Параметризованная 3D-модель станочных тисков

F i g. 9. Parameterized 3D-model of the machine vice



Р и с. 10. Автоматическая настройка зажимного размера тисков  
 F i g. 10. Automatic adjustment of clamping device size

используются тиски фирмы GERARDI (рис. 9). Стандартные размеры тисков по каталогу GERARDI хранятся в таблице переменных 3D-модели, а зажимному размеру поставлен в соответствие параметр детали *MODEL.Lclamp*.

Приспособления в рассматриваемой САМ-системе представляют собой параметризованные 3D-модели, которые можно выбрать из каталога, поставляемого в дистрибутиве САМ-системы. Пользователь может создать также собственные модели приспособлений и подключить их к САМ-приложению. Взаимодействие между САМ-системой и 3D-моделью приспособления реализовано посредством API КОМПАС-3D. Пользователь может управлять конфигурацией приспособления, выбирая строку стандартных размеров или задавая вручную размеры, непосредственно из САМ-системы. При подключении модели приспособления к САМ-системе, текст в комментариях к переменным модели, заключен-

ный в фигурные скобки, распознается САМ-системой как параметрическая формула. В данном случае при наличии в составе параметров детали переменной с именем *Lclamp* на место значения расстояния между губками тисков будет подставляться значение переменной *Lclamp*.

В модели обрабатываемой детали создается параметрическая переменная *Lclamp*, которая приравнивается переменной *W*. Таким способом устанавливается информационная связь между шириной детали *W* и зажимным размером тисков. При изменении значения переменной *W* модель детали перестраивается, изменяя свою ширину, при этом автоматически подгоняется размер между губками тисков. На рисунке 10 показаны деталь и тиски при  $W=60$ ; 40 и 90 мм.

Автоматизация настройки зажимного размера приспособления позволяет избавить технолога от лишних действий, связанных с ручным изменением

расстояния между губками тисков при каждом изменении ширины детали. Это особенно актуально, если деталь имеет несколько размерных модификаций.

### Обсуждение и заключение

В статье приведен метод получения исходных параметров обрабатываемой детали при передаче информации из конструкторской модели в интегрированную САМ-систему для задач конструкторско-технологической параметризации. Метод программного реализован в составе интегрированной САМ-системы для платформы КОМПАС-3D. Проблема передачи данных из 3D-модели в технологические расчеты решается с помощью программного интерфейса API.

Конструкторско-технологическая параметризация является эффективным инструментом для конструкторов и технологов, с помощью которого они могут реализовать относительно несложные алгоритмы, не являясь при этом специ-

алистами в области программирования. Благодаря конструкторско-технологической параметризации и ассоциативности траекторий обработки можно построить сквозной конструкторско-технологический проект, когда изменения, внесенные конструктором в деталь, будут автоматически передаваться в технологическую модель и далее через постпроцессор в управляющую программу для станка с ЧПУ. При этом максимальный эффект от применения сквозных технологий передачи данных достигается для параметризованных деталей, имеющих несколько размерных модификаций.

Дальнейшее развитие подсистемы конструкторско-технологической параметризации планируется направить на решение задач автоматического подбора заготовки, режущих инструментов и приспособлений на основе алгоритмов, реализуемых пользователями посредством параметрических информационных связей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Максимовский Д. Е.** Автоматизация проектирования технологических процессов на основе конструкторско-технологической параметризации // Вестник машиностроения. 2011. № 9. С. 63–66. URL: [https://www.mashin.ru/files/2011/ve0911\\_web.pdf](https://www.mashin.ru/files/2011/ve0911_web.pdf) (дата обращения: 23.04.2019).
2. **Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В.** Информационные модели связей как средство повышения автоматизации расчетов параметров технологического процесса // Вестник МГТУ «Станкин». 2015. № 2 (33). С. 89–92. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1243> (дата обращения: 23.04.2019).
3. **Kalyakulin S. Yu.** Algorithm for Calculating the Parameters of the Initial Blank in the SITEP MO Automated Design System // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, Issue 11. Pp. 713–715. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X14110082> (дата обращения: 23.04.2019).
4. Разработка математической модели детали на основе моделей графических систем / С. Ю. Калякулин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 67–76. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.067-076>
5. **Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В.** Автоматизация выбора мерительной оснастки на основе конструкторско-технологической параметризации в САПР ТП // Технология машиностроения. 2017. № 11. С. 46–49. URL: [http://www.ic-tm.ru/info/11\\_22](http://www.ic-tm.ru/info/11_22) (дата обращения: 23.04.2019).
6. **Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В.** Разработка математической модели параметров технологического процесса // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 3 (30). С. 40–44. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1032> (дата обращения: 23.04.2019).
7. **Щёкин А. В.** Конструкторско-технологическая параметризация в составе интегрированной САМ-системы // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 7. С. 34–54. DOI: <https://doi.org/10.17587/it.25.387-396>

8. **Babic B., Nestic N., Miljkovic Z.** A Review of Automated Feature Recognition with Rule-Based Pattern Recognition // Computers in Industry. 2008. Vol. 59, Issue 4. Pp. 321–337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.09.001>
9. **Mesbahi A. E., Jaider O., Rechia A.** Automatic Recognition of Isolated and Interacting Manufacturing Features in Milling Process // International Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4, Issue 10. Pp. 57–72. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/a7fe/c2705c5d76d2a396454a8e2cfe12993fd265.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
10. **Sanfilippo E. M., Borgo S.** What are Features? An Ontology-Based Review of the Literature // Computer-Aided Design. 2016. Vol. 80. Pp. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.07.001>
11. **Chlebus E., Krot K.** CAD 3D Models Decomposition in Manufacturing Processes // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. Vol. 16, Issue 1. Pp. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.008>
12. **Prabhu B. S., Biswas S., Pande S. S.** Intelligent System for Extraction of Product Data from CADD Models // Computers in Industry. 2001. Vol. 44, no. 1. Pp. 79–95. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/flc2/f08e1c94fb12e0373a9e9f08d4fefa06bd86.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
13. **Kang M., Han J., Moon J. G.** An Approach for Interlinking Design and Process Planning // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 139. Pp. 589–595. URL: <http://alvarestech.com/temp/nist2010/joao/CADCAPP1.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
14. **Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е.** Методы преобразования конструкторской информации машиностроительных деталей // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 2. С. 92–95. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/612> (дата обращения: 23.04.2019).
15. **Шишигин Д. С.** К выбору технологии интеграции прикладного программного обеспечения САПР // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 4 (47). С. 211–224. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.47.11>
16. **Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е.** Выбор технологических баз на основе решения прямой задачи размерного анализа // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 2. С. 64–69. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590> (дата обращения: 23.04.2019).
17. **Кузьмин В. В.** Выбор технологических баз при обработке корпусных деталей // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 2. С. 10–14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17287428> (дата обращения: 23.04.2019).
18. **Паньков М.** Токарная обработка как начало САМ-истории в АСКОН // САПР и графика. 2013. № 7. С. 37–43. URL: <https://sapr.ru/article/23925> (дата обращения: 23.04.2019).
19. **Щёкин А. В., Сульдин С. П., Митин Э. В.** Постпроцессор системы ЧПУ «МАЯК 600Т» для САМ-приложения «Модуль ЧПУ Токарная обработка» // Вестник Мордовского университета. 2014. № 1. С. 161–164. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles/38-14-12/208-10-15507-vmu-025-201502-67> (дата обращения: 23.04.2019).
20. Simulation of the Machining of a Bush in the KOMPAS-3D System / A. V. Shchekin [et al.] // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, no. 11. Pp. 987–990. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X17110156>
21. **Щёкин А. В., Сульдин С. П., Митин Э. В.** Особенности САМ-приложения «Модуль ЧПУ. Токарная обработка» // СТИН. 2017. № 8. С. 16–18. URL: <http://stinjournal.ru/soderzhanie-stin-2017/> (дата обращения: 23.04.2019).
22. **Щёкин А. В., Сульдин С. П.** Ассоциативность траекторий в САМ-приложении «Модуль ЧПУ. Токарная обработка» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 8. С. 570–575. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.16.570-575>
23. **Камнев А.** Интерфейс прикладного программирования геометрического ядра СЗД, его применение и главное отличие от API системы КОМПАС-3D // САПР и графика. 2016. № 5. С. 36–38. URL: <https://sapr.ru/article/25210> (дата обращения: 23.04.2019).
24. **Черепашков А. А.** Проектируем в среде учебного виртуального предприятия // САПР и графика. 2014. № 1. С. 76–78. URL: <https://sapr.ru/article/24352> (дата обращения: 23.04.2019).

*Поступила 18.03.2019; принята к публикации 18.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019*

Об авторе:

**Щёкин Александр Васильевич**, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Автоматизация программирования станков с ЧПУ» ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ResearcherID: F-4689-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5209-166X>, [schekin@inbox.ru](mailto:schekin@inbox.ru)

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Maksimovskiy D.E. Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Engineering Research. 2011; (9):63-66. Available at: [https://www.mashin.ru/files/2011/ve0911\\_web.pdf](https://www.mashin.ru/files/2011/ve0911_web.pdf) (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
2. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V. Information Models as a Tool to Improve the Automation of Calculations of Process Parameters. *Vestnik MGTU «Stankin»* = MSTU Stankin Bulletin. 2015; (2):89-92. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1243> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
3. Kalyakulin S.Yu. Algorithm for Calculating the Parameters of the Initial Blank in the Sitemo Automated Design System. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Engineering Research. 2014; 34(11):713-715. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X14110082> (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
4. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., et al. Developing a Mathematical Model of a Part Based on Graphics System Models. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technology and Systems. 2019; 29(1):67-76. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.067-076>
5. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V. Automation of the Selection of Measuring Equipment on the Basis of Design and Technological Parametrization in SAPR TP. *Tehnologiya mashinostroeniya* = Engineering Technology. 2017; (11):46-49. Available at: [http://www.ic-tm.ru/info/11\\_22](http://www.ic-tm.ru/info/11_22) (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
6. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V. Development of Mathematical Model of Process Parameters. *Vestnik MGTU «Stankin»* = MSTU Stankin Bulletin. 2014. (3):40-44. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1032> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
7. Schekin A.V. Design and Technological Parametrization as Part of an Integrated CAM System. *Informatsionnyye tekhnologii* = Information Technologies. 2019; 25(7):34-54. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17587/it.25.387-396>
8. Babic B., Nestic N., Miljkovic Z. A Review of Automated Feature Recognition with Rule-Based Pattern Recognition. *Computers in Industry*. 2008; 59(4):321-337. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.09.001>
9. Mesbahi A.E., Jaider O., Rechia A. Automatic Recognition of Isolated and Interacting Manufacturing Features in Milling Process. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2014; 4(10):57-72. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/a7fe/c2705c5d76d2a396454a8e2cfe12993fd265.pdf> (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
10. Sanfilippo E.M., Borgo S. What are Features? An Ontology-Based Review of the Literature. *Computer-Aided Design*. 2016; 80:9-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.07.001>
11. Chlebus E., Krot K. CAD 3D Models Decomposition in Manufacturing Processes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016; 16(1):20-29. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.008>
12. Prabhu B.S., Biswas S., Pande S.S. Intelligent System for Extraction of Product Data from CADD Models. *Computers in Industry*. 2001; 44(1):79-95. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/f1c2/f08e1c94fb12e0373a9e9f08d4fefa06bd86.pdf> (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
13. Kang M., Han J., Moon J.G. An Approach for Interlinking Design and Process Planning. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003; 139:589-595. Available at: <http://alvarestech.com/temp/nist2010/joao/CADCAPP1.pdf> (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
14. Kuzmin V.V., Maksimovskiy D.E. Methods of Transforming the Design Information of Engineering Components. *Vestnik MGTU «Stankin»* = MSTU «Stankin» Bulletin. 2012; (2):92-95. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/612> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)



15. Shishigin D.S. On Choosing the Technology of Application Software Integration with a CAD-system. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2016; (4):211-224. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.47.11>
16. 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. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
17. Kuzmin V.V. Selection of Technological Bases for Handling Details. *Vestnik MGTU «Stankin» = MSTU Stankin Bulletin*. 2008; (2):10-14. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17287428> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
18. Pankov M. Turning HIMSELF as the Beginning of the Story in Ascona. *SAPR i Grafika = CAD and Graphics*. 2013; (7):37-43. Available at: <https://sapr.ru/article/23925> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
19. Schekin A.V., Suldin S.P., Mitin E.V. Post-Processor of NC System «MAJaK 600T» for CAM-application. *Vestnik Mordovskogo Universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2014; (1):161-164. Available at: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles/38-14-12/208-10-15507-vmu-025-201502-67> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
20. Shchekin A.V., Suldin S.P., Mitin E.V. Simulation of the Machining of a Bush in the KOMPAS-3D System. *Russian Engineering Research*. 2017; 37(11):987-990. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X17110156>
21. Shchekin A.V., Suldin S.P., Mitin E.V. CNC Module for Turning: a New CAM-Application. *Machine Tool*. 2017; (8):16-18. Available at: <http://stinyournal.ru/soderzhanie-stin-2017/> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
22. Schekin A.V., Suldin S.P. Associativity of the Tool Paths in the CAM-Application CNC-Module. Lathe Operation. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Management*. 2015; 16(8):570-575. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.16.570-575>
23. Kamnev A. The Application Programming Interface of the Geometric Kernel C3D, Its Application and the Main Difference from the API of the Kompas-3D System. *SAPR i grafika = CAD and Graphics*. 2016; (5):36-38. Available at: <https://sapr.ru/article/25210> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
24. Cherepashkov A. Designed in the Academic Environment of a Virtual Enterprise. *SAPR i grafika = CAD and Graphics*. 2014; (1):76-78. Available at: <https://sapr.ru/article/24352> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)

*Received 18.03.2019; revised 18.04.2019; published online 30.09.2019*

*About author:*

**Alexander V. Shchekin**, Chief of the Automation of CNC Programming Research Laboratory, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: F-4689-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5209-166X>, [schekin@inbox.ru](mailto:schekin@inbox.ru).

*The author has read and approved the final manuscript.*

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.371:574

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201903.366-382



## Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве

И. А. Субботин\*, А. Ю. Брюханов, Е. В. Тимофеев,  
А. Ф. Эрк

Филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный  
центр ВИМ» (г. Санкт-Петербург, Россия)

\*[itmo1652@mail.ru](mailto:itmo1652@mail.ru)

*Введение.* В последнее время все чаще рассматривается вопрос о децентрализованном (автономном) энергообеспечении ряда нагрузок сельских территорий. Децентрализованное энергоснабжение возможно от различных генераторов энергии небольшой мощности с использованием местных и возобновляемых источников энергии. В этом случае у потребителя возникает задача выбора генерирующего источника.

*Материалы и методы.* Анализ потребителей энергии, режимы работы оборудования, графики нагрузок определены по результатам энергетических обследований, проводимых институтом с 2003 года по настоящее время. Комплексный показатель негативного воздействия производства тепло- и электроэнергии на окружающую среду определен методом логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова на основе экспертных оценок.

*Результаты исследования.* Энергоисточники могут быть как традиционными (дизель-генераторы и газопоршневые установки), так и возобновляемыми (ветроустановки, солнечные коллекторы, мини-ГЭС). При выборе источника энергии учитывается критерий отбора: экономия или экологичность. Экономический критерий – стоимость кВт·ч энергии. Экологический критерий – суммарный выброс загрязняющих веществ при получении энергии (г/кВт·ч) на различных источниках энергоснабжения. Причем учитывается не только количество выбросов, но и вредное воздействие на окружающую среду.

*Обсуждение и заключение.* При выборе источников энергоснабжения предлагается пользоваться коэффициентом энергоэкологичности, который представляет произведение стоимости кВт·ч полученной энергии на объем удельных выбросов загрязняющих веществ. Оптимальное значение этого коэффициента при выборе генерирующего источника – наименьшее. Коэффициент энергоэкологичности учитывает одновременно экономическую и экологическую целесообразность при выборе генерирующих источников энергии.

© Субботин И. А., Брюханов А. Ю., Тимофеев Е. В., Эрк А. Ф., 2019



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

**Ключевые слова:** энергообеспечение, автономное энергоснабжение, генерирующий источник, коэффициент энергоэкологичности

**Для цитирования:** Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве / И. А. Субботин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 366–382. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>

## Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources

I. A. Subbotin\*, A. Yu. Briukhanov, E. V. Timofeev, A. F. Erk

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM*

*(Saint Petersburg, Russia)*

*\*itmo1652@mail.ru*

**Introduction.** Recently the issue of decentralised (autonomous) power supply of certain rural consumers has been increasingly considered. Various small power generators using local and renewable energy sources can be applied for this purpose. So a consumer must choose the best-suited energy-generating source.

**Materials and Methods.** The findings of energy audits, which were conducted by the Institute from 2003 to the present day, were used to evaluate energy consumers and determine operation modes of equipment and load schedules. Complex index of the negative impact of heat and electricity generation on the environment was determined using the Spesivtsev – Drozdov method of logical-linguistic modelling based on expert assessments.

**Results.** Energy sources can be divided into traditional (diesel generators and gas generator plants) or renewable ones (wind turbines, solar collectors, mini hydro systems). Energy source is chosen either with the help of the economic criterion, being the cost of one k·Wh of energy or the criterion of environmental compatibility, or total specific emission of pollutants from energy generation at local generating sources (g/k·Wh). Here, not only the quantity of emissions, but also the harmful effect on the environment is considered.

**Discussion and Conclusion.** For the choice of energy supply sources, the coefficient of energy-ecological compatibility is proposed, being the product of the cost of one k·Wh of energy generated and specific emission of pollutants. The optimal value of this factor is the smallest, which accounts for both economic and environmental feasibility of energy generating sources.

**Keywords:** power supply, autonomous power supply, generating source, energy and environment index

**For citation:** Subbotin I.A., Briukhanov A.Yu., 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. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>

### Введение

Современные сельхозпредприятия имеют большое количество мелких объектов энергопотребления: фермы, скотные дворы, административные здания, объекты послеуборочной обработки продукции растениеводства, склады, хранилища и т. п. [1]. Они расположены на разном удалении от источников

энергообеспечения. Централизованное электроснабжение осуществляется от трансформаторов небольшой мощности по воздушным линиям электропередач большой протяженности. Потребление электроэнергии не равномерно в течение суток, качество электроэнергии низкое, присутствуют большие потери энергии в сельских сетях [2].

В последнее время все чаще рассматривается вопрос о децентрализованном (автономном) энергообеспечении ряда нагрузок сельских территорий. Децентрализованное энергоснабжение возможно от различных генераторов энергии небольшой мощности с использованием местных и возобновляемых источников энергии. В этом случае у потребителя возникает задача выбора генерирующего источника [3].

Традиционно выбор источников энергоснабжения осуществляется по простейшим экономическим показателям: стоимость строительства, стоимость генерации энергии, экономический эффект и срок окупаемости. В то же время разные источники генерации, особенно автономные, работающие на возобновляемых источниках энергии и местного топлива, по-разному влияют на окружающую среду с точки зрения экологии. Например, дизель-генераторная электростанция имеет относительно небольшую стоимость, но характеризуется значительными выбросами загрязняющих веществ. Солнечная электростанция, наоборот, не засоряет окружающую среду (не считая занятых площадей, на которых она расположена), имеет большую стоимость, и в ряде случаев срок окупаемости солнечных фотоэлектрических станций соизмерим с периодом их эксплуатации. Кроме того, важен учет влияния всех существенных загрязнителей, образующихся в процессе выработки энергии с учетом степени их воздействия на окружающую среду. Данный аспект до сих пор мало исследован.

Целью работы является определение единого критерия при выборе источника энергоснабжения, учитывающего экономический и экологический эффекты на основании анализа структуры энергообеспечения сельскохозяйственных предприятий, стоимости мощностей и себестоимости электроэнергии с учетом удельного выброса загрязняющих веществ при выработке энергии.

Для решения поставленной проблемы необходимо определить перечень существенных (по объемам образования и наличию негативного воздействия) веществ-загрязнителей характерных для выработки тепло- и электроэнергии и определить весовые коэффициенты для каждого вещества-загрязнителя, демонстрирующие степень их воздействия на окружающую среду.

### Обзор литературы

Анализу систем энергоснабжения сельскохозяйственного производства посвящены работы российских и зарубежных авторов: созданию демонстрационных зон системы энергоснабжения высокой эффективности [4], планированию нагрузки микросетей [5], закономерностям, тенденциям и факторам, влияющим на использование энергии в сельском хозяйстве [6]. Внимание ученых направлено на оптимизацию структуры энергоснабжения, управление энергией в сельской местности [7], рассматривается вопрос планирования связей между энергетическими ресурсами [8]. Вопросы децентрализованного энергообеспечения рассматриваются при выборе архитектуры энергоснабжения. Все больше исследовательского интереса уделяется технологиям «микросетей» и «умных сетей» [9]. В этих технологиях широко используют возобновляемые источники энергии: биоэнергетика [10–12], ветроэнергетика [13; 14], солнечная энергетика [15–17].

Выбор источника генерации энергии традиционно осуществляется по экономическому критерию. Так, когенерационные системы оцениваются по инвестиционным затратам и стоимости биомассы [18]. Выбор между традиционными и нетрадиционными системами энергоснабжения обычно производится по экономическим критериям [2; 19]. Одновременная оценка варианта энергоснабжения по экономическим и экологическим параметрам также привлекает внимание ученых [20]. Попытка в качестве оценки использо-

вать энергоэкологический коэффициент представлена в работах отечественных специалистов [21; 22]. Однако этот коэффициент проработан только для светокультуры. Использование солнечной энергии значительно сокращает загрязняющие выбросы [23]. Использование процессов пиролизного горения может потенциально минимизировать проблемы с выбросами [24]. Экономия энергии также значительно влияет на сокращение выбросов [25]. Оценка экономической и экологической устойчивости сельских территорий тесно связана с загрязняющими выбросами [26]. Таким образом, основным источником выбросов является выработка электроэнергии и использование транспортных средств [27].

### Материалы и методы

Анализ потребителей энергии, режимы работы оборудования и графики нагрузок определены по результатам энергетических обследований [20]. Для определения значимости влияния всех существенных загрязнителей, образующихся в процессе выработки энергии, был использован метод логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова на основе экспертных оценок<sup>1</sup>. Это было обусловлено невозможностью точной оценки негативного влияния рассматриваемых веществ на все компоненты окружающей среды в целом и зависимость данного воздействия от многих факторов, делающих невыполнимым определение негативного воздействия экспериментальными методами. Выбранный способ исследования основывается на теории планирования эксперимента, математическом аппарате нечеткой логики и регрессионном анализе [28]. В соответствии с методом в качестве исходных для модели-

рования были использованы данные, полученные методом анкетирования пяти экспертов. Метод включает в себя следующую последовательность действий:

1) определение целевого показателя: зависимой переменной, ее размерности, диапазона значений и связи размерных значений с лингвистическими оценками;

2) определение факторного пространства, в котором эксперт принимает решение по данному конкретному вопросу и от которого зависит целевой показатель;

3) создание матрицы продукционных правил и заполнение ее экспертами, обладающими соответствующими знаниями и опытом в исследуемой предметной области;

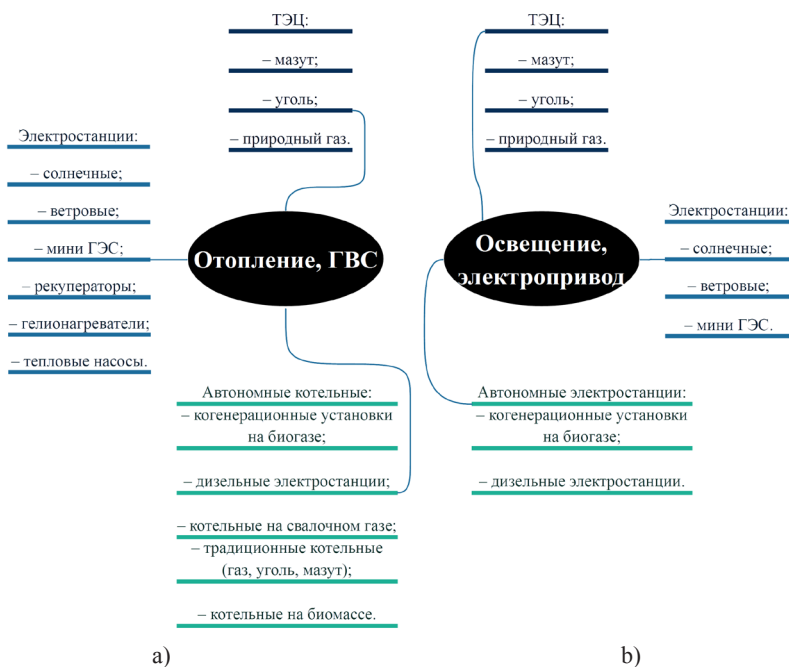
4) обработка экспертных оценок и построение целевой функции в аналитическом виде, отражающей зависимость целевого показателя от факторных переменных;

5) профессиональный анализ целевой функции с точек зрения математика и эксперта с целью извлечения новой информации об изучаемом явлении.

### Результаты исследования

Электроэнергия в сельхозпредприятиях расходуется на освещение, электропривод, отопление и горячее водоснабжение [20]. Отопление и горячее водоснабжение обеспечиваются также от котельных, работающих на угле, мазуте, природном газе, биотопливе. Возможно использование для получения тепловой энергии тепловых насосов, гелиоводонагревателей и гелиовоздухонагревателей, рекуператоров. Автономное электроснабжение возможно от солнечных электростанций, ветроустановок, гидроэлектростанций и дизельных электростанций.

<sup>1</sup> Субботин И. А., Брюханов А. Ю. Рекомендации по планированию природоохранных инвестиций в интенсивном животноводстве. СПб.: ФГБНУ ИАЭП, 2016. URL: [http://eco.szni.ru/IEEP\\_Guidelines\\_ERAB.pdf](http://eco.szni.ru/IEEP_Guidelines_ERAB.pdf) (дата обращения: 22.05.2019); Briukhanov A. Yu., Trifanov A. V., Spesivtsev A. V., Subbotin I. A. Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM. 2016, Pp. 164–166. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519716>



Р и с. 1. Схема структуры энергообеспечения:  
 а) для отопления и ГВС; б) для освещения, электроприводов, систем управления

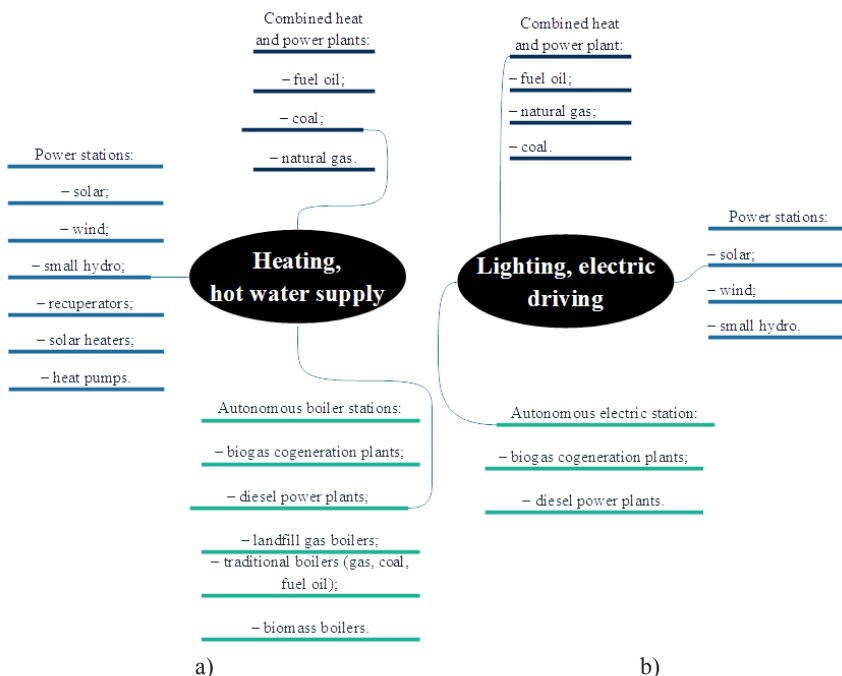


Fig. 1. Power supply structure diagram:  
 a) for heating and hot water supply; b) for lighting, electric drives and control systems

Генерирующие объекты могут быть как традиционным (дизель-генераторы, газо-поршневые энергоустановки), так и возобновляемыми источниками энергии (ветроустановки, солнечные станции, микро-ГЭС). Использование ВИЭ снижает расход основного топлива (экономический эффект) и положительно отражается на экологических показателях.

Как было отмечено выше, при выборе источника энергии учитываются экономический или экологический критерии отбора. Экономический критерий – стоимость кВт·ч энергии (табл. 1). Экологический критерий – совокупный выброс загрязняющих веществ при получении энергии (г/кВт·ч) на различных источниках энергоснабжения [1; 15] (табл. 2).

При выборе источников энергоснабжения предлагается использовать коэффициент энергоэкологичности, представляющий произведение стоимости кВт·ч полученной энергии на объем удельных выбросов загрязняющих веществ. Оптимальное значение этого ко-

эффициента при выборе генерирующего источника – наименьшее [1]:

$$K_{э} = (C_c \cdot K_a + C_r) \cdot \sum \{Z_b \cdot K_{вв}\} \cdot Q, \quad (1)$$

где  $C_c$  – общая стоимость строительства источника генерации энергии;  $K_a$  – коэффициент амортизации;  $C_r$  – стоимость генерации энергии;  $Z_b$  – количество загрязняющих веществ;  $K_{вв}$  – коэффициент вредного воздействия;  $Q$  – количество вырабатываемой энергии.

Например, при работе двух котельных на дровах и пеллетах (табл. 3) наименьший коэффициент энергоэкологичности – при генерации энергии от сжигания пеллет. Однако при этом стоимость кВт·ч выше, а удельные выбросы меньше. По коэффициенту экологичности предпочтительней использовать котельную на пеллетах.

Для объективной оценки важен учет влияния всех существенных загрязнителей, образующихся в процессе выработки энергии, с учетом значимости их влияния на окружающую среду. Значимость влияния определялась методом

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Ориентировочная стоимость мощностей и себестоимость электроэнергии**  
**Estimated cost of power and cost of electricity**

Источник генерации энергии / Energy-generating source	Инвестиции, тысяч рублей / кВт / Investments, thousand rubles / kW	Себестоимость, рублей / кВт·ч / Prime cost, rubles / kW·h
Котельная на угле / Coal boiler-plant	120	5,4
Котельная на газе / Gas boiler-plant	48	3,6
Малая гидроэнергетика / Small hydroelectric power plant	50	1,2–3,6
Котельная на биомассе / Biomass boiler-plant	13,6	4,6
Геотермальная станция / Geometrical power plant	150–300	3,9–18,5
Солнечная электростанция (Фотовольтаические) / Solar electric plant (Photovoltaic power station)	300	9–30,0
Ветровая электростанция / Wind-powered generating plant	82,2	2,2
Солнечная тепловая станция / Solar thermal station	93–135	9,8–12,6
Котельная на дровах / Firewood boiler-plant	32	2,7–4,9
Котельная на щепе / Chip boiler-plant	21	1,7–3,4
Котельная на пеллетах / Pellet boiler-plant	38	6,8–10

Т а б л и ц а 2

Т a b l e 2

**Удельный выброс загрязняющих веществ (ЗВ) при выработке электрической и тепловой энергии на местных генерирующих источниках энергии (г/ кВт·ч)**

**Specific emission of pollutants in the generation of electrical and thermal energy on local generating energy sources (g/kW·h)**

Источник генерации энергии / Energy-generating source	CO <sub>2</sub>	CO	Пыль / Dust	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	Всего ЗВ / Total pollutants
Дизельная котельная / Diesel boiler-plant	6,8	0,3–0,6	0,04	8,0–10,5	1,8–3,2	0,05	19,1
Котельная на угле / Coal boiler-plant	9–10	0,3–1,0	0,4–1,4	6,0–12,5	3,0–7,5	6,0–9,0	37,4
Котельная на мазуте / Fuel oil boiler-plant	5,4	0,1–0,5	0,2–0,7	4,2–7,5	2,4–3,0	2,5–5,4	20,2
Котельная на дровах / Firewood boiler-plant	2,3	0,2–0,8	0,3–0,8	–	0,07	–	2,9
Котельная на пеллетах / Pellet boiler-plant	1,9	0,1–0,6	0,2–0,6	–	0,5	–	3,2
Котельная на щепе / Chip boiler-plant	1,3	0,1–0,5	0,5–1,3	–	0,2–1,3	–	3,4
Котельная на биогазе / Biogas boiler-plant	3,2	–	–	–	2,0–2,7	0,06	5,6
Котельная на природном газе / Natural gas boiler-plant	1,29	–	0,05	0,02	1,9–2,4	–	3,6

Т а б л и ц а 3

Т a b l e 3

**Пример применения коэффициента энергоэкологичности**

**An example of the use of the energy-ecological coefficient**

Вид топлива / Type of fuel	Стоимость кВт·ч (руб.) / Cost of kW·h (RUB)	Удельные выбросы грамм / кВт·ч / Specific emissions grams / kW·h	Коэффициент энергоэкологичности / Coefficient of energy and ecological compatibility
Дрова / Firewood	5,1	12,9	65,8
Пеллеты / Pellets	7,6	5,8	44,1

логики-лингвистического моделирования.

В качестве целевого был выбран комплексный показатель негативного воздействия производства тепловой и электроэнергии на окружающую среду – безразмерная величина, отражающая суммарный уровень воздействия всех веществ-загрязнителей, образующихся при выработке тепловой и электроэнергии на окружающую среду. Данный показатель может быть представлен следующим образом:

$$U_{pk} = \sum_i (x_i \times ku_i), \quad (2)$$

где  $U_{pk}$  – комплексный экологический ущерб от загрязнения;  $x_i$  – масса  $i$ -го вещества-загрязнителя, характеризующая производство энергии;  $ku_i$  – удельный коэффициент ущерба от загрязнения 1 г вещества-загрязнителя;  $i$  – количество значимых веществ-загрязнителей.

Таким образом, для решения задачи определения комплексного негативного воздействия на окружающую среду необходимо определить перечень зна-



чимых веществ-загрязнителей, и определить удельный показатель ущерба от 1 г вещества-загрязнителя.

На основании анализа литературных источников<sup>2</sup> был сформирован перечень негативных факторов влияния на окружающую среду, включающий в себя пыль и 5 существенных по объему образования и влиянию на окружающую среду веществ:

- 1) сероводород ( $H_2S$ );
- 2) оксиды азота ( $NO_x$ );
- 3) диоксид серы ( $SO_2$ );
- 4) взвешенные вещества (пыль);
- 5) монооксид углерода ( $CO$ );
- 6) диоксид углерода ( $CO_2$ ).

Выражение (2) в данном случае принимает вид:

$$U_{pk} = ku_1x_1 + ku_2x_2 + ku_3x_3 + ku_4x_4 + ku_5x_5 + ku_6x_6 \quad (2)$$

Для выявления значений  $ku_i$  был использован метод логико-лингвисти-

ческого моделирования, состоящий из формирования матрицы сочетаний факторных переменных, заполнения матрицы экспертными данными и обработки данных методами регрессионного анализа<sup>3</sup> [10].

В соответствии с выбранным методом была сформирована матрица из 32 сочетаний граничных значений факторных переменных (табл. 4).

Граничные значения факторных переменных имеют следующий смысл: 0 – минимальный объем образования загрязняющего вещества; 1 – максимальный объем.

Для каждого из сочетаний факторных значений данной матрицы было получено экспертное значение, причем эксперт оценивал комплексный экологический ущерб от загрязнения по шкале от 0 до 1, где 0 – минимально возможный ущерб; 1 – максимально возможный ущерб. Результаты экспертного оценивания приведены в таблице 5 (значения  $Y_{эсп}$ ).

Таблица 4

Table 4

Матрица сочетаний факторных значений  
Matrix of combinations of factor values

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$Y$
1	0	0	0	0	0	0	–
2	1	0	0	0	0	1	–
3	0	1	0	0	0	1	–
4	1	1	0	0	0	0	–
5	0	0	1	0	0	1	–
–	–	–	–	–	–	–	–
30	1	0	1	1	1	0	–
31	0	1	1	1	1	0	–
32	1	1	1	1	1	1	–

<sup>2</sup> Там же; **Subbotin I., Vasilev E.** Formalization of Criteria for Determining Best Available Technologies: the Case of Russia // *Engineering For Rural Development*. 2016. Pp. 845–850.

<sup>3</sup> **Briukhanov A. Yu., Trifanov A. V., Spesivtsev A. V., Subbotin I. A.** Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges.

Т а б л и ц а 5  
T a b l e 5

**Экспертные (оценочные) и расчетные значения целевой функции**  
**Expert (estimated) and calculated values of the objective function**

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$Y_{\text{эсп}}$	$Y_{\text{расч}}$
0	0	0	0	0	0	0,00000	0,000000
1	0	0	0	0	1	0,90625	0,927371
0	1	0	0	0	1	0,90625	0,928835
1	1	0	0	0	0	0,00000	0,001528
0	0	1	0	0	1	0,93750	0,941062
1	0	1	0	0	0	0,00000	0,013755
0	1	1	0	0	0	0,00000	0,015220
1	1	1	0	0	1	0,93750	0,942591
0	0	0	1	0	1	0,93750	0,943801
1	0	0	1	0	0	0,00000	0,016494
0	1	0	1	0	0	0,00000	0,017958
1	1	0	1	0	1	0,93750	0,945329
0	0	1	1	0	0	0,00000	0,030185
1	0	1	1	0	1	0,93750	0,957556
0	1	1	1	0	1	0,93750	0,959021
1	1	1	1	0	0	0,03125	0,031714
0	0	0	0	1	1	0,93750	0,968286
1	0	0	0	1	0	0,03125	0,040979
0	1	0	0	1	0	0,03125	0,042444
1	1	0	0	1	1	0,96875	0,969815
0	0	1	0	1	0	0,03125	0,054671
1	0	1	0	1	1	0,96875	0,982042
0	1	1	0	1	1	0,96875	0,983506
1	1	1	0	1	0	0,03125	0,056199
0	0	0	1	1	0	0,03125	0,057409
1	0	0	1	1	1	0,96875	0,984780
0	1	0	1	1	1	0,96875	0,986245
1	1	0	1	1	0	0,03125	0,058938
0	0	1	1	1	1	0,96875	0,998472
1	0	1	1	1	0	0,06250	0,071165
0	1	1	1	1	0	0,06250	0,072629
1	1	1	1	1	1	1,00000	1,000000

По результатам регрессионного анализа была получена следующая формула:

$$Y=0,000031841x_1+0,001496529x_2+0,013723492x_3+0,016461823x_4+0,04094759x_5+0,927338725x_6. \quad (3)$$

Расчетные значения по полученной формуле приведены в таблице 5 (столбец  $Y_{\text{расч}}$ ).

Весовые коэффициенты каждой переменной отражают значимость фактора с точки зрения негативного воздействия на окружающую среду. Поскольку для целей исследования представляет интерес сравнительная оценка ущерба от загрязнителей при выработке теплоты и электроэнергии, для более удобного восприятия все весовые коэффициенты были умножены на 31406 (наименьший весовой коэффициент стал равен 1), при этом отношения между коэффициентами не изменились, поэтому их смысл, позволяющий оценить относительную значимость, остался прежним.

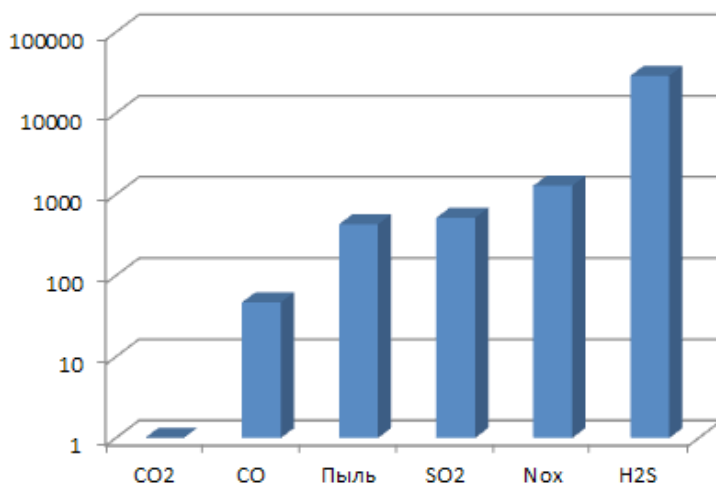
В результате было получено следующее полиномиальное выражение:

$$U_{pk} = x_1 + 47x_2 + 431x_3 + 517x_4 + 1286x_5 + 29124x_6. \quad (4)$$

Полученные значения  $ku_1$  позволяют оценить значимость негативного влияния веществ-загрязнителей на окружающую среду. Так, можно сделать вывод о том, что наибольшее негативное воздействие на окружающую среду оказывает сероводород ( $H_2S$ ), а наименьшее – диоксид углерода ( $CO_2$ ). Также, сравнивая между собой весовые коэффициенты, можно определить относительную значимость с точки зрения негативного воздействия на окружающую среду: например, весовой коэффициент оксидов азота в 9,17 раз больше коэффициента диоксида серы; это означает, что оксиды азота оказывают в 9,17 раз больше негативного влияния на окружающую среду, чем та же масса диоксида серы.

Полученные данные согласуются с данными о классе опасности и ПДК из действующих нормативных документов (табл. 6; рис. 2).

Определение коэффициентов значимости загрязнителей позволяет использовать уравнение (4) для достоверной экологической оценки выработки энергии в зависимости от структуры образующихся веществ-загрязнителей.



Р и с. 2. Сравнение коэффициентов значимости с точки зрения негативного воздействия на окружающую среду

Т а б л и ц а 6  
T a b l e 6

**ПДК (мг/м<sup>3</sup>), классы опасности и коэффициенты значимости  
для рассматриваемых факторов загрязнения**  
**Maximum permissible concentration (mg/m<sup>3</sup>), hazard classes and significance coefficients  
for the substances under consideration**

Нормативный документ / Regulatory document	CO <sub>2</sub>	CO	Пыль / Dust	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	H <sub>2</sub> S
ГН 2.2.5.2100-06 (ПДК в рабочей зоне) / GN 2.2.5.2100-06 (maximum permissible concentration in working area)	27000					
ГН 2.2.5.1313-03 (ПДК в рабочей зоне) / GN 2.2.5.1313-03 (maximum permissible concentration in working area)		20			5 (в пере- счете на NO / based on nitrogen monoxide)	10
ГОСТ 12.1.005-88 (ПДК в рабочей зоне) / (maximum permissible con- centration in working area)		20			5 (в пере- счете на NO / based on nitrogen monoxide)	10
ГН 2.1.6.1338-03 (ПДК в воздухе населенных пунктов) / GN 2.1.6.1338- 03 (maximum permissible concentration in the air of settlements)		5	0,5	0,5		0,008
Класс опасности / class of hazard	4	4	3	3	3	2
Полученные коэффициенты значимости / The obtained coefficients of significance	1	47	431	517	1286	29124

**Обсуждение и заключение**

Коэффициент энергоэкологичности может быть критерием при выборе источника в автономных системах энергоснабжения, который представляет производство стоимости кВт·ч полученной энергии на объем удельных выбросов загрязняющих веществ. Оптимальное значение этого коэффициента при выборе генерирующего источника – наименьшее. Коэффициент энергоэкологичности учитывает одновременно экономическую и экологическую целесообразность при выборе генерирующих источников энергии.

Определен перечень существенных (по объемам образования и наличию негативного воздействия) веществ-загрязнителей, характеризующих выработку тепло- и электроэнергии, включающий 6 веществ. Определены весовые коэффициенты для каждого вещества-загрязнителя, которые демонстрируют их степень воздействия на окружающую среду. Предложен способ сравнения и оценки различных видов топлива для выработки энергии с точки зрения комплексного воздействия образующихся веществ-загрязнителей на окружающую среду.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тимофеев Е. В., Эрк А. Ф., Судаченко В. Н., Размук В. А. Оптимизация схем энергообеспечения современных сельскохозяйственных предприятий // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 1 (94). С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10008>
2. Судаченко В. Н., Эрк А. Ф., Тимофеев Е. В. Выбор варианта энергоснабжения объектов сельхозпроизводства по экономическим критериям // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 92. С. 43–48. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-varianta-energospabzheniya-obektov-selhozproduktstva-po-ekonomicheskim-kriteriyam> (дата обращения: 22.05.2019).
3. Бровцин В. Н., Эрк А. Ф., Бычкова О. В. Анализ энергоэффективности сельскохозяйственных предприятий молочного направления // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 5. С. 22–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-energoeffektivnosti-predpriyatiy-molochnogo-napravleniya> (дата обращения: 22.05.2019)
4. Эрк А. Ф., Судаченко В. Н., Бутримова Е. И. Принципы создания демонстрационной зоны высокой энергоэффективности сельскохозяйственных предприятий в Ленинградской области // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 88. С. 46–53. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiipy-sozdaniya-demonstratsionnoy-zony-vysokoy-energoeffektivnosti-selskhozaystvennyh-predpriyatiy-v-leningradskoy-oblasti> (дата обращения: 22.05.2019).
5. Lu X., Zhou K., Zhang X. A Systematic Review of Supply and Demand Side Optimal Load Scheduling in a Smart Grid Environment // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 203. Pp. 757–768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.301>
6. Ghisellini P., Setti M., Ulgiati S. Energy and Land Use in Worldwide Agriculture: an Application of Life Cycle Energy and Cluster Analysis // Environment Development and Sustainability. 2016. Vol. 18, Issue 3. Pp. 799 – 837. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9678-2>
7. Naz M. N., Naeem N., Iqbal M., Imran M. Economically Efficient and Environment Friendly Energy Management in Rural Area // Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2017. Vol. 9, Issue 1. Pp. 800–833. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4973713>
8. Sustainable Planning of the Energy-Water-Food Nexus Using Decision Making Tools / N. Bieber [et al.] // Energy Policy. 2018. Vol. 113. Pp. 584–607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.037>
9. Zhonglin Ch., Guangchao G., Quanyuan J., Guerrero J. M. Energy Management of Chp-Based Microgrid with Thermal Storage for Reducing Wind Curtailment // Journal of Energy Engineering. 2018. Vol. 144, Issue 6. Pp. 700–723. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000583](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000583)
10. Ardebili S., Khademalrasoul A. An Analysis of Liquid-Biofuel Production Potential From Agricultural Residues and Animal Fat (Case Study: Khuzestan Province) // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 204. Pp. 819–831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.031>
11. Stich J., Ramachandran S., Hamacher T., Stimming U. Techno-Economic Estimation of the Power Generation Potential from Biomass Residues in Southeast Asia // Energy. 2017. Vol. 135. Pp. 930–942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.162>
12. Malladi K. T., Sowlati T. Biomass Logistics: A Review of Important Features, Optimization Modeling and the New Trends // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 94. Pp. 587–599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.052>
13. Xu J. Z., Assenova A., Erokhin V. Renewable Energy and Sustainable Development in a Resource-Abundant Country: Challenges of Wind Power Generation in Kazakhstan // Sustainability. 2018. Vol. 10, Issue 9. Article ID 3315. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093315>
14. Economic Evaluation of Renewable Energy Systems for the Optimal Planning and Design in Korea / Chung M. [et al.] // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2018. Vol. 6, Issue 4. Pp. 725–741. DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdwes.d6.0216>

15. **Иванов Г. А., Бобьль А. В., Ершенко Е. М., Теруков Е. И.** Особенности эксплуатации солнечной автономной гибридной энергоустановки в условиях Северо-Западного Федерального округа // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 10. С. 63–67. URL: <https://docplayer.ru/53559049-Osobennosti-ekspluatatsii-solnechnoy-avtonomnoy-gibridnoy-energoustanovki-v-usloviyah-severozapadnogo-federalnogo-okruga.html> (дата обращения: 22.05.2019).

16. Технико-экономические аспекты сетевой солнечной энергетики в России / А. В. Бобьль [и др.] // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 4. С. 85–92. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27207> (дата обращения: 22.05.2019).

17. Flexible Photovoltaic Modules Based on Amorphous Hydrogenated Silicon / G. Ablyayev [et al.] // Semiconductors. 2015. Vol. 49, Issue 5. Pp. 679–682. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063782615050024> (дата обращения: 22.05.2019).

18. **Pfeifer A., Dominkovic D., Cosic B., Ducic N.** Economic Feasibility of CHP Facilities Fueled by Biomass from Unused Agriculture Land: Case of Croatia // Energy Conversion And Management. 2016. Vol. 125. Pp. 222–229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.090>

19. **Судаченко В. Н., Эрк А. Ф., Тимофеев Е. В.** Обоснование критерия экономической эффективности совместного использования традиционных и возобновляемых энергоисточников // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 92. С. 35–43. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kriteriya-ekonomicheskoy-effektivnosti-sovmestnogo-ispolzovaniya-traditsionnyh-i-vozobnovlyаемых-energoistochnikov> (дата обращения: 22.05.2019).

20. **Эрк А. Ф., Судаченко В. Н., Размук В. А., Ковалева О. В.** Результаты энергетического обследования сельхозпредприятий // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. № 85. С. 100–105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-energeticheskogo-obsledovaniya-selskokozyaystvennyh-predpriyatiy> (дата обращения: 22.05.2019).

21. **Ракутько С. А., Маркова А. Е., Мишанов А. П., Ракутько Е. Н.** Энергоэкология светокультуры – новое междисциплинарное научное направление // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 90. С. 14–27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoekologiya-svetokultury-novoe-mezhdistsiplinarnoe-nauchnoe-napravlenie> (дата обращения: 22.05.2019).

22. Оценка экологичности и энергоэффективности предприятия АПК с помощью иерархической модели искусственной биоэнергетической системы / С. А. Ракутько [и др.] // Региональная экология. 2015. № 6 (41). С. 58–66.

23. **Shahsavari A., Akbari M.** Potential of Solar Energy in Developing Countries for Reducing Energy-Related Emissions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 90. Pp. 275–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>

24. Emission Characteristics of a Pyrolysis-Combustion System for the Co-Production of Biochar and Bioenergy from Agricultural Wastes / L. Dunnigan [et al.] // Waste Management. 2018. Vol. 77. Pp. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.004>

25. Energy Savings, Emission Reductions, and Health Co-Benefits of the Green Building Movement / P. MacNaughton [et al.] // Journal Of Exposure Science And Environmental Epidemiology. 2018. Vol. 28 (4). Pp. 307–318. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41370-017-0014-9>

26. Assessing the Economic and Environmental Sustainability of a Regional Air Quality Plan / C. Carnevale [et al.] // Sustainability. 2018. Vol. 10, Issue 10. Article ID 3568. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103568>

27. Air Quality, Primary Air Pollutants and Ambient Concentrations Inventory for Romania / G. Nastase [et al.] // Atmospheric Environment. 2018. Vol. 184. Pp. 292–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.034>

28. **Субботин И. А.** Повышение экологической безопасности утилизации навоза на основе принципов НДТ // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 92. С. 186–192. URL: <https://cyberleninka.ru/>

article/n/povyshenie-ekologicheskoy-bezopasnosti-utilizatsii-navoza-na-osnove-printsipov-ndt (дата обращения: 22.05.2019).

Поступила 22.02.2019; принята к публикации 20.03.2019; опубликована онлайн 30.09.2019

Об авторах:

**Брюханов Александр Юрьевич**, заведующий отделом инженерной экологии сельскохозяйственного производства, главный научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), доктор технических наук, профессор РАН, ResearcherID: B-7550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, [sznii@yandex.ru](mailto:sznii@yandex.ru)

**Субботин Игорь Александрович**, научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ResearcherID: L-6130-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-9385>, [itmo1652@mail.ru](mailto:itmo1652@mail.ru)

**Тимофеев Евгений Всеволодович**, старший научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: C-2502-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9022-0183>, [demon\\_zht84@mail.ru](mailto:demon_zht84@mail.ru)

**Эрк Андрей Федорович**, ведущий научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: C-2518-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4394-4322>, [4666866@bk.ru](mailto:4666866@bk.ru)

Заявленный вклад соавторов:

А. Ю. Брюханов – научное руководство, постановка задачи и формулирование концепции статьи; И. А. Субботин – методика, результаты и обсуждение; Е. В. Тимофеев – введение и обзор литературы; А. Ф. Эрк – методика, результаты и обсуждение, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Timofeev E.V., Erk A.F., Sudachenko V.N., Razmuk V.A. Optimization of Power Supply Schemes of Modern Agricultural Enterprises. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2018; (1):63-71. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10008>
2. Sudachenko V.N., Erk A.F., Timofeev E.V. Selection of Power Supply Options for Agricultural Production Facilities by Economic Criteria. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2017; (92):43-48. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-varianta-energospabzheniya-obektov-selhozproizvodstva-po-ekonomicheskim-kriteriyam> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
3. Brovtin V.N., Erk A.F., Bychkova O.V. Analysis of Energy Efficiency of Dairy Farms. *Mekhanizatsiya i ehlektrifikatsiya selskogo hozyaistva* = Mechanisation and Electrification of Agriculture. 2014; (5):22-24. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-energoeffektivnosti-predpriyatij-molochnogo-napravleniya> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)

4. Erk A.F., Sudachenko V.N., Butrimova E.I. Creation of Demonstration Zones of High Energy Performance of Agricultural Enterprises in Leningrad Region. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2016; (88):46-53. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-sozdaniya-demonstratsionnoy-zony-vysokoy-energoeffektivnosti-selskohozyaystvennyh-predpriyatiy-v-leningradskoy-oblasti> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
5. Lu X., Zhou K., Zhang X. A Systematic Review of Supply and Demand Side Optimal Load Scheduling in a Smart Grid Environment. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 203:757-768. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.301>
6. Ghisellini P., Setti M., Ulgiati S. Energy and Land Use in Worldwide Agriculture: An Application of Life Cycle Energy and Cluster Analysis. *Environment Development and Sustainability*. 2016; 18(3):799-837. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9678-2>
7. Naz M.N., Naem N., Iqbal M., Imran N. Economically Efficient and Environment Friendly Energy Management in Rural Area. *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*. 2017; 9(1):800-833. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4973713>
8. Bieber N., Ker J.H., Wang X.N., et al. Sustainable Planning of the Energy-Water-Food Nexus Using Decision Making Tools. *Energy Policy*. 2018; 113:584-607. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.037>
9. Zhonglin Ch., Guangchao G., Quanyuan J., Guerrero J.M. Energy Management of Chp-Based Microgrid with Thermal Storage for Reducing Wind Curtailment. *Journal of Energy Engineering*. 2018; 144(6):700-723. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000583](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000583)
10. Ardebili S., Khademalrasoul A. An Analysis of Liquid-Biofuel Production Potential from Agricultural Residues and Animal Fat (Case Study: Khuzestan Province). *Journal of Cleaner Production*. 2018; 204:819-831 (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.031>
11. Stich J., Ramachandran S., Hamacher T., Stimming U. Techno-Economic Estimation of the Power Generation Potential from Biomass Residues in Southeast Asia. *Energy*. 2017; 135:930-942. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.162>
12. Malladi K.T., Sowlati T. Biomass Logistics: A Review of Important Features, Optimization Modeling and the New Trends. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2018; 94:587-599. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.052>
13. Xu J.Z., Assenova A., Erokhin V. Renewable Energy and Sustainable Development in a Resource-Abundant Country: Challenges of Wind Power Generation in Kazakhstan. *Sustainability*. 2018; 10(9):3315. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093315>
14. Chung M., Shin K.Y., Jeoune D.S. Economic Evaluation of Renewable Energy Systems for the Optimal Planning and Design in Korea. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. 2018; 6(4):725-741. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0216>
15. Ivanov G.A., Bobyl A.V., Ershenko E.M., Terukov E.I. Operation of an Autonomous Hybrid Solar Power Plant in the Northwestern Federal District of Russia. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* = The Russian Journal of Applied Physics. 2014; 84(10):63-67. Available at: <https://docplayer.ru/53559049-Osobennosti-ekspluatatsii-solnechnoy-avtonomnoy-gibridnoy-energoustanovki-v-usloviyah-severozapadnogo-federalnogo-okruga.html> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
16. Bobyl A.V., Kiseleva S.V., Kochakov V.D., et al. Engineering and Economic Features of Grid Solar Energy in Russia Technical Physics. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* = The Russian Journal of Applied Physics. 2014; 84(4):85-92. Available at: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27207> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
17. Ablayev G.M., Abramov A.S., Nyapshaev I.A., et al. Flexible Photovoltaic Modules Based on Amorphous Hydrogenated Silicon. *Semiconductors*. 2015; 49(5):679-682. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063782615050024> (accessed 22.05.2019). (In Eng.)
18. Pfeifer A., Dominkovic D., Cosic B., Duic N. Economic Feasibility of CHP Facilities Fueled by Biomass from Unused Agriculture Land: Case of Croatia. *Energy Conversion and Management*. 2016; 125:222-229. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.090>



19. Sudachenko V.N., Timofeev E.V., Timofeev E.V. Justification Criterion of Economic Efficiency of Joint Use of Traditional and Renewable Energy Sources. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2017; (92):35-43. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kriteriya-ekonomicheskoy-effektivnosti-sovmestnogo-ispolzovaniya-traditsionnyh-i-vozobnovlyaemyh-energoistoknikov> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
20. Erk A.F., Sudachenko V.N., Rasmuk V.A., Kovaleva O.V. Results of Energy Survey of Agricultural Enterprises. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2014; (85):100-105. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-energeticheskogo-obsledovaniya-selskohozyaystvennyh-predpriyatiy> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
21. Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Energy and Ecological Efficiency of Indoor Plant Lighting as a New Interdisciplinary Research Area. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2016; (90):14-27. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoekologiya-svetokultury-novoe-mezhdistsiplinarnoe-nauchnoe-napravlenie> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
22. Rakutko S.A., Brovtin V.N., Mishanov A.P., et al. Assessment of Environmental Friendliness and Energy Efficiency of the Enterprise of Agro-Industrial Complex with the Help of a Hierarchical Model of an Artificial Bioenergy System. *Regionalnaya ekologiya* = Regional Ecology. 2015; (6):58-66. (In Russ.)
23. Shahsavari A., Akbari M. Potential of Solar Energy in Developing Countries for Reducing Energy-Related Emissions. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2018; 90:275-291. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>
24. Dunnigan L., Morton B., Ashman P., et al. Emission Characteristics of a Pyrolysis-Combustion System for the Co-Production of Biochar and Bioenergy from Agricultural Wastes. *Waste Management*. 2018; 77:59-66. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.004>
25. MacNaughton P., Cao X., Buonocore J., et al. Energy Savings, Emission Reductions, and Health Co-Benefits of the Green Building Movement. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2018; 28(4):307-318. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/s41370-017-0014-9>
26. Carnevale C., Ferrari F., Guariso G., et al. Assessing the Economic and Environmental Sustainability of a Regional Air Quality Plan. *Sustainability*. 2018; 10(10):3568. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103568>
27. Nastase G., Serban A., Nastase A., et al. Air Quality, Primary Air Pollutants and Ambient Concentrations Inventory for Romania. *Atmospheric Environment*. 2018; 184:292-303. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.034>
28. Subbotin I.A. Improvement of Environmental Safety of Manure Utilisation Based on BAT Principles. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2017; (92):186-192. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-ekologicheskoy-bezopasnosti-utilizatsii-navoza-na-osnove-printsipov-ndt> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)

Received 22.02.2019; revised 20.03.2019; published online 30.09.2019

*About authors:*

**Aleksandr Yu. Briukhanov**, Chief Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor of RAS, ResearcherID: B-7550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, [sznii@yandex.ru](mailto:sznii@yandex.ru)

**Igor A. Subbotin**, Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), ResearcherID: L-6130-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-9385>, [itmo1652@mail.ru](mailto:itmo1652@mail.ru)

**Evgeniy V. Timofeev**, Senior Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: C-2502-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9022-0183>, [demon\\_zht84@mail.ru](mailto:demon_zht84@mail.ru)

**Andrey F. Erk**, Leading Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: C-2518-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4394-4322>, [4666866@bk.ru](mailto:4666866@bk.ru)

*Contribution of the authors:*

A. Yu. Briukhanov – academic supervision, formulation of the problem and the paper concept; I. A. Subbotin – methods, results and discussion; E. V. Timofeev – introduction and literature review; A. F. Erk – methods, results and discussion, conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*



## Адаптивное итерационное управление температурой в теплице

**В. С. Грудинин, В. С. Хорошавин\*, А. В. Зотов,  
С. В. Грудинин**

*ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»  
(г. Киров, Россия)*

*\*khoroshavin@vyatsu.ru*

*Введение.* Создание и развитие эффективных аграрных комплексов, обеспечивающих высокую урожайность при минимальных временных, материальных и энергетических затратах, невозможно без применения систем автоматического управления (САУ), позволяющих с высокой точностью поддерживать микроклимат теплицы. Усовершенствования САУ микроклимата направлены на нейтрализацию влияния параметрических возмущений процессов внутри и вне теплицы. На примере канала регулирования температуры в теплице с контуром отопления на основе горячего трубного водоснабжения предложен адаптивный итерационный (поисковый) алгоритм подстройки составляющих пропорционального-интегрального-дифференциального (ПИД) регулятора в контуре отопления для обеспечения требуемого качества процесса регулирования.

*Материалы и методы.* За основу синтеза управления принята параметрически неопределенная модель температуры в теплице, структура которой на основе принципа суперпозиции преобразована к виду с сосредоточенными на выходную координату управлением и возмущениями. Применение адаптивного ПИД-регулятора основано на анализе базы данных реального времени, содержащей тренды управляемого процесса. Используя операторы языка системы управления базами данных или SQL-запросы, оценивается качество регулирования. По оценке качества корректируются пропорциональная и дифференциальная составляющая ПИД-регулятора так, чтобы система управления работала на грани перехода в режим автоколебаний. Возникающая статическая ошибка компенсируется изменением задающего воздействия.

*Результаты исследования.* Проведено моделирование в программном комплексе MBTU (SimInTech) реальной структуры одноконтурной САУ температурой в теплице с включенными регулирующим, исполнительным и измерительным элементами, а также при наличии запаздывания в движении теплоносителя. Показано, что предлагаемый алгоритм адаптации, заключающийся в аддитивной подстройке коэффициентов ПИД-регулятора, удобно реализуемый в SCADA-системе, обеспечивает минимальное колебательное поддержание температуры при произвольных параметрических возмущениях и наличии запаздывания.

*Обсуждение и заключение.* Предлагаемый алгоритм адаптации обеспечивает компенсацию неопределенности модели и возмущений, при этом достигается требуемая точность поддержания температуры в теплице. Результаты исследования послужат материалом для разработки многоконтурной САУ микроклимата теплицы с исследованием влияния и компенсации параметрической и структурной неопределенности, инерционностей и нелинейностей реальных элементов. Результаты работы могут быть использованы во многих отраслях народного хозяйства для исследования общих и прикладных проблем цифрового адаптивного управления процессами.

© Грудинин В. С., Хорошавин В. С., Зотов А. В., Грудинин С. В., 2019



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

**Ключевые слова:** микроклимат, адаптивный итерационный алгоритм, ПИД-закон регулирования, пакет моделирования МВТУ

**Для цитирования:** Грудинин В. С., Хорошавин В. С., Зотов А. В., Грудинин С. В. Адаптивное итерационное управление температурой в теплице // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 383–395. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.383-395>

## Adaptive Iterative Control of Temperature in Greenhouse

V. S. Grudinin, V. S. Khoroshavin\*, A. V. Zotov,  
S. V. Grudinin

*Vyatka State University (Kirov, Russia)*

\*[khoroshavin@vyatsu.ru](mailto:khoroshavin@vyatsu.ru)

**Introduction.** Creation and development of efficient agricultural complexes providing high yields at minimal time, material, and energy costs is impossible without the use of automatic control systems (ACS), which allow for maintaining the microclimate of the greenhouse with high accuracy. Improvements of the microclimate by ASC are aimed at neutralizing the influence of parametric perturbations of processes inside and outside the greenhouse. Using the example of a temperature control channel in a greenhouse with a heating circuit based on hot piped water supply, an adaptive iterative (search) algorithm for adjusting the components of a proportional-integral-differential (PID) controller in the heating circuit is proposed to ensure the required quality of the control process.

**Materials and Methods.** The management is based on a parametrically uncertain model of temperature in the greenhouse, the structure of which, based on the principle of superposition, is transformed into a form with control and disturbances concentrated on an output coordinate. The use of an adaptive PID controller is based on the real-time analysis of a database containing trends of the controlled process. Using operators of Database Management System or SQL language, queries evaluate regulation quality in accord with quality assessment. Proportional and differential components of the PID controller are adjusted so that the control system works on the verge of switching to auto-oscillation mode. The resulting static error is compensated by a change in the driving force.

**Results.** Simulation of the real structure of a single-circuit automatic control system with temperature in the greenhouse with built-in regulating, executive and measuring elements, with a delay of a coolant movement was carried out using the software MVTU (SimIn-Tech). The proposed adaptation algorithm, consisting of the additive adjustment of the PID controller coefficients and being conveniently implemented within the SCADA system, was shown to provide the minimum oscillatory temperature maintenance for arbitrary parametric perturbations in the presence of the delay.

**Discussion and Conclusion.** The proposed adaptation algorithm provides for compensation for model uncertainty and disturbances, while achieving the required accuracy of maintaining the temperature in the greenhouse. Results of the study will serve as the basics for development of multi-contour ACS microclimate greenhouses with the examination of the impact and compensation of parametric and structural uncertainty, inertia and nonlinearities of real elements. Our results may be used in many sectors of the national economy to study the general and applied problems of digital adaptive process control.

**Keywords:** microclimate, adaptive iterative algorithm, PID control law, simulation package MVTU

**For citation:** Grudinin V.S., Khoroshavin V.S., Zotov A.V., Grudinin S.V. Adaptive Iterative Control of Temperature in Greenhouse. *Inzhenererennyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):383-395. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.383-395>

## Введение

Процесс изменения микроклимата теплицы является многоконтурным, многопараметрическим и зависит от множества внешних и внутренних факторов [1; 2]. К внешним факторам относятся температура и влажность наружного воздуха, интенсивность солнечного излучения, направление и скорость ветра и т. п. К внутренним факторам относятся геометрические размеры теплиц, расположение элементов систем отопления и вентиляции, виды грунтов, генетические свойства и виды растений и т. п. Кроме того, в замкнутых контурах управления микроклиматом каналы управления могут значительно влиять друг на друга. Для учета этих факторов задачу управления микроклиматом целесообразно решать на основе современных методов теории автоматического управления<sup>1</sup>.

Для иллюстрации предлагаемого адаптивного итерационного алгоритма управления стоит рассмотреть канал регулирования температуры теплицы с отоплением горячим трубным водоснабжением, которое применяется в северных регионах, где наружная температура меньше требуемой для создания микроклимата внутри теплицы. На основании закона сохранения тепловой энергии приближенная модель изменения температуры в теплице в зависимости от управляющего и основных возмущающих воздействий представляется в работах ряда исследователей [2–6] уравнением:

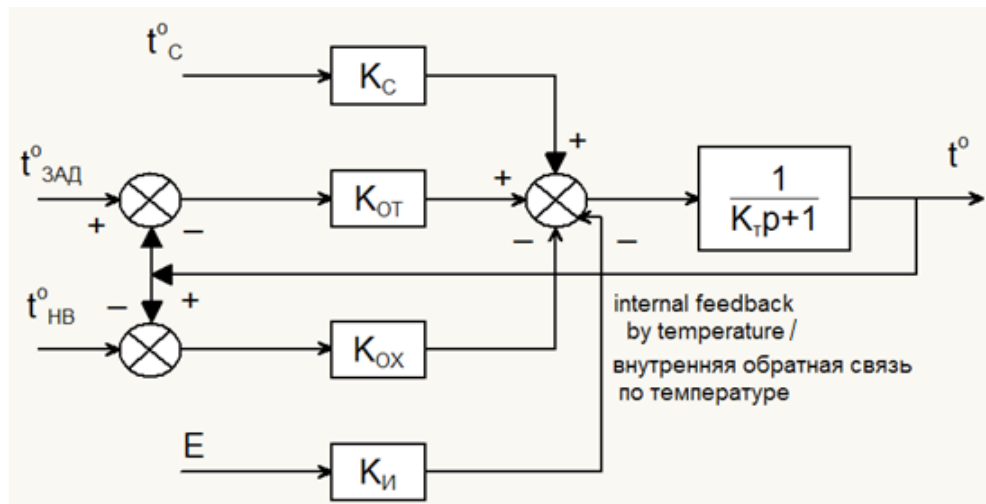
$$k_T \frac{dt^o}{dt} = k_c t_c^o + k_{OT} (t_{зад}^o - t^o) - k_{ox} (t^o - t_{не}^o) - k_u E, \quad (1)$$

где  $t^o$  – текущая температура воздуха в теплице;  $t_{зад}^o$  – температура труб или воды в системе отопления;  $t_{не}^o$  – температура наружного воздуха;  $t$  – время;  $k_T$  – конструктивный коэффициент теплицы в  $\text{кг}/(\text{K}\cdot\text{с}^3)$ , который определяется из выражения:  $k_T = \rho C_p V_T / A_T$ , в котором  $\rho$  – плотность воздуха в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха в  $\text{Дж}/(\text{K}\cdot\text{кг})$ ;  $V_T$  – объем теплицы в  $\text{м}^3$ ;  $A_T$  – площадь теплицы в  $\text{м}^2$ ;  $k_c$  – коэффициент нагрева от солнца в  $\text{кг}/(\text{K}\cdot\text{с}^3)$ ;  $t_c^o$  – температура воздействия от солнечного излучения;  $k_{OT}$  – коэффициент эффективности системы отопления в  $\text{кг}/(\text{K}\cdot\text{с}^3)$ , который определяется по формуле:  $k_{OT} = C_h A_h / A_T$ , где  $C_h$  – коэффициент преобразования тепла системы отопления  $\text{Вт}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$ ;  $A_h$  – площадь нагревательных элементов  $\text{м}^2$ ;  $k_{ox}$  – коэффициент охлаждения в  $\text{кг}/(\text{K}\cdot\text{с}^3)$ , который определяется двумя составляющими:  $k_{ox} = \rho C_p \phi_v(t) + \phi_c A_c / A_n$ , где  $\phi_v(t)$  – естественная вентиляция  $\text{м}/\text{с}$ ;  $A_c$  – площадь стен и потолка теплицы  $\text{м}^2$ ;  $\phi_c$  – коэффициент передачи тепла в окружающую среду  $\text{Вт}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$ ;  $k_u E$  – коэффициент и скорость транспирации воды соответствующих размерностей.

Уравнению (1) соответствует структура объекта управления ОУ (теплицы) (рис. 1), которая является структурно определенной, но неопределенной параметрически. Эта структура имеет один канал управления и три канала возмущений, распределенно влияющих на выходную координату, а также две внутренние обратные связи, что затрудняет использование этой структуры для исследования влияния управления и возмущений.

Цель работы заключается в повышении точности поддержания темпера-

<sup>1</sup> Теория автоматического управления / В. Б. Яковлев [и др.]. М.: Высшая школа, 2009. 568 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/17973/> (дата обращения: 22.01.2019); **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с. URL: [http://www.studmed.ru/miroshnik-iv-nikiforov-vo-fradkov-al-nelineynoe-i-adaptivnoe-upravlenie-slozhnymi-dinamicheskimi-sistemami\\_26c4345870b.html](http://www.studmed.ru/miroshnik-iv-nikiforov-vo-fradkov-al-nelineynoe-i-adaptivnoe-upravlenie-slozhnymi-dinamicheskimi-sistemami_26c4345870b.html) (дата обращения: 22.01.2019).



Р и с. 1. Исходная структура объекта управления  
 F i g. 1. The initial structure of the control object

туры воздуха в теплице, для чего решаются следующие задачи:

- приведение исходной модели ОУ (1) и соответствующей структуры (рис. 1) к виду, удобному для исследования влияния неопределенности параметров модели и возмущающих воздействий;

- разработка алгоритма адаптации регулятора для структуры системы управления с учетом реальных элементов и запаздывания в передаче теплоносителя;

- проверка работоспособности реальной САУ температурой в теплице путем компьютерного моделирования.

### Обзор литературы

Наиболее распространенным на практике методом регулирования температуры в теплице является введение ПИД-регулятора в контур отопления [3; 11] из-за его простоты. Однако он имеет ограничения по качеству регулирования, так как не учитывает неопре-

деленность параметров и действие возмущений. Применение искусственных нейронных сетей [8; 9] позволяет получить высокую точность регулирования, что сложно применимо на практике из-за необходимости обучения. Это касается использования достаточно сложных интеллектуальных систем [7; 10]. Применение математических моделей [11; 12] позволяет учесть некоторые нелинейности в динамике, но не учитывает неопределенность параметров. Методы адаптивного и модального управления<sup>2</sup> применены в работах ряда ученых [7; 10; 13] для синтеза одноканального регулятора и в исследовании Д. Н. Герасимова и М. В. Лызлова [2] для синтеза многоканального регулирования микроклимата теплицы, где использованы беспоисковые алгоритмы адаптации на основе идентификации неопределенных параметров и оценки их состояния. Беспоисковые алгоритмы адаптации требуют значительных

<sup>2</sup> Анализ систем автоматического управления методом модального управления / В. В. Григорьев [и др.]. СПб.: СПб ГУИТМО, 2007. 108 с. URL: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/266.pdf> (дата обращения: 22.01.2019); Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами.

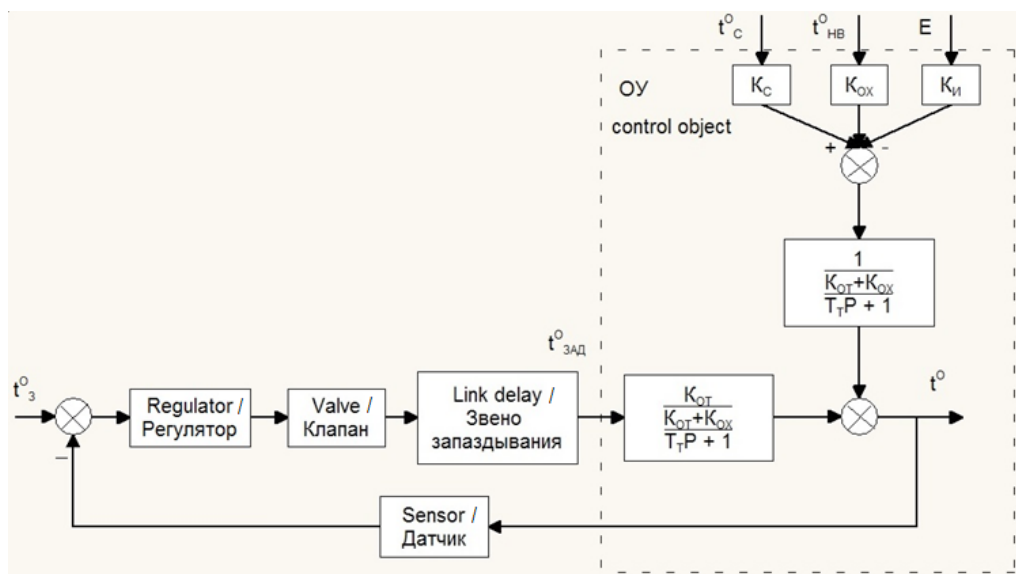
вычислительных ресурсов, так как для их реализации необходима достаточно полная информация о действующих изменениях параметров, возмущений и их принадлежности определенному классу.

В некоторых случаях для создания системы управления микроклиматом на основе общепромышленных SCADA-систем<sup>3</sup>, когда имеется возможность применения стандартного ПИД-регулятора, но или нет возможности реализации экстраполятора Смита [14] для компенсации транспортного запаздывания, или неизвестна точная структура модели объекта управления, требуется поддерживать состояние температурного режима с максимально высокими настроечными коэффициентами регулятора [15]. Некоторые SCADA-системы имеют средства для автоматической настройки ПИД-регулятора<sup>4</sup>,

но в системах с большими транспортными задержками их работа не приводит к нужному результату. В условиях нестационарности объекта это может привести к срыву процесса управления в автоколебательный режим, что нередко наблюдается на практике.

### Материалы и методы

Приведение исходной модели температуры воздуха в теплице (1) и соответствующей структуры ОУ к виду, удобному для исследования параметрической неопределенности модели и возмущающих воздействий, проделано путем формального алгебраического преобразования уравнения теплового баланса (1) и по правилам эквивалентных преобразований структурных схем линейных САУ. В результате преобразований получена структура реальной системы управления температурой в теплице (рис. 2), в которой в более опре-



Р и с. 2. Структура реальной системы управления температурой теплицы

F i g. 2. Structure of a real greenhouse temperature control system

<sup>3</sup> SCADA TRACE MODE. AdAstrA Research Group [Электронный ресурс]. URL: <http://www.adastra.ru> (дата обращения: 22.01.2019).

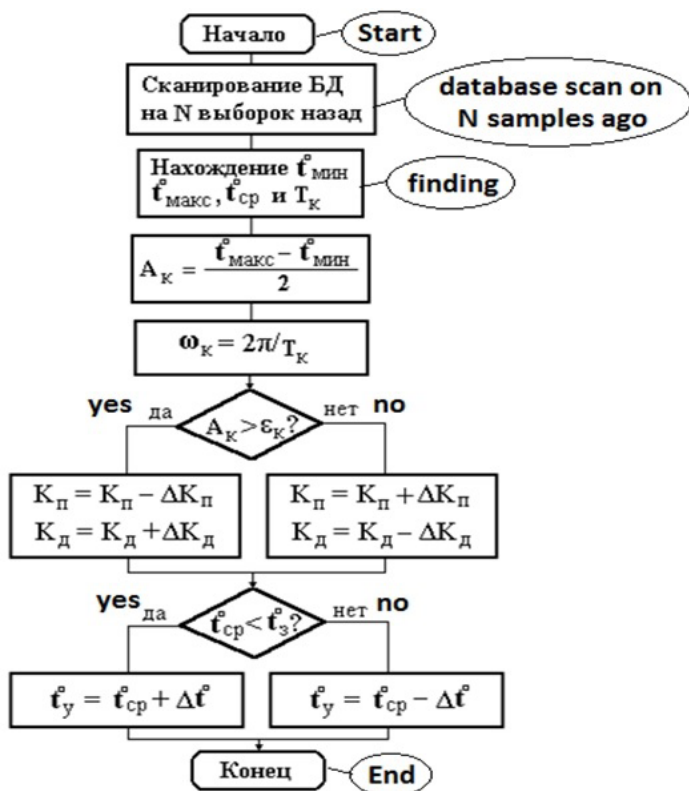
<sup>4</sup> Зорин С. В. ПИД-закон регулирования. Метод нахождения ПИД-коэффициентов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf> (дата обращения: 22.01.2019).

деленной структуре ОУ сосредоточено на выходную координату через аperiодические звенья с постоянной времени  $T_T$  в секундах, равной отношению  $T_T = k_T / (k_{OT} + k_{ox})$ , действуют управление и возмущения, исключена внутренняя обратная связь, в канал управления температурой введены регулирующий, исполнительный и измерительный элементы, а также учтено запаздывание в движении теплоносителя.

На основе проведенного анализа существующих решений по синтезу САУ температурой в теплице в работе используется ПИД-регулирование в SCADA-системе с учетом запаздывания и адаптивный итерационный (поисковый) алгоритм подстройки ПИД-регулятора для компенсации про-

извольных не заданных заранее параметрических возмущений. Применение итерационного (поискового) алгоритма адаптации обусловлено тем, что для реальных процессов как проектируемых, так и функционирующих, есть предварительная информация об управляемом процессе.

Структурная схема итерационного алгоритма определения параметров динамики процесса и подстройки коэффициентов ПИД-регулятора представлена на рисунке 3. В предположении, что в системе управления ведется база данных реального времени, которая содержит тренды управляемого процесса, можно применить адаптивный регулятор, использующий анализ этой базы данных. В его основе лежит оценка



Р и с. 3. Алгоритм определения параметров процесса и подстройки коэффициентов ПИД-регулятора  
 Fig. 3. Algorithm for determining the process parameters and adjusting the coefficients of the PID controller



предыдущего состояния процесса регулирования. Если известна основная постоянная времени процесса регулирования  $T_o$  и период дискретизации  $T_o$  системы управления, то известно и количество записей в базе данных относительно текущего момента, которые могут дать информацию о ходе регулирования с числом выборок  $N = T_o / T_o$ . Используя или операторы языка СУБД или SQL-запросы, можно определить температуры  $t_{мин}^0$ ,  $t_{макс}^0$ ,  $t_{ср}^0$ , период  $T_k$  и амплитуду  $A_k$  колебаний процесса регулирования.

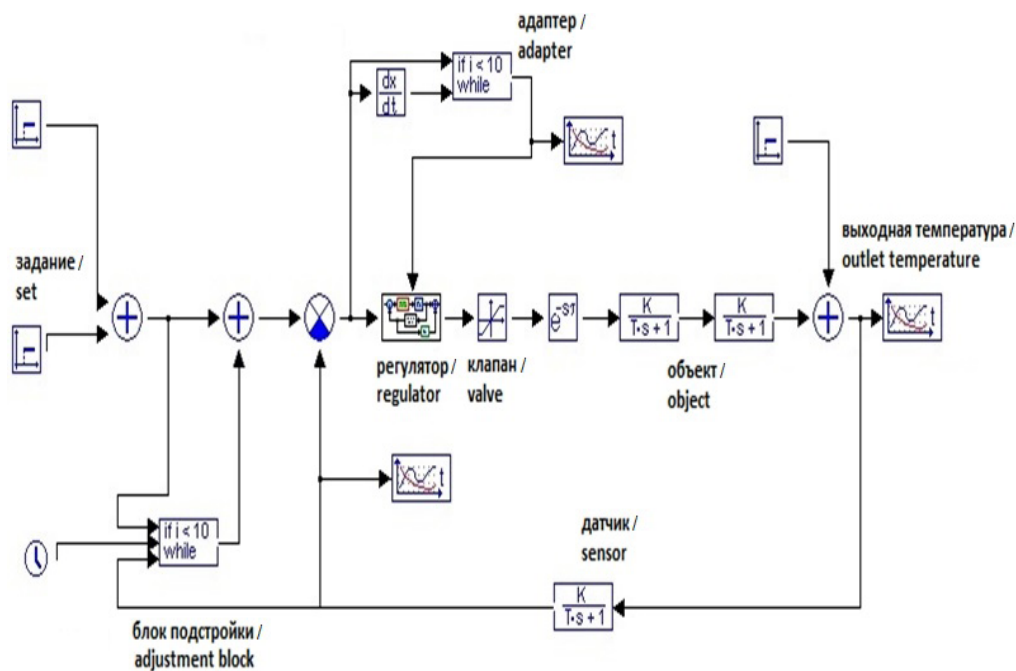
Оценка качества процесса регулирования заключается в проверке, укладывается ли амплитуда колебаний  $A_k$  в пределы допустимой амплитуды  $\varepsilon_k$  и какова величина статической ошибки регулирования  $\Delta t^0 = t_z^0 - t_{ср}^0$ . По полу-

ченной оценке производится коррекция коэффициентов регулятора  $K_n$  и  $K_o$  в сторону увеличения или уменьшения.

Одновременно вводится значение надбавки дополнительно к заданной температуре  $t_y^0 = t_z^0 \pm \Delta t^0$ , чтобы компенсировать статическую ошибку. Одновременно проверяются допустимые границы изменения коэффициентов. Ввиду большого значения транспортной задержки применение интегральной составляющей регулятора ограничено и здесь не используется.

### Результаты исследования

Для проверки поведения реальной САУ со структурой, приведенной на рисунке 2, с адаптивным итерационным регулятором составлена ее модель в пакете моделирования MBTU (SimInTech)<sup>5</sup> (рис. 4). На представленной



Р и с. 4. Модель адаптивной итерационной системы управления

Fig. 4. Model of adaptive iterative control system

<sup>5</sup> Программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» [Электронный ресурс] / О. С. Козлов [и др.]. URL: <http://model.exponenta.ru/mvtu/20050615.html> (дата обращения: 22.01.2019); Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов [и др.]. М.: ДМК Пресс, 2017. 423 с. URL: <https://www.ozon.ru/context/detail/id/141205418/> (дата обращения: 22.01.2019).

модели блок адаптации БА производит поиск бесколебательной зоны управления в пределах допустимых изменений коэффициентов ПИД-регулятора.

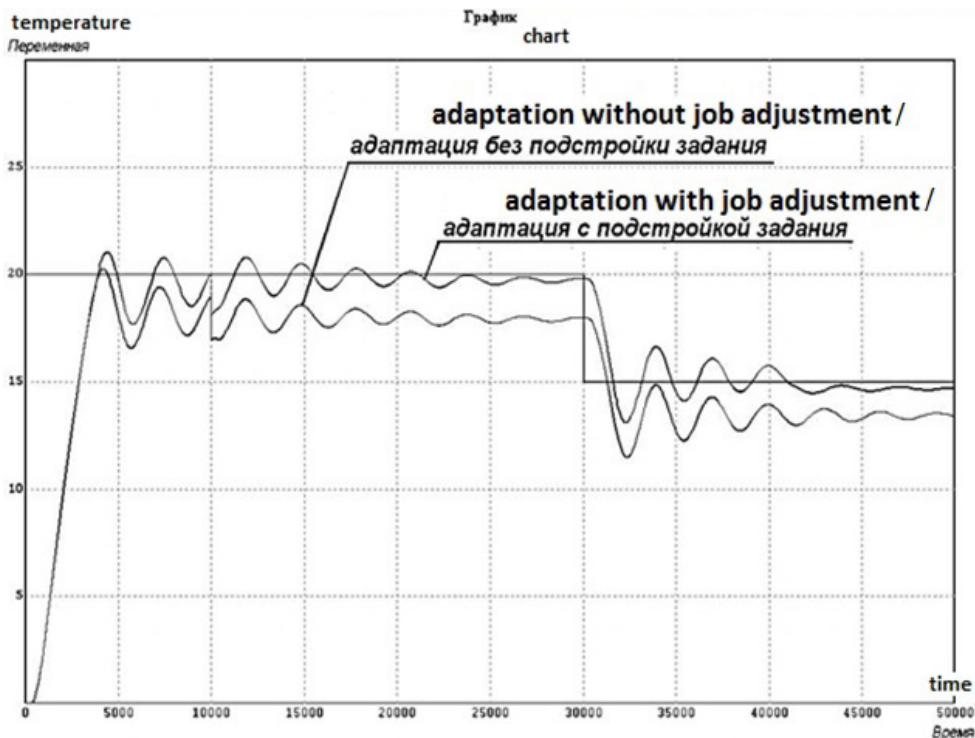
Параметры модели следующие:  $t_3^0 = 20$  °С, ПИД-регулятор, регулирующий клапан, представленным в виде звена с насыщением  $K_{кл} = 0,55$ . Задержка, обусловленная транспортным запаздыванием теплоносителя,  $\tau = 240$  с. Передаточная функция теплицы в канале управляющего воздействия представлена двумя апериодическими звеньями, первое из которых учитывает трубное отопление, а второе собственно теплицу по структуре рисунка 2. Коэффициент передачи теплицы, определенный по кривой выбега,  $K_m = 0,39$ , постоянная времени  $T_o = 2400$  с. Коэффициент передачи цепи обратной связи  $K_o = 1,0$ , постоянная времени обратной связи  $T_o = 9$  с.

Так как процесс вхождения в бесколебательную зону может сопровождаться снижением пропорционального коэффициента регулятора и увеличением статической ошибки, то вторая составляющая блока адаптации, в виде программного блока, производит оценку ошибки и подстройку задающего воздействия через добавку  $\Delta t^0$ .

Результаты моделирования при температуре 20 °С и дальнейшем ее снижении до 15 °С представлены на рисунке 5, там же показано влияние возмущающего воздействия на 10000-ной секунде процесса.

**Обсуждение и заключение**

Из полученных результатов моделирования видно, что подстройка коэффициентов ПИД-регулятора приводит к снижению колебательности процесса до допустимых пределов при повышении статической ошибки. Применение



Р и с. 5. Результаты моделирования адаптивной итерационной системы управления  
 F i g. 5. Results of modeling an adaptive iterative control system

блока подстройки задающего воздействия эту ошибку устраняет, заставляя систему работать на грани перехода в колебательный режим. Таким образом, применение предлагаемого алгоритма адаптации в системе управления с большими транспортными задержками позволит избежать явления колебательности процесса, снизит износ регулирующего оборудования и повысит качество управления.

Предлагаемый алгоритм адаптации, заключающийся в аддитивной подстройке коэффициентов ПИД-регулятора, удобно реализуемый в SCADA-системе, обеспечивает компенсацию неопределенности модели и возмущений, при этом достигается требуемая точность поддержания температуры

в теплице. Результаты исследования послужат материалом для разработки многоконтурной САУ микроклимата теплицы с исследованием влияния и компенсации параметрической и структурной неопределенности, инерционностей и нелинейностей реальных элементов. Выводы работы могут быть использованы во многих отраслях народного хозяйства для исследования общих и прикладных проблем цифрового адаптивного управления процессами<sup>6</sup> с ПИД-регулированием координат [16], например, в системах управления интеллектуальными зданиями [17], в радиотехнике [18], в пищевой промышленности [19], в стройиндустрии [20], в производстве резинотехнических изделий [21] и т. д.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Грудинин В. С.** Управление микроклиматом и средства фитомониторинга // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2007. № 10. С. 124–127. URL: [http://www.cnsnb.ru/jour/j\\_as.asp?id=96472](http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=96472) (дата обращения: 22.01.2019).
2. **Герасимов Д. Н., Лызлова М. В.** Адаптивное управление микроклиматом в теплицах // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2014. № 6. С. 124–135. URL: <https://clck.ru/HHiDu> (дата обращения: 22.01.2019).
3. **Токмаков Н. М., Грудинин В. С.** Математическая модель системы управления микроклиматом ангарных теплиц. Гавриш. 2008. № 3. С. 28–32. URL: <http://samodelkin.komi.ru/doc/6.pdf> (дата обращения: 22.01.2019).
4. **Von Zabeltitz C.** Greenhouse Structures // In: *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. Pp. 59–135. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7_5)
5. **Jones P., Jones J. W., Hwang Y.** Simulation for Determining Greenhouse Temperature Set Points // *Transactions of the ASAE*. 1990. Vol. 33, no. 5. Pp. 1722–1728. URL: [https://scholar.google.ru/scholar?cluster=7823325459120957027&hl=ru&as\\_sdt=0,5](https://scholar.google.ru/scholar?cluster=7823325459120957027&hl=ru&as_sdt=0,5) (дата обращения: 22.01.2019).
6. **Van Straten G., Van Henten E. J.** Optimal Greenhouse Cultivation Control: Survey and Perspectives // *Dept. Agrotechnology and Food Science. Systems and Control*. 2010. Vol. 43, Issue 26. Pp. 18–33. URL: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/161860> (дата обращения: 22.01.2019).
7. **Zeng S., Xu H. H. L., Li G.** Nonlinear Adaptive PID Control for Greenhouse Environment Based on RBF Network // *Sensors*. 2012. Vol. 12. Pp. 5328–5348. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120505328>
8. **Seginer I., Boulard T., Bailey B. J.** Neural Network Models of the Greenhouse Climate // *Agricultural Engineering Research*. 1994. Vol. 59. Pp. 203–216. URL: [https://www.researchgate.net/profile/T\\_Boulard/publication/222347971\\_Neural\\_Network\\_Models\\_of\\_the\\_Greenhouse\\_Climate/links/5a0802894585157013a5e0ea/Neural-Network-Models-of-the-Greenhouse-Climat.pdf](https://www.researchgate.net/profile/T_Boulard/publication/222347971_Neural_Network_Models_of_the_Greenhouse_Climate/links/5a0802894585157013a5e0ea/Neural-Network-Models-of-the-Greenhouse-Climat.pdf) (дата обращения: 22.01.2019).

<sup>6</sup> **Олссон Г., Пиани Д.** Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с. URL: [http://industry.ucoz.ru/\\_fr/0/4405990.pdf](http://industry.ucoz.ru/_fr/0/4405990.pdf) (дата обращения: 22.01.2019).

9. **Kok R., Lacroix R., Clark G., Taillefer E.** Imitation of a Procedural Greenhouse Model with an Artificial Neural Network // Canadian Agricultural Engineering. 1994. Vol. 36, no. 2. Pp. 117–126. URL: [https://scholar.google.ru/scholar?cluster=2098238280172549431&hl=ru&as\\_sdt=0,5](https://scholar.google.ru/scholar?cluster=2098238280172549431&hl=ru&as_sdt=0,5) (дата обращения: 22.01.2019).
10. **Грудинин В. С.** Адаптивная компьютерная система управления микроклиматом // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2007. № 9. С. 137–142. URL: [http://www.cnsnb.ru/jour/j\\_as.asp?id=92776](http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=92776) (дата обращения: 22.01.2019).
11. **Ferreira P. M., Ruano A. E.** Discrete Model Based Greenhouse Environmental Control Using the Branch & Bound Algorithm // The International Federation of Automatic Control. 2008. Pp. 2937–2943. URL: <http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/ifac2008/data/papers/3461.pdf> (дата обращения: 22.01.2019).
12. Dynamic Modeling and Simulation of Greenhouse Environments under Several Scenarios: a Web-Based Application / Efrén Fitz-Rodríguez [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2010. Vol. 70. Pp. 105–116. URL: <http://irrecenvhort.ifas.ufl.edu/Teaching%20publications/Publications/COMPAG-2009-Greenhouse%20simulation.pdf> (дата обращения: 22.01.2019).
13. **Berenguel M., Yebra L. J., Rodriguez F.** Adaptive Control Strategies for Greenhouse Temperature Control // En viado a ECC. 2003. DOI: <https://doi.org/10.23919/ECC.2003.7086457>
14. **Мееров М. В.** Адаптивные компенсирующие регуляторы с предиктором Смита // Автоматика и телемеханика. 2000. № 10. С. 125–135. URL: [http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshw=paper&jrnid=at&paperid=15286&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshw=paper&jrnid=at&paperid=15286&option_lang=rus) (дата обращения: 22.01.2019).
15. **Денисенко В. В.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1. С. 78–88. URL: [http://www.studmed.ru/denisenko-vv-pid-regulyatory-principyu-postroeniya-i-modifikacii\\_dc7431cf063.html](http://www.studmed.ru/denisenko-vv-pid-regulyatory-principyu-postroeniya-i-modifikacii_dc7431cf063.html) (дата обращения: 22.01.2019).
16. **Åström K. J., Hägglund T.** Advanced PID control. Durham: ISA, 2006. 460 p. URL: [http://intranet.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/13/files/AdvancesInPIDControl\\_KJA.pdf](http://intranet.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/13/files/AdvancesInPIDControl_KJA.pdf) (дата обращения: 22.01.2019).
17. **Карпенко А. В., Петрова И. Ю.** Модели управления микроклиматом в помещении // Фундаментальные исследования. 2016. № 7 (2). С. 224–229. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40488> (дата обращения: 22.01.2019).
18. **Гудкова Н. В.** Приложение принципов адаптивного моделирования к задачам управления динамическими объектами типа «черный ящик» // Современная электроника. 2012. № 8. С. 68–70. URL: [http://www.radiofiles.ru/news/sovremennaja\\_ehlektronika\\_8\\_2012/2012-10-09-2397](http://www.radiofiles.ru/news/sovremennaja_ehlektronika_8_2012/2012-10-09-2397) (дата обращения: 22.01.2019).
19. Анализ управляемости и устойчивости приближенной модели теплопереноса в автоклаве / С. А. Мокрушин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 416–428. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.416-428>
20. **Alonso A. A., Banga J. R., Perez-Martin R.** Modeling and Adaptive Control for Batch Sterilization // Computers & Chemical Engineering. 1998. Vol. 22, Issue 3. С. 445–458. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135497002500> (дата обращения: 22.01.2019).
21. **Киргин Д. С.** Алгоритмы управления технологическим процессом вулканизации установки автоклав // Вестник ИрГТУ. 2011. Т. 55, № 8. С. 195–199. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithmu-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-vulkanizatsii-ustanovki-avtoklav> (дата обращения: 22.01.2019).

*Поступила 17.12.2018; принята к публикации 18.02.2019; опубликована онлайн 30.09.2019*

*Об авторах:*

**Грудинин Виктор Степанович**, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Политехнический институт, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, ResearcherID: G-5550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-6195>, [grudinin@vyatsu.ru](mailto:grudinin@vyatsu.ru)

**Хорошавин Валерий Степанович**, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Политехнический институт, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: G-5298-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-3866>, [khoroshavin@vyatsu.ru](mailto:khoroshavin@vyatsu.ru)

**Зотов Александр Викторович**, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Политехнический институт, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, ResearcherID: G-4912-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9007-9861>, [zotov@vyatsu.ru](mailto:zotov@vyatsu.ru)

**Грудинин Сергей Викторович**, аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Политехнический институт, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ResearcherID: V-9221-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1569-6808>, [sergeycith@yandex.ru](mailto:sergeycith@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. С. Грудинин – постановка задачи и выбор методов решения; В. С. Хорошавин – анализ материалов по теме исследования; А. В. Зотов – моделирование системы; С. В. Грудинин – программирование и компьютерные работы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Grudin V.S. Climate Control and Phytonomonitoring Tools. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agrarian Science of Euro-North-East. 2007; (10):124-127. Available at: [http://www.cnshb.ru/jour/j\\_as.asp?id=96472](http://www.cnshb.ru/jour/j_as.asp?id=96472) (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
2. Gerasimov D.N., Lyzlova M.V. Adaptive Climate Control in Greenhouses. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* = News of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. 2014; (6):124-135. Available at: <https://clck.ru/HHiDy> (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
3. Tokmakov N.M., Grudin V.S. Mathematical Model for Microclimate's Control in Shed Greenhouses. *Gavrish*. 2008; 3:28-32. Available at: <http://samodelkin.komi.ru/doc/6.pdf> (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
4. Von Zabeltitz C. Greenhouse Structures. In: *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2011. Pp. 59–135. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7_5)
5. Jones P., Jones J.W., Hwang Y. Simulation for Determining Greenhouse Temperature Set Points. *Transactions of the ASAE*. 1990; 33(5):1722-1728. Available at: [http://scholar.google.ru/scholar?cluster=7823325459120957027&hl=ru&as\\_sdt=0,5](http://scholar.google.ru/scholar?cluster=7823325459120957027&hl=ru&as_sdt=0,5) (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
6. Van Straten G., Van Henten E.J. Optimal Greenhouse Cultivation Control: Survey and Perspectives. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010; 43(26):18-33. Available at: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/161860> (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
7. Zeng S., Xu H.H.L., Li G. Nonlinear Adaptive PID Control for Greenhouse Environment Based on RBF Network. *Sensors*. 2012; (12):5328-5348. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/s120505328>
8. Seginer I., Boulard T., Bailey B.J. Neural Network Models of the Greenhouse Climate. *Agricultural Engineering Research*. 1994; 59:203-216. Available at: [https://www.researchgate.net/profile/T\\_Boulard/publication/222347971\\_Neural\\_Network\\_Models\\_of\\_the\\_Greenhouse\\_Climate/links/5a0802894585157013a5e0ea/Neural-Network-Models-of-the-Greenhouse-Climat.pdf](https://www.researchgate.net/profile/T_Boulard/publication/222347971_Neural_Network_Models_of_the_Greenhouse_Climate/links/5a0802894585157013a5e0ea/Neural-Network-Models-of-the-Greenhouse-Climat.pdf) (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
9. Kok R., Lacroix R., Clark G., Taillefer E. Imitation of a Procedural Greenhouse Model with an Artificial Neural Network. *Canadian Agricultural Engineering*. 1994; 36(2):117-126. Available at: [https://scholar.google.ru/scholar?cluster=2098238280172549431&hl=ru&as\\_sdt=0,5](https://scholar.google.ru/scholar?cluster=2098238280172549431&hl=ru&as_sdt=0,5) (accessed 22.01.2019). (In Eng.)

10. Grudinin V.S. Adaptive Computer Climate Control System. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agrarian Science of Euro-North-East. 2007; (9):137-142. Available at: [http://www.cnsnb.ru/jour/j\\_as.asp?id=92776](http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=92776) (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
11. Ferreira P.M., Ruano A.E. Discrete Model Based Greenhouse Environmental Control Using the Branch & Bound Algorithm. *The International Federation of Automatic Control*. 2008. p. 2937-2943. Available at: <http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/ifac2008/data/papers/3461.pdf> (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
12. Fitz-Rodriguez E., Kubota C., Giacomelli G.A., et al. Dynamic Modeling and Simulation of Greenhouse Environments under Several Scenarios: a Web-Based Application. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010; (70):105-116. Available at: <http://irrecenvhort.ifas.ufl.edu/Teaching%20publications/Publications/COMPAG-2009-Greenhouse%20simulation.pdf> (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
13. Berenguel M., Yebra L.J., Rodriguez F. Adaptive Control Strategies for Greenhouse Temperature Control. *En viado a ECC*. 2003. p. 2747-2752. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23919/ECC.2003.7086457>
14. Meerov M.V. Adaptive Compensating Controllers with Smiths Predictor. *Avtomatika i telemekhanika* = Automation and Remote Control. 2000; (10):125-135. Available at: [http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=15286&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=15286&option_lang=rus) (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
15. Denisenko V.V. PID Regulators: Principles of Construction and Modification. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii* = Modern Automation Technology. 2007; (1):78-88. Available at: [http://www.studmed.ru/denisenko-vv-pid-regulyatory-principy-postroeniya-i-modifikacii\\_dc7431cf063.html](http://www.studmed.ru/denisenko-vv-pid-regulyatory-principy-postroeniya-i-modifikacii_dc7431cf063.html) (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
16. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. *ISA Publication*. 2006. Available at: [http://intranet.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/13/files/AdvancesInPIDControl\\_KJA.pdf](http://intranet.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/13/files/AdvancesInPIDControl_KJA.pdf) (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
17. Karpenko A.V., Petrova I.Yu. Indoor Climate Control Models. *Fundamental Research*. 2016; (7):224-229. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40488> (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
18. Gudkova N.V. Application of the Principles of Adaptive Modeling to Control Problems of Dynamic Objects of the “Black Box” Type. *Sovremennaya elektronika* = Modern Electronics. 2012; (8):68-70. Available at: [http://www.radiofiles.ru/news/sovremennaja\\_ehlektronika\\_8\\_2012/2012-10-09-2397](http://www.radiofiles.ru/news/sovremennaja_ehlektronika_8_2012/2012-10-09-2397) (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
19. Mokrushin S.A., Khoroshavin V.S., Ohapkin S.I., et al. The Analysis of Controllability and Stability of an Approximate Model of Heat Transfer in an Autoclave. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):416-428. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.416-428>
20. Alonso A.A., Banga J.R., Perez-Martin R. Modeling and Adaptive Control for Batch Sterilization. *Computers & Chemical Engineering*. 1998; 22(3):445-458. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135497002500> (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
21. Kirgin D.S. Algorithms for the Control of the Technological Process of Vulcanization of an Autoclave Installation. *Vestnik IrGTU* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2011; 55(8):195-199. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-vulkanizatsii-ustanovki-avtoklav> (accessed 22.01.2019). (In Russ.)

Received 17.12.2018; revised 18.02.2019; published online 30.09.2019

*About authors:*

**Viktor S. Grudinin**, Associate Professor of Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Polytechnic Institute, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia) Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-5550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-6195>, [grudinin@vyatsu.ru](mailto:grudinin@vyatsu.ru)

**Valeriy S. Khoroshavin**, Professor of Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Polytechnic Institute, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: G-5298-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-3866>, [khoroshavin@vyatsu.ru](mailto:khoroshavin@vyatsu.ru)

**Alexander V. Zotov**, Associate Professor of Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Polytechnic Institute, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-4912-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9007-9861>, [zotov@vyatsu.ru](mailto:zotov@vyatsu.ru)

**Sergey V. Grudinin**, Postgraduate Student of Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Polytechnic Institute, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), ResearcherID: V-9221-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1569-6808>, [sergeycith@yandex.ru](mailto:sergeycith@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

V. S. Grudinin – formulation of the problem and choice of methods; V. S. Khoroshavin – analysis of materials on the topic of the study; A. V. Zotov – modeling the system; S. V. Grudinin – programming and computer work.

*All authors have read and approved the final manuscript.*



## Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов

С. А. Величко<sup>1</sup>, П. В. Чумаков<sup>1\*</sup>, А. В. Коломейченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ» (г. Орёл, Россия)

\*[pav-chumakov@yandex.ru](mailto:pav-chumakov@yandex.ru)

*Введение.* Существующие методы оценки технического состояния силовых гидроцилиндров не позволяют делать заключение о необходимости восстановления изношенных поверхностей деталей. При этом данные о предельных значениях износов деталей (значений износов, при достижении которых принимается решение о ремонте) в технических требованиях на капитальный ремонт и другой технической документации гидроцилиндров в настоящее время отсутствуют. Целью работы является определение предельных значений износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С.

*Материалы и методы.* Для оценки технического состояния гидроцилиндров применяется разработанное устройство на базе стенда КИ-28097М-ГОСНИТИ, состоящее из нагрузочного гидроцилиндра и независимой гидростанции, при помощи которых проводились стендовые испытания бывших в эксплуатации гидроцилиндров серии С с определением значений общего коэффициента полезного действия.

*Результаты исследования.* Представлены результаты стендовых и микрометражных исследований бывших в эксплуатации гидроцилиндров серии С (С75/30, С90/30, С100/40). Получена регрессионная модель связи общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров серии С (С75/30, С90/30, С100/40) с износами рабочих поверхностей деталей. По полученной регрессионной модели методом крутого восхождения определены предельные значения износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С (С75/30, С90/30, С100/40).

*Обсуждение и заключение.* Установлено, что 19,5 % гидроцилиндров серии С (С75/30, С90/30, С100/40) эксплуатировались в запредельном состоянии. Предельные значения износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С, которые определены методом крутого восхождения, в условиях предприятий технического сервиса при проведении входного контроля поступивших в ремонт гидроцилиндров позволяют принимать решение о необходимости их восстановления.

**Ключевые слова:** гидроцилиндр, коэффициент полезного действия, техническое состояние, микрометраж, износ

**Финансирование:** Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание, направление: развитие компетенций, проект № 11.3416.2017/4.6) «Разработка технологий и средств повышения долговечности деталей, узлов, агрегатов машин и оборудования путем создания наноструктурированных покрытий источниками концентрированной энергии».

**Для цитирования:** Величко С. А., Чумаков П. В., Коломейченко А. В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 396–413. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.396-413>

© Величко С. А., Чумаков П. В., Коломейченко А. В., 2019



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



# Assessment of Technical Condition of C Series Power Hydraulic Cylinders of Mounted Hydraulic Systems of Tractors

S. A. Velichko<sup>1</sup>, P. V. Chumakov<sup>1\*</sup>, A. V. Kolomeychenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

<sup>2</sup>Orel State Agrarian University (Orel, Russia)

\*pav-chumakov@yandex.ru

**Introduction.** The existing methods of assessing the technical condition of power hydraulic cylinders do not allow one to conclude about the need to restore worn surfaces of parts. The data on limit values of wear of parts (wear and tear value at which a decision is made to repair) in technical requirements to overhaul and other technical documentation of hydraulic cylinders are not currently available. The aim of the study is to determine limit values of wear of working surfaces of hydraulic cylinder parts of C series.

**Materials and Methods.** To assess the technical condition of hydraulic cylinders used, the authors developed a device on the basis of the stand KI-28097M-GOSNITI, equipped with an independent hydraulic station and load hydraulic cylinder, at which bench tests were carried out in the operation of C series hydraulic cylinders to determine overall efficiency values.

**Results.** Results of bench and micrometer tests of the former hydraulic cylinders of the C series (C75/30, C90/30, C100/40) are presented. The regression model of the relationship between total efficiency of C series hydraulic cylinders (C75/30, C90/30, C100/40) and wear of working surfaces of parts was obtained. According to this regression model obtained using the method of steep ascent, limit values of wear of the working surfaces of C series hydraulic cylinder parts (C75/30, C90/30, C100/40) were determined.

**Discussion and Conclusion.** 19,5 % of hydraulic cylinders of C series (C75/30, C90/30, C100/40) were operated in an out-of-limit condition. In case of technical service companies carrying out the input control of to-be-repaired hydraulic cylinders, limit values of wear for hydraulic cylinder surfaces, determined by the method of steep ascent, allow for making proper decisions on the need of their restoration.

**Keywords:** hydraulic cylinder, efficiency factor, technical condition, micrometer, wear

**Funding:** The publication was prepared with the financial support of the Ministry of Education of Russia, State Assignment: Competency Development, Project No. 11.3416.2017/4.6: Development of Technologies and Means of Enhancing Durability of Parts, Components, Assemblies of Machinery and Equipment by Creating Nanostructured Coatings by Concentrated Energy Sources.

**For citation:** Velichko S.A., Chumakov P.V., Kolomeychenko A.V. Assessment of Technical Condition of C Series Power Hydraulic Cylinders of Mounted Hydraulic Systems of Tractors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):396-413. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.396-413>

## Введение

Одним из агрегатов гидравлических систем современных отечественных и зарубежных тракторов является силовой гидроцилиндр, назначение которого заключается в преобразовании энергии рабочей жидкости, создаваемой насосом, в энергию возвратно-поступательного движения. При этом создаваемое возвратно-поступательное

движение позволяет применять гидроцилиндр для перемещения прицепных и навесных рабочих органов машин.

В работе Е. В. Гранкиной установлено, что «около 6...15 % отказов гидронавесной системы новых сельскохозяйственных тракторов тягового класса 1,4 и 3,0 связано с выходом из строя гидроцилиндров, из которых 42...45 % случаев обусловлены неисправностями

уплотнительных узлов – 52 % отказов штокового узла и 40 % – поршневого»<sup>1</sup>. 80-процентный гамма-ресурс гидроцилиндров серии в 1,5 раза ниже ресурса, заявленного заводом-изготовителем и составляет 6000 мото-часов работы трактора [1].

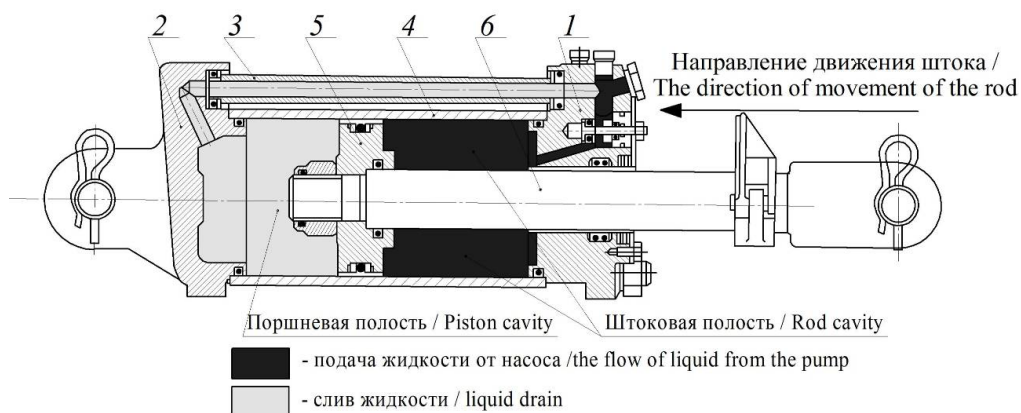
В настоящее время в современных гидроприводах отечественного производства широкое распространение нашли поршневые гидроцилиндры двухстороннего действия серии С (С75/30, С90/30, С100/40), которые имеют идентичную конструкцию, но различаются размерами диаметров штоков, гильз и поршней.

Рассмотрим принцип работы гидроцилиндров (рис. 1).

В процессе работы гидроцилиндра происходит поступательное перемещение штока 6 и поршня 5 относительно гильзы 4 и передней крышки 1 за счет создаваемого насосом давления масла в штоковой полости (рис. 1). При этом на детали гидроцилиндра действуют осевая и радиальная нагрузки, в результате чего происходит износ сопрягаемых

поверхностей узлов. Согласно исследованиям отечественных и зарубежных ученых погнутость штока, износы рабочих поверхностей деталей поршневого и штокового узлов приводят к смещению оси поршня и штока относительно оси передней крышки и гильзы, вследствие чего снижается коэффициент полезного действия гидроцилиндра [2–5].

В настоящее время для восстановления изношенных поверхностей деталей гидроагрегатов широко используется метод электроискровой обработки [6–8], который позволяет получать металлопокрытия с требуемыми физико-механическими свойствами [2; 8]. При этом ресурс отремонтированных с применением электроискровой наплавки гидроагрегатов не ниже ресурса новых агрегатов [1; 9; 10]. Однако недостатком метода электроискровой обработки является ограничение по толщине полученных покрытий [11; 12]. Поэтому, с целью выявления необходимости восстановления деталей и выбора рациональных режимов нанесения покрытий, необходимы данные о допустимых



Р и с. 1. Принцип работы гидроцилиндра серии С: 1 – передняя крышка; 2 – задняя крышка; 3 – маслопровод; 4 – гильза; 5 – поршень; 6 – шток

F i g. 1. The principle of operation of a C series hydraulic cylinder: 1 – front cover; 2 – rear cover; 3 – oil line; 4 – sleeve; 5 – piston; 6 – rod

<sup>1</sup> Гранкина Е. В. Обеспечение работоспособности штоковых уплотнительных узлов при ремонте гидроцилиндров путем применения рационального способа восстановления штока: дис. канд. ... техн. наук. Л., 1989. 158 с.

значениях износов их рабочих поверхностей. То есть тех значений износов, при достижении которых коэффициент полезного действия гидроцилиндра соответствует допустимому значению и его дальнейшая эксплуатация невозможна. Однако в технических требованиях на капитальный ремонт и другой технической документации данные о допустимых значениях износов деталей гидроцилиндров в настоящее время отсутствуют.

Целью работы является определение допустимых значений износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С.

### Обзор литературы

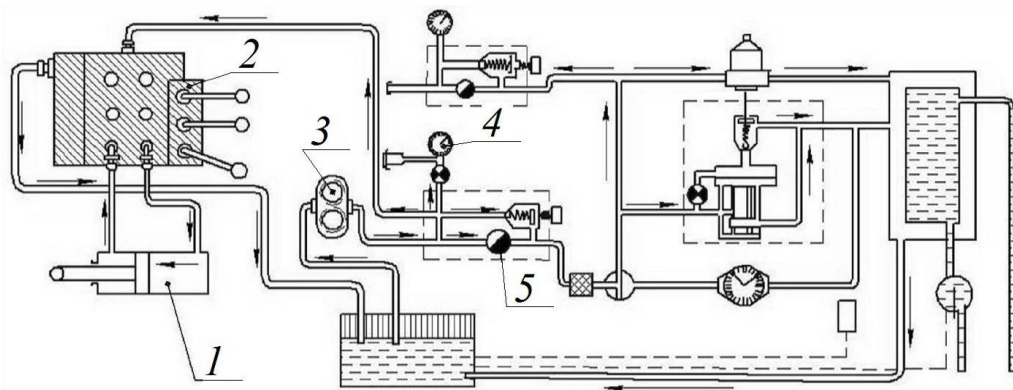
В ремонтном производстве важнейшей задачей является оценка технического состояния и определение значений функциональных параметров работоспособности гидроцилиндров.

В исследованиях ряда ученых<sup>2</sup> представлен способ оценки технического

состояния по параметрам герметичности уплотнительных узлов гидроцилиндров на стенде КИ-4815М (рис. 2).

Оценка параметров герметичности штокового и поршневого уплотнительных узлов гидроцилиндра осуществляется при установке и неподвижном закреплении поршня в среднее или в крайнее положение. Рукав поршневой полости масляной магистрали, отсоединенный от гидрораспределителя, опускают в мерный стакан. При помощи дросселя стенда проводят установку давления в штоковой полости гидроцилиндра равную 100 кгс/см<sup>2</sup>. Утечки масла через поршневое и штоковое уплотнительные соединения собирают в мерную колбу. Исследования показали, что оценка технического состояния гидроцилиндров описанным способом применима только в случае нарушения целостности уплотнителей<sup>3</sup>.

Известен метод оценки технического состояния гидроцилиндров примене-



Р и с. 2. Схема испытания гидроцилиндров на герметичность:

1 – гидроцилиндр; 2 – распределитель; 3 – насос; 4 – манометр; 5 – дроссель

F i g. 2. Scheme of testing of a hydraulic cylinder for tightness:

1 – hydraulic cylinder; 2 – distributor; 3 – pump; 4 – pressure gauge; 5 – throttle

<sup>2</sup> Ачкасов К. А., Вегера В. П. Ремонт приборов системы питания и гидравлической системы тракторов, автомобилей и комбайнов: учебник. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. школа, 1981. 288 с.; Черкун В. Е. Ремонт тракторных гидравлических систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1984. 253 с.

<sup>3</sup> Бурмукулов Ф. Х., Величко С. А., Чумаков П. В. Анализ причин потери работоспособности силовых цилиндров гидросистем тракторов / Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем // Материалы Всерос. научн.-техн. конф., 19–23 окт. 2009 г. / редкол.: П. В. Сенин [и др.]. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 23–25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28903621> (дата обращения: 20.05.2019).

нием сжатого воздуха<sup>4</sup>, который состоит из следующих этапов:

– при помощи тягового гидроцилиндра поршень диагностируемого цилиндра устанавливают в крайнее положение;

– поршню диагностируемого гидроцилиндра с помощью распределителя придается возвратно-поступательное движение;

– в диагностируемой полости гидроцилиндра устанавливают необходимое давление воздуха. Заполнение диагностируемой полости воздухом происходит через блок обратных клапанов;

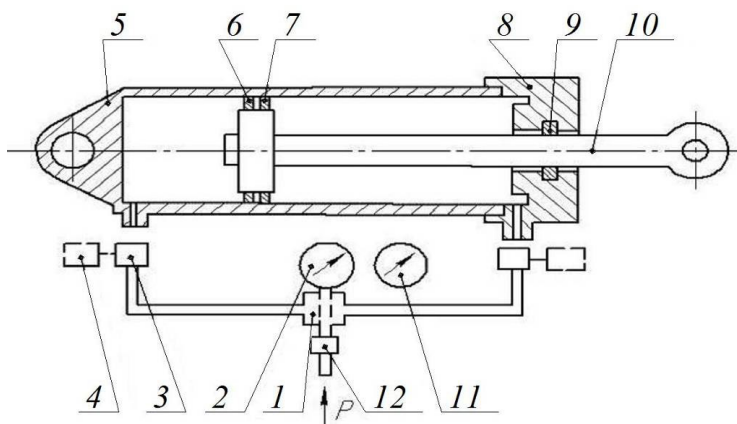
– во время движения штока в сторону уменьшения объема диагностируемой полости гидроцилиндра воздух через редукционный клапан и блок обратных клапанов поступает на газовый счетчик;

– по истечении установленного количества циклов (полных ходов штока) фиксируется показание счетчика. По разности из полученного значения

показаний первоначального счетчика судят о техническом состоянии гидроцилиндра.

Способ оценки герметичности уплотнительных узлов гидроцилиндров по скорости утечки из рабочих полостей воздуха описан Д. Ю. Кобзовым, С. В. Усовой: «прибор (рис. 3) содержит распределитель воздуха 1, который имеет один входной канал, связанный через обратный клапан 12 с воздушной магистралью, и три выходных канала, соединяемые с контролируемой рабочей полостью гидроцилиндра, заглушкой 4 и манометром 2. Для контроля герметичности уплотнений прибор подключают поочередно к полостям гидроцилиндра. Время падения давления воздуха от 0,30 до 0,25 МПа не должно быть менее 60 с» [13].

Данный способ не позволяет достаточно точно оценивать герметичность уплотнительных узлов, из-за того что поршневая и штоковая полости гидроцилиндра имеют совершенно разные



Р и с. 3. Схема контроля герметичности уплотнений по скорости утечки воздуха:

- 1 – распределитель воздуха; 2 – манометр; 3, 4 – заглушки и штуцеры; 5, 8, 10 – корпус, передняя крышка и шток гидроцилиндра; 6, 7, 9 – уплотнительные манжеты; 11 – секундомер; 12 – обратный клапан

F i g. 3. Scheme of leakage control seals for leak rate of air:

- 1 – air distributor; 2 – pressure gauge; 3, 4 – replaceable fittings and plugs; 5, 8, 10 – hull, the cover and the rod of the hydraulic cylinder; 6, 7, 9 – sealing cuffs; 11 – time indicator; 12 – check valve

<sup>4</sup> Ереско С. П. Система управления надежностью уплотнений подвижных соединений гидроагрегатов строительных машин: дис... д-ра техн. наук. Красноярск, 2003. 425 с.

объемы. Значит, объем заполняемого воздуха, а соответственно и время падения давления будут разными при одном и том же уплотнительном узле.

В ГОСТе 18464–96 и типовой программе приема-сдаточных испытаний ПИ-00100102.00.00.01, разработанной крупнейшим производителем гидроагрегатов в стране ЗАО «Гидросила», представлена методика и условия оценки технического состояния по удельному объему рабочей жидкости, выносимой поверхностью штока, и общему коэффициенту полезного действия гидроцилиндра во время движения поршня при номинальных тяговом, или тянущем, усилии и давлении.

Анализ показал, что существующие методы оценки технического состояния силовых гидроцилиндров не дают возможности находить их функциональные параметры работоспособности соответствующими ГОСТу 16514–96.

Оценка технического состояния деталей гидроцилиндров определением угла несоосности штока и гильзы позволяет оценивать нарушение работоспособности гидроцилиндров, вызванное износом сопрягаемых деталей, но никак не выявляет дефекты на рабочих поверхностях<sup>5</sup>. Так же угол несоосности штока и гильзы невозможно определить при погнутом штоке [14].

Рассмотренные выше способы не дают точной оценки технического состояния гидроцилиндров. Об этом говорит и тот факт, что испытания проводятся в неподвижном положении и без силовой нагрузки испытуемого гидроцилиндра.

## Материалы и методы

В соответствии с ГОСТом 16514–96, критерием предельного состояния гидроцилиндров принято «снижение общего коэффициента полезного действия не более чем на 20 % и увеличение удельного объема выносимой рабочей жидкости более чем в 1,2 раза от установленного значения»<sup>6</sup>. Для гидроцилиндров серии С предельное расчетное значение общего коэффициента полезного действия составило 0,728.

С целью оценки технического состояния гидроцилиндров с учетом требований ГОСТа 16514–96, разработано устройство на базе стенда КИ-28097М-ГОСНИТИ, оснащенное нагрузочным гидроцилиндром и независимой гидростанцией. При помощи данного устройства по методике, представленной в нашей работе<sup>7</sup>, проводились стендовые испытания бывших в эксплуатации гидроцилиндров серии С с определением значений общего коэффициента полезного действия  $\eta_{\text{ц}}$ . Испытания проводились на индустриальном масле марки И-20, имеющем при температуре 50 °С вязкость (60...70) 10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с. Температура масла при испытании составляла 50±5 °С.

Микрометражным исследованием подвергались рабочие поверхности следующих деталей гидроцилиндров: шток, поршень, передняя крышка, гильза [1].

## Результаты исследования

По результатам стендовых испытаний технического состояния гидроцилиндров моделей С75, С90 и С100 составлены вариационные ряды значений общего коэффициента полезного

<sup>5</sup> Бурумкулов Ф. Х., Величко С. А., Чумаков П. В. Анализ причин потери работоспособности силовых цилиндров гидросистем тракторов / Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем // Материалы Всерос. научн.-техн. конф., 19–23 окт. 2009 г. / редкол.: П. В. Сенин [и др.]. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 23–25.

<sup>6</sup> ГОСТ 16514–96. С 6.

<sup>7</sup> Чумаков П. В., Величко С. А. Совершенствование устройства для оценки технического состояния силовых гидроцилиндров в условиях предприятий технического сервиса АПК / Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы // Межвузовский сборник научных трудов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 284–289.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Параметры статистики выборок общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров**  
**Statistic parameters of samples of total efficiency factor of hydraulic cylinders**

Модель гидроцилиндра / Model of the hydraulic cylinder	N	$\bar{X}$	$\sigma$	Диапазон значений / Range of values		$P_w$
				$X_{max}$	$X_{min}$	
C75	60	0,760	0,073	0,822	0,476	0,0000
C90	60	0,764	0,075	0,822	0,510	0,0000
C100	60	0,766	0,063	0,823	0,572	0,0000

действия. Результаты статистической обработки вариационных рядов общего коэффициента полезного действия представлены в таблице 1 отдельно для каждой группы моделей гидроцилиндров.

Проверка групп измерений на нормальность показала (табл. 1), что для исследуемых моделей гидроцилиндров показатель уровня значимости критерия Шапиро – Уилка  $p_w < 0,05$ . Это отвергает нулевую гипотезу о нормальном распределении значений выборок общего коэффициента полезного действия.

Результат сравнения выборок на расходимость показывает, что уровень значимости  $KW$ -критерия  $p_{KW} = 0,8303$  больше  $p = 0,05$ , следовательно, гипотеза их расхождения отвергается, и все исследуемые выборки относятся к одной генеральной совокупности.

В таблице 2 представлены параметры закона распределения Вейбулла объединенной выборки общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров.

Из рисунка 4 видно, что по параметру общего коэффициента полезного действия 19,5 % гидроцилиндров эксплуатировались в запредельном состоянии.

Номинальные размеры исследуемых рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С представлены в таблице 3.

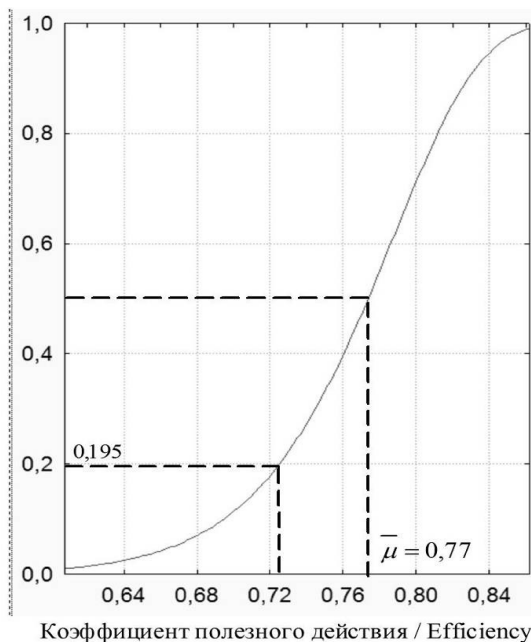
Значения износов определялись величиной выхода действительного размера поверхностей деталей гидроцилиндров за пределы поля допуска номинального размера.

Результаты статистической обработки вариационных рядов износов де-

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Параметры закона распределения Вейбулла общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров**  
**Parameters of the Weibull distribution of the total efficiency factor of hydraulic cylinders**

Математическое ожидание двухпараметрической функции / Expectation of a two-parameter function	$\mu$	0,77
Параметры закона распределения Вейбулла / Parameters of the Weibull distribution	$\alpha$	17,52
	$b$	0,79
Критерий Холландера – Прошана / Hollander – Proshan Criterion	$P_{HP}$	0,1046



Р и с. 4. Функция распределения общего коэффициента полезного действия  
 F i g. 4. Distribution function of the total efficiency factor

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

**Номинальные размеры исследуемых поверхностей деталей гидроцилиндров серии C**  
**Nominal dimensions of the investigated surfaces of C series hydraulic cylinder parts**

Деталь гидроцилиндра / Detail of the hydraulic cylinder	Износы и дефекты поверхностей / Surface wear and defects	Размеры деталей по чертежу для моделей гидроцилиндров / Dimensions of parts according to the drawing for models of hydraulic cylinders		
		C75	C90	C100
Передняя крышка гидроцилиндра / Front cover of the hydraulic cylinder	Износ внутренней поверхности, сопрягаемой со штоком / Wear of the inner surface to be mated with the rod	Ø30 <sup>+0,052</sup>		Ø40 <sup>+0,052</sup>
Шток / Rod	Износ наружной поверхности / Wear of the outer surface	Ø30 <sup>-0,025</sup> <sub>-0,085</sub>		Ø40 <sup>-0,032</sup> <sub>-0,100</sub>
	Прогиб / Deflection	не более 0,1 мм / not more than 0,1 mm		
Гильза гидроцилиндра / Hydraulic cylinder liner	Износ внутренней поверхности / Wear of the inner surface	Ø75 <sup>+0,06</sup>	Ø90 <sup>+0,07</sup>	Ø100 <sup>+0,035</sup>
Поршень / Piston	Износ наружной поверхности, сопрягаемой с гильзой гидроцилиндра / Wear of the outer surface to be mated with the cylinder liner	Ø75 <sup>-0,03</sup> <sub>-0,06</sub>	Ø90 <sup>-0,04</sup> <sub>-0,075</sub>	Ø100 <sup>-0,04</sup> <sub>-0,075</sub>

талей отдельно для каждой группы моделей гидроцилиндров представлены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что показатель уровня значимости критерия Шапиро – Уилка для исследуемых вариационных рядов износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров  $p_W < 0,05$ . Это отвергает нулевую гипотезу о нормальном распределении значений износов в выборках.

Таким образом, для анализа исследуемых выборок на расходимость в изучаемых моделях гидроцилиндров C75, C90, C100, воспользуемся  $KW$ -критерием. Результаты оценки представлены в таблице 5.

Представленная в таблице 5 оценка выборок на расходимость показала, что уровень значимости критерия Краскела – Уоллиса более 0,05, то есть нулевая гипотеза их расхождения отвергается,

Т а б л и ц а 4

**Параметры статистики выборок износов деталей гидроцилиндров**

Наименование детали гидроцилиндра	$\bar{X}$	Диапазон износа		$\sigma$	$p_W$
		$X_{\max}$	$X_{\min}$		
<b>C75</b>					
Износ отверстия под шток передней крышки, мкм	188,58	86	728	118,03	0,00000
Погнутость штока, мкм	729,13	130	2000	516,50	0,0002
Износ наружной поверхности штока, мкм	14,53	6	24	4,61	0,0082
Износ внутренней поверхности гильзы цилиндра, мкм	66,68	24	164	30,33	0,0003
Износ наружной поверхности поршня, мкм	103,33	40	235	54,39	0,000004
<b>C90</b>					
Износ отверстия под шток передней крышки, мкм	234,0	90	722	162,52	0,00000
Погнутость штока, мкм	771,07	148	2000	500,10	0,0014
Износ наружной поверхности штока, мкм	15,67	6	24	4,96	0,0254
Износ внутренней поверхности гильзы цилиндра, мкм	65,97	46	158	25,44	0,00000
Износ наружной поверхности поршня, мкм	111,16	52	230	53,20	0,000004
<b>C100</b>					
Износ отверстия под шток передней крышки, мкм	235,93	90	90–724	147,18	0,00000
Погнутость штока, мкм	600,6	120	2000	415,39	0,0001
Износ наружной поверхности штока, мкм	15,87	8	24	5,02	0,0005
Износ внутренней поверхности гильзы цилиндра, мкм	64,33	40	155	24,44	0,0000008
Износ наружной поверхности поршня, мкм	116,07	30	242	58,46	0,00001



Table 4

## Statistic parameters of samples of hydraulic cylinder parts wear

Name of hydraulic cylinder part	$\bar{X}$	Wear range		$\sigma$	$p_W$
		$X_{\max}$	$X_{\min}$		
<b>C75</b>					
Wear the holes for the stock front cover, $\mu\text{m}$	188,58	86	728	118,03	0,00000
The curvature of the rod, $\mu\text{m}$	729,13	130	2000	516,50	0,0002
Wear of the outer surface of the rod, $\mu\text{m}$	14,53	6	24	4,61	0,0082
Wear of the inner surface of the cylinder, $\mu\text{m}$	66,68	24	164	30,33	0,0003
Wear the outer surface of the piston, $\mu\text{m}$	103,33	40	235	54,39	0,000004
<b>C90</b>					
Wear the holes for the stock front cover, $\mu\text{m}$	234,0	90	722	162,52	0,00000
The curvature of the rod, $\mu\text{m}$	771,07	148	2000	500,10	0,0014
Wear of the outer surface of the rod, $\mu\text{m}$	15,67	6	24	4,96	0,0254
Wear of the inner surface of the cylinder, $\mu\text{m}$	65,97	46	158	25,44	0,00000
Wear the outer surface of the piston, $\mu\text{m}$	111,16	52	230	53,20	0,000004
<b>C100</b>					
Wear the holes for the stock front cover, $\mu\text{m}$	235,93	90	90–724	147,18	0,00000
The curvature of the rod, $\mu\text{m}$	600,6	120	2000	415,39	0,0001
Wear of the outer surface of the rod, $\mu\text{m}$	15,87	8	24	5,02	0,0005
Wear of the inner surface of the cylinder, $\mu\text{m}$	64,33	40	155	24,44	0,0000008
Wear the outer surface of the piston, $\mu\text{m}$	116,07	30	242	58,46	0,00001

Таблица 5

Table 5

Результаты сравнения выборок на расходимость по  $KW$ -критериюThe results of the comparison of samples for divergence on  $KW$ -criterion

Исследуемые выборки / The study sample	Уровень значимости $KW$ -критерия / The significance level $KW$ -criterion
Износ отверстия передней крышки $U_{PC}^*$ , мкм / The wear holes on the front cover $U_{PC}^*$ , $\mu\text{m}$	0,0844
Износ штока $U_{ST}^*$ , мкм / Wear of the outer surface of the rod $U_{ST}^*$ , $\mu\text{m}$	0,3087
Погнутость штока $g_{ST}^*$ , мкм / Curvature of the rod $g_{ST}^*$ , $\mu\text{m}$	0,1971
Износ гильзы $U_G^*$ , мкм / Wear of the liner $U_G^*$ , $\mu\text{m}$	0,8128
Износ поршня $U_P^*$ , мкм / Wear of the piston $U_P^*$ , $\mu\text{m}$	0,3274

соответственно все они принадлежат одной генеральной совокупности.

Параметры дескриптивной статистики, законы распределения Вейбулла и критерий качества подгонки (*HP*) выборок износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров представлены в таблице 6.

Для проведения регрессионного анализа принята выборка гидроцилиндров, у которых по результатам стендовых испытаний установлено значение общего коэффициента полезного действия (зависимая переменная) и со-

ответствующие ему износы рабочих поверхностей деталей (независимые переменные). Количество гидроцилиндров исследуемых моделей выбрано в равном процентном соотношении, беря во внимание, что число наблюдений должно быть больше числа предикторов в 10 раз. Проверку однородности выборок зависимой и независимых переменных проводили по критерию Манна – Уитни.

В таблице 7 представлены результаты статистической обработки вариационных рядов зависимой перемен-

Таблица 6  
Table 6

Статистические характеристики объединенных выборок износов деталей гидроцилиндров  
Statistic characteristics of the merged samples, wear parts of hydraulic cylinders

Обобщенные выборки / Generalized samples	$X$	Диапазон износа / Wear range		$\sigma$	Параметры закона Вейбулла / Parameters of the Weibull distribution		$\mu$	$P_{HP}$	
		$X_{max}$	$X_{min}$		$\alpha$	$b$			
$U_{PC}^*$	мкм / $\mu\text{m}$	219,7	86	728	144,7	248,7	1,7	200,5	0,2906
$U_{ST}^*$		15,4	6	24	4,9	17,1	3,5	15,4	0,6225
$g_{ST}^*$		700,3	120	2000	482,5	780,3	1,52	613,1	0,6889
$U_G^*$		65,7	24	164	26,7	74,04	2,6	64,3	0,3232
$U_P^*$		110,2	30	242	55,3	125,2	2,2	106,0	0,3594

Таблица 7  
Table 7

Параметры дескриптивной статистики и оценка однородности выборок зависимой и независимых переменных  
Parameters of descriptive statistics and evaluation of uniformity of samples of dependent and independent variables

Обобщенные выборки / Generalized samples	$N$	$\bar{X}$	Диапазон износа / Wear range		$\sigma$	$p_U$
			$X_{max}$	$X_{min}$		
$U_{ST}$	60	13,8	6	24	4,16	0,0615
$U_{PC}$		208,3	86	728	145,9	0,1687
$U_P$		105,1	30	242	56,3	0,4012
$U_G$		66,9	24	164	30,2	0,9555
$g_{ST}$		728,1	120	2000	510,8	0,8183
$\eta_C$		0,764	0,476	0,823	0,073	0,9136

ной – коэффициент полезного действия гидроцилиндра  $\eta_C$  – и независимых: износ отверстия передней крышки  $U_{PC}$ , мкм; износ штока  $U_{ST}$ , мкм; погнутость штока  $g_{ST}$ , мкм; износ внутренней поверхности гильзы  $U_G$ , мкм; износ наружной поверхности поршня  $U_P$ , мкм.

Из таблицы 7 видно, что для всех сформированных для регрессионного анализа выборок уровень значимости критерия Манна – Уитни  $p_U$  больше принятого 5-процентного уровня, следовательно, все выборки однородны и взяты из соответствующих им генеральных совокупностей.

Тогда, уравнение линейной множественной регрессии в натуральном масштабе запишем в виде:

$$\eta_C = \beta_0 + \beta_1 \cdot U_{ST} + \beta_2 \cdot U_{PC} + \beta_3 \cdot U_P + \beta_4 \cdot U_G + \beta_5 \cdot g_{ST}. \quad (1)$$

Корреляционный анализ модели 1 показал, что коэффициент множественной корреляции между переменными имеет значение  $R = 0,999$ , а коэффициент детерминации  $R^2 = 0,998$  ( $\bar{R}^2 = 0,998$ ). В связи с чем можно утверждать, что полученное регрессион-

ное уравнение объясняет 99 % разброса значений общего коэффициента полезного действия относительно среднего значения.

В таблице 8 приведены значения попарных коэффициентов корреляции между факторами.

Согласно данным таблицы 8, функциональная связь между независимыми переменными отсутствует. По этой причине все независимые переменные включаются в многофакторный регрессионный анализ.

Согласно оценке коэффициентов уравнения (1) по методу наименьших квадратов, все независимые переменные статистически значимы, поэтому они приняты для дальнейшего анализа.

Проведенный многофакторный регрессионный анализ показал, что коэффициенты статистической связи между зависимой переменной и всеми независимыми имеют значения, соответствующие представленным в таблице 9.

Из таблицы 9 видно, что у фактора «износ штока  $U_{ST}$ » уровень значимости текущего значения  $t$ -критерия Стьюдента ( $p_i$ ) выше принятого значения  $p_i = 0,05$ , откуда следует, что он статистически значительно не оказывает

Таблица 8

Table 8

**Значения попарных коэффициентов корреляции между факторами**  
**The values of pairwise correlation coefficients between the factors**

Множественная корреляция / Multiple correlation	Коэффициенты попарной корреляции / The coefficients of pairwise correlations					
Факторы / factors	$U_{ST}$	$U_{PC}$	$U_P$	$U_G$	$g_{ST}$	$\eta_C$
$U_{ST}$	1,000000	-0,099771	-0,018331	-0,060578	-0,023003	0,106387
$U_{PC}$	-0,099771	1,000000	0,947543	0,962480	0,951520	-0,997452
$U_P$	-0,018331	0,947543	1,000000	0,983074	0,990915	-0,928723
$U_G$	-0,060578	0,962480	0,983074	1,000000	0,984855	-0,952146
$g_{ST}$	-0,023003	0,951520	0,990915	0,984855	1,000000	-0,934201
$\eta_C$	0,106387	-0,997452	-0,928723	-0,952146	-0,934201	1,000000

**Коэффициенты связи между зависимой переменной и независимыми**  
**Relationship coefficients between the dependent variable and the independent variables**

N = 60	Множественный регрессионный анализ: зависимая величина ( $\eta_C$ ) / Multiple regression analysis: dependent quantity ( $\eta_C$ ); $R = 0,999$ ; $R^2 = 0,998$ ; $F = 6406,9$ ; $S_{\bar{v}/\Sigma z} = 0,00315$					
	$b_i$	Ст. ош. $b_i$	$\beta_i$	Ст. ош. $\beta_i$	$t(107)$	$p_i$ -уровень / $p_i$ -level
Свободный член $\beta_0$ / Free member $\beta_0$	–	–	0,874752	0,002763	316,5689	0,000000
$U_{ST}$	-0,01067	0,005753	-0,000188	0,000101	-1,8554	0,069001
$U_{PC}$	<b>-1,12045</b>	<b>0,020022</b>	<b>-0,000563</b>	<b>0,000010</b>	<b>-55,9606</b>	<b>0,000000</b>
$U_P$	<b>0,21128</b>	<b>0,043784</b>	<b>0,000275</b>	<b>0,000057</b>	<b>4,8255</b>	<b>0,000012</b>
$U_G$	<b>-0,18697</b>	<b>0,036621</b>	<b>-0,000455</b>	<b>0,000089</b>	<b>-5,1054</b>	<b>0,000004</b>
$g_{ST}$	<b>0,10631</b>	<b>0,044861</b>	<b>0,000015</b>	<b>0,000006</b>	<b>2,3698</b>	<b>0,021398</b>

Примечание: полужирным шрифтом выделены значимые факторы / Note: significant factors are highlighted in bold

влияние на зависимую переменную – коэффициент полезного действия гидроцилиндра.

В результате математическая модель зависимости общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров от статистически значимых, независимых факторов имеет вид:

$$\eta_C = 8,75 \cdot 10^{-1} - 5,63 \cdot 10^{-4} \cdot U_{PC} + 2,75 \cdot 10^{-4} \cdot U_P - 4,55 \cdot 10^{-4} \cdot U_G + 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot g_{ST}. \quad (2)$$

Проверка по критерию Фишера показала, что расчетное значение  $F = 6649,1$  больше критического  $F_{кр} = 5,54$ , а уровень значимости  $p_F = 0,0000$ , следовательно, полученная регрессия (2) высоко значима и по данному критерию адекватно описывает статистическую связь исследуемых факторов.

Стандартная ошибка оценки, или мера рассеяния экспериментальных значений относительно регрессионной прямой,  $S_{\bar{v}/\Sigma z} = 0,00309$  меньше, чем 5 % от среднего значения функции отклика равного 0,0382.

Оценка остатка по критерию Дарбина – Уотсона показала, что  $d = 1,87$ ;  $p_{DU} = 0,017$ . В этом случае проверяется гипотеза: остатки независимы, то есть  $\rho = 0$ , против альтернативы  $\rho < 0$ .

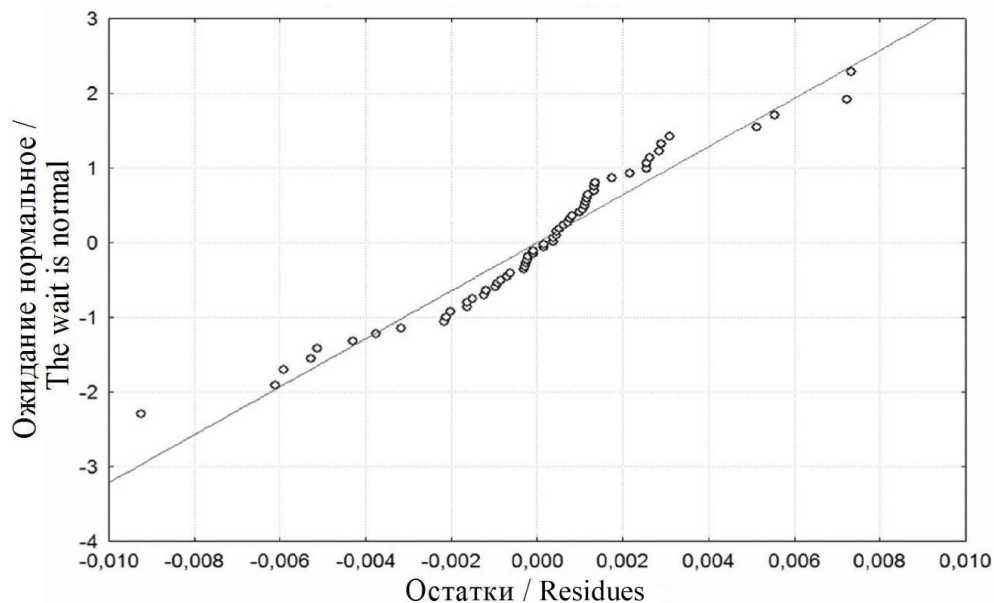
Так как  $d = 1,87 > DU - 3(d_{кр}) = 1,73$ , то гипотеза о независимости остатков регрессионной модели (2) на 5-процентном уровне не отвергается.

Для дальнейшей проверки адекватности модели (2) рассмотрим график распределения остатков (рис. 5), из которого видно, что они достаточно хорошо аппроксимируются нормальным распределением.

При этом видно (рис. 6), что остатки хаотично разбросаны, слабо коррелированы между собой, в их поведении нет закономерности.

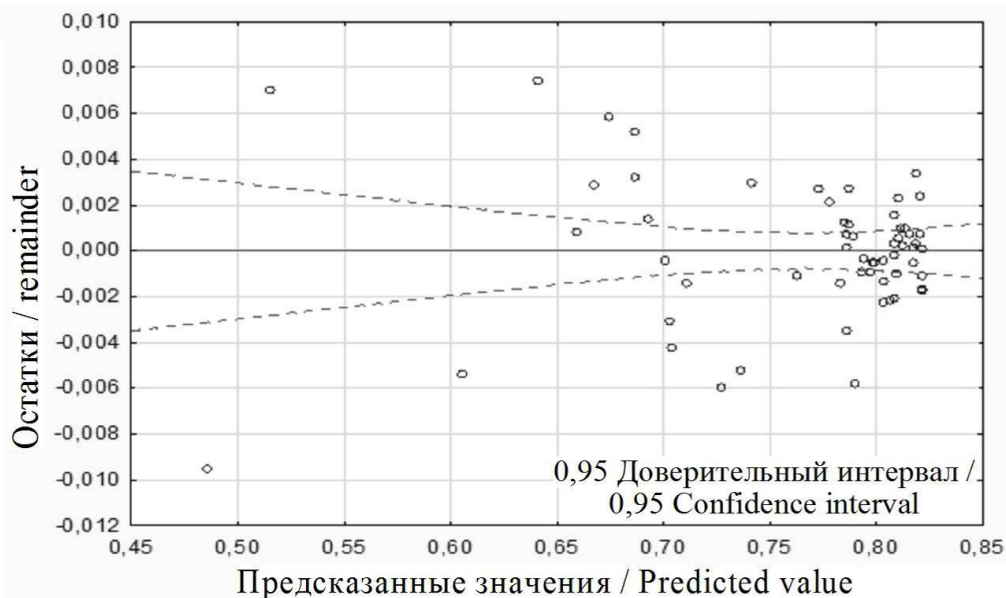
Таким образом, по совокупности исследованных критериев математическая модель (2) вполне адекватно описывает наблюдаемую статистическую связь коэффициента полезного действия гидроцилиндров с износами деталей и погнутостью штока.

Проверка модели (2) по среднему значению показала, что расчетное зна-



Р и с. 5. График нормального распределения остатков функции отклика

F i g. 5. Graph of the normal distribution of residues of response function



Р и с. 6. Экспериментальные величины остатков и удаленных остатков

F i g. 6. Experimental values of the residuals and the remote residues

чение  $\eta_c = 0,766$  меньше среднего значения функции отклика ( $\eta_c = 0,7664$ ), полученного экспериментально, не более чем на 0,5 %.

Анализ значений стандартизованного коэффициента регрессии статистически значимых факторов по модулю  $|b_i|$  показал, что наибольшее влияние на коэффициент полезного действия гидроцилиндра оказывает износ поверхности отверстия передней крышки ( $b_i = |1,11528|$ ). Степень влияния износов рабочих поверхностей поршневого узла значительно меньше. Отсюда можно сделать обоснованное заключение, что ресурс гидроцилиндра определяется износостойкостью деталей поршневого уплотнительного узла и, в частности, рабочей поверхностью отверстия передней крышки.

Для определения соответствия износов предельному значению общего

коэффициента полезного действия гидроцилиндров  $\eta_c = 0,728$  применялся метод крутого восхождения.

Минимальное ( $X_{\min}$ ) и максимальное ( $X_{\max}$ ) значения выборки взяты из таблицы 4. Произведение  $\beta_i \cdot \Delta X_i$  вычислялось по каждому фактору (табл. 10). Наибольшее значение по абсолютной величине составило 0,18 для  $U_{PC}$  (этот фактор принят как базовый).

В таблице 10 представлены параметры метода крутого восхождения. Указанные в таблице 10 факторы увеличивались от минимальных значений. Оптимизация проводилась до тех пор, пока общий коэффициент полезного действия не превысил значение 0,728.

Из таблицы 10 видно, что, в соответствии с выбранным шагом, наиболее близким к предельному значению общего коэффициента полезного действия

Таблица 10  
Table 10

**Параметры метода крутого восхождения  
Parameters of the method of steep climbing**

Параметр / Parameter	$U_{PC}, \text{ мкм} /$ $U_{PC}, \mu\text{m}$	$U_p, \text{ мкм} /$ $U_p, \mu\text{m}$	$U_G, \text{ мкм} /$ $U_G, \mu\text{m}$	$g_{ST}, \text{ мкм} /$ $g_{ST}, \mu\text{m}$	$\eta_c$
$X_{\min}$	86	30	24	120	
$X_{\max}$	728	242	164	2000	
$\beta_i$	$5,63 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	
$\Delta X$	321	106	70	940	
$X_{\text{main}}$	407	136	94	1060	
$\beta_i \cdot \Delta X_i$	0,18	0,0292	0,0319	0,0141	
$\lambda_{\text{ш}} = \mu /  \beta_0 $	17,762	36,364	21,978	666,667	
$\lambda_{\text{ш}}(\beta_i \cdot \Delta X_i)$	3,2	1,06	0,70	9,4	
Опыты на линии восхождения / Experiments on the line of ascent					
1	86	30	24	120	0,825
2	89,2	31,06	24,7	129,4	0,824
–	–	–	–	–	–
59	271,6	91,48	64,6	665,2	0,728
60	274,8	92,54	65,3	674,6	0,726
61	278	93,6	66	684	0,724

вия является значение 59 шага – 0,728. В связи с тем что значения износов не могут быть дробными, они округляются до целых. Таким образом, определены значения предельных износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С:  $U_{PC} = 272$  мкм,  $U_P = 91$  мкм,  $U_G = 65$  мкм,  $g_{ST} = 665$  мкм. Коэффициент полезного действия гидроцилиндров при принятых значениях износов составляет 0,728.

#### Обсуждение и заключение

Стандовые испытания бывших в эксплуатации гидроцилиндров серии С показали, что по параметру общего коэффициента полезного действия

19,5 % гидроцилиндров эксплуатировались в запредельном состоянии.

Получена регрессионная модель связи общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров серии С с износами рабочих поверхностей деталей, согласно которой их предельные значения составили:  $U_{PC} = 272$  мкм,  $U_P = 91$  мкм,  $U_G = 65$  мкм,  $g_{ST} = 665$  мкм. Полученные значения износов рабочих поверхностей деталей гидроцилиндров серии С при их ремонте в условиях предприятий технического сервиса позволят принять решение о необходимости восстановления данных поверхностей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Величко С. А. Прогнозирование среднего ресурса гидроцилиндров, отремонтированных с восстановлением деталей электроискровым методом // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 120. С. 114–121. URL: <http://www.gosniti.ru/forms/t120.doc> (дата обращения: 20.05.2019).
2. Величко С. А., Сенин П. В., Чумаков П. В. Пути повышения межремонтного ресурса силовых гидроцилиндров // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 4. С. 36–41. URL: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=2229](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2229) (дата обращения: 20.05.2019).
3. Кинематический анализ причин отказов силовых гидроцилиндров автотракторной техники / В. Н. Водяков [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 128. С. 47–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29871178> (дата обращения: 20.05.2019).
4. Featured Temporal Segmentation Method and Adaboost-BP Detector for Internal Leakage Evaluation of a Hydraulic Cylinder / L. Lin [et al.] // Measurement. 2018. Vol. 130. Pp. 279–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.029>
5. Cristescu C., Radoi R., Dumitrescu C., Dumitrescu L. Experimental Research on Energy Losses Through Friction in Order to Increase Lifetime of Hydraulic cylinders // 13<sup>th</sup> International Conference on Tribology. 2017. Vol. 174. Pp. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/174/1/012011>
6. Нанозлектротехнологии для повышения межремонтного ресурса агрегатов машинно-тракторного парка сельского хозяйства / Ф. Х. Бурумкулов [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2007. Т. 99. С. 85–94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28834809> (дата обращения: 20.05.2019).
7. Ivanov V. I., Solovov S. A., Velichko S. A., Ignatkov D. A. Analysis of Electric Pulsed Processes in Electrospark Treatment of Metallic Surfaces in a Gas Medium // Welding International. 2017. Vol. 31, no. 4. Pp. 312–319. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257244>
8. The Properties of Nanocomposite Coatings Formed on a Steel 20 H Surface by Means of Electrospark Processing Using Rod-Shaped Electrodes of Steels 65 G and Sv 08 / F. Kh. Burumkulov [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2009. Т. 45. № 6. Pp. 455–460. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375509060039> (дата обращения: 20.05.2019).
9. Ресурсосбережение на основе повышения межремонтной наработки изделия / Ф. Х. Бурумкулов [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2008. № 5. С. 19–23. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11704166> (дата обращения: 20.05.2019).
10. Бурумкулов Ф. Х., Величко С. А., Чумаков П. В. Ресурсосбережение на основе повышения межремонтной наработки силовых гидроцилиндров // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 109, № 1. С. 110–114. URL: <http://www.gosniti.ru/documents/articles/69.pdf> (дата обращения: 20.05.2019).
11. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders / S. A. Velichko [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2017. Vol. 53, no. 2. Pp. 116–123. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>

12. Бурумкулов Ф. Х., Лялякин В. П., Пушкин И. А. Электроискровая обработка металлов – универсальный способ восстановления изношенных деталей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001. № 4. С. 23–28. URL: [http://foliant.ru/catalog/psulibr?BOOK\\_UP+00087B+0DF291+-1+-1](http://foliant.ru/catalog/psulibr?BOOK_UP+00087B+0DF291+-1+-1) (дата обращения: 20.05.2019).

13. Кобзов Д. Ю., Усова С. В. Экспресс-диагностика несущей способности гидроцилиндров машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 174–179. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/ekspress-dagnostika-nesuschey-sposobnosti-gidrotsilindrov-mashin> (дата обращения: 20.05.2019).

14. Kobzov D., Kobzova I., Lkhanag D. Hydrocylinder Diagnostic Parameters // Systemi. Methodi. Tehnologii. 2009. № 3. Pp. 19–23. URL: [https://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/docs/number3/19-23.pdf](https://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/number3/19-23.pdf) (дата обращения: 20.05.2019).

*Поступила 18.03.2019; принята к публикации 10.05.2019; опубликована онлайн 30.09.2019*

*Об авторах:*

**Величко Сергей Анатольевич**, преподаватель кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 5), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: G-9021-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, [velichko2005@yandex.ru](mailto:velichko2005@yandex.ru)

**Чумаков Павел Васильевич**, преподаватель кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: G-8320-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, [pav-chumakov@yandex.ru](mailto:pav-chumakov@yandex.ru)

**Коломейченко Александр Викторович**, заведующий кафедрой надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ» (302019, Россия, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: D-6053-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3865-4486>, [kolom\\_sasha@inbox.ru](mailto:kolom_sasha@inbox.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

С. А. Величко – научное руководство, постановка задачи исследования, статистическая обработка данных, получение регрессионной модели связи общего коэффициента полезного действия гидроцилиндров с износами рабочих поверхностей деталей, защита докторской диссертации, в которую вошли представленные в данной статье научные результаты; П. В. Чумаков – анализ литературных данных, разработка методик, проведение экспериментальных исследований; А. В. Коломейченко – накопление статистических данных, анализ регрессионной модели и доработка текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Velichko S.A. Prediction of the Average Life of Hydraulic Cylinders Repaired with the Restoration of Parts by the Electric Spark Method. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2015; 120:114-121. Available at: <http://www.gosniti.ru/forms/t120.doc> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)

2. Velichko S.A., Senin P.V., Chumakov P.V. Ways of Increase of Overhaul Life of Power Cylinders. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya = Repair, Reconditioning, Modernization*. 2015; (4):36-41. Available at: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=2229](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2229) (accessed 20.05.2019). (In Russ.)

3. Vodakov V.N., Chumakov P.V., Velichko S.A., et al. Kinematic Analysis of the Causes of Failures of Power Cylinders Automotive Engineering. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2017; 128:47-54. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29871178> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)

4. Lin L., Yixiang H., Jianfeng T., et al. Featured Temporal Segmentation Method and AdaBoost-BP Detector for Internal Leakage Evaluation of a Hydraulic Cylinder. *Measurement*. 2018; 130:279-289. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.029>

5. Cristescu C., Radoi R., Dumitrescu C., Dumitrescu L. Experimental Research on Energy Losses Through Friction in Order to Increase Lifetime of Hydraulic cylinders. *Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Tribology*. 2017; 174. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/174/1/012011>



6. Burumkulov F.Kh., Velichko S.A., Ivanov V.I., et al. Nanoelectro-Technologies for Increasing the Overhaul Life of Aggregates of the Machinery and Tractor Fleet of Agriculture. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2007; 99:85-94. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28834809> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
7. Ivanov V.I., Solovov S.A., Velichko S.A., Ignatkov D.A. Analysis of Electric Pulsed Processes in Electrospray Treatment of Metallic Surfaces in a Gas Medium. *Welding International*. 2017; 31(4):312-319. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257244>
8. Burumkulov F.Kh., Senin P.V., Velichko S.A., et al. The Properties of Nanocomposite Coatings Formed on a Steel 20<sup>th</sup> Surface by Means of Electrospray Processing Using Rod-Shaped Electrodes of Steels 65 G and SV 08. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009; 45(6):455-460. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375509060039> (accessed 20.05.2019). (In Eng.)
9. Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I., Velichko S.A., et al. Resource-Sparing on the Base of Increasing Product Operating Time Between Repairs. *Technika v selskom khozyaystve = Machinery in Agriculture*. 2008; (5):19-23. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11704166> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
10. Burumkulov F.Kh., Velichko S.A., Chumakov P.V. Resource Conservation through Improved Turnaround Practices of Power Cylinders. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2012; 109(1):110-114. Available at: <http://www.gosniti.ru/documents/articles/69.pdf> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
11. Velichko S.A., Senin P.V., Ivanov V.I., et al. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017; 53(2):116-123. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>
12. Burumkulov F.Kh., Lyalyakin V.P., Pushkin I.A. Electric-Spark Treatment of Metals – Universal Method of Restoring Worn Parts. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva = Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2001; (4):23-28. Available at: [http://foliant.ru/catalog/psulibr?BOOK\\_UP+00087B+0DF291+-1+-1](http://foliant.ru/catalog/psulibr?BOOK_UP+00087B+0DF291+-1+-1) (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
13. Kobzov D.Y., Usova S.V. Rapid Diagnosis of Bearing Capacity of Hydraulic Machines. *Sovremennye tehnologii. Systemnii analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2009; (3):174-179. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/ekspress-diyagnostika-nesushey-sposobnosti-gidrotsilindrov-mashin> (accessed 20.05.2019). (In Russ.)
14. Kobzov D., Kobzova I., Lkhanag D. Hydrocylinder Diagnostic Parameters. *Systemi. Methodi. Tehnologii = Systems. Methods. Technology*. 2009; (3):19-23. Available at: [https://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/docs/number3/19-23.pdf](https://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/number3/19-23.pdf) (accessed 20.05.2019). (In Eng.)

*Received 18.03.2019; revised 10.05.2019; published online 30.09.2019*

*About authors:*

**Sergey A. Velichko**, Senior Lecturer of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Saransk 430904, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-9021-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, [velichko2005@yandex.ru](mailto:velichko2005@yandex.ru)

**Pavel V. Chumakov**, Senior Lecturer of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Saransk 430904, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-8320-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-5907>, [pav-chumakov@yandex.ru](mailto:pav-chumakov@yandex.ru)

**Alexander V. Kolomeychenko**, Head of the Chair of Reliability and Repair of Machines, Orel State Agrarian University (69 Generala Rodina St., Orel 302019, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: D-6053-2019, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3865-4486>, [kolom\\_sasha@inbox.ru](mailto:kolom_sasha@inbox.ru)

*Contribution of the authors:*

S. A. Velichko – scientific guidance, formulation of the research problem, statistical data processing, obtaining a regression model of the overall efficiency of hydraulic cylinders with wear of the working surfaces of the parts, defense of the doctoral thesis with scientific results presented in this article; P. V. Chumakov – analysis of literary data, development of techniques, experimental studies; A. V. Kolomeychenko – accumulation of statistical data, analysis of the regression model and finalization the text.

*All authors has read and approved the final manuscript.*



## Анализ энергоёмкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом

**В. Ф. Купряшкин\***, **А. С. Уланов**, **Н. И. Наумкин**,  
**А. В. Безруков**, **М. Г. Шляпников**  
*ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)*  
*\*kupwf@mail.ru*

*Введение.* Вспашка почвы является одной из главных операций при возделывании сельскохозяйственных культур. Она представляет собой одну из самых трудоёмких операций в растениеводстве, на которую расходуется около 40 % всех энергетических затрат. Основная часть этих издержек приходится на обеспечение мощности, необходимой для эффективного функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом. Поэтому определение затрачиваемой мощности мотоблока является актуальной задачей.

*Материалы и методы.* Для решения проблемы определения энергетических характеристик мотоблока при проведении вспашки почвы был проведен теоретический анализ, включающий в себя значение крутящего момента, силу тяги на ходовых колесах, силу сопротивления при их перекачивании, а также силу сопротивления на лемешно-отвальном корпусе плуга с учетом геометрических параметров пахотного агрегата на базе мотоблока. В результате чего были получены искомые зависимости затрачиваемой мощности и удельной энергоёмкости, методика нахождения которых изложена в материалах статьи.

*Результаты исследования.* В результате проведенного анализа баланса были получены зависимости для нахождения потребляемой мощности, а также для удельной энергоёмкости вспашки почвы мотоблоком с лемешно-отвальным плугом, позволяющие дать энергетическую оценку функционированию пахотного агрегата.

*Обсуждение и заключение.* На основании установленных расчетных зависимостей требуемой мощности и удельной энергоёмкости с учетом экспериментальных данных взаимодействия плуга с почвой, конструктивных параметров и технологических режимов работы пахотного агрегата, состоящего из мотоблока «Нева» МБ-2С-7,5 Pro и лемешно-отвального плуга П-20/3, были получены их частные решения, способствующие выбору оптимальных режимов его функционирования.

**Ключевые слова:** почва, мотоблок, лемешно-отвальный плуг, устойчивость движения, мощность, энергоёмкость

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке проекта № 18-013-00342 Российского фонда фундаментальных исследований и гранта № 14181ГУ/2019 Фонда содействия инновациям.

**Для цитирования:** Анализ энергоёмкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом / Купряшкин В. Ф. [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 414–427. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427>

© Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Наумкин Н. И., Безруков А. В., Шляпников М. Г., 2019



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

## Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow

V. F. Kupryashkin\*, A. S. Ulanov, N. I. Naumkin,  
A. V. Bezrukov, M. G. Shlyapnikov

*National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)*

\*kupwf@mail.ru

**Introduction.** Plowing the soil is a major operation in the cultivation of crops. It is one of the most labor-intensive operations in crop production, accounting for about 40 % of all energy costs. Most of these costs fall on consumed power, ensuring the effective functioning of the motor-block unit with a moldboard plow. Therefore, estimation of power consumed by motor-blocks is the urgent task.

**Materials and Methods.** To solve the problem of determining the energy characteristics of the motor-block unit during plowing, a theoretical analysis was carried out, including values of torque, traction force on running wheels, resistance during their rolling and resistance force at the jointers-depleted plow, with the account for the geometry of the plowing unit based on the motor-block. Dependences of power consumption and specific energy consumption were obtained using the method described below.

**Results.** As a result of our analysis of the power balance, we obtained dependences to find power consumption, as well as the specific energy intensity of plowing the soil with a motor-moldboard plow, which allowed for energy assessment of the functioning of the agricultural unit.

**Discussion and Conclusion.** On the basis of these dependences of the required power and specific energy consumption, taking into account experimental data on interaction of the plow with the soil, design parameters and technological modes of operation of the agricultural unit consisting of motor unit Neva MB-2S-7,5 Pro and plow P1-20/3, were obtained to facilitate the choice of optimal modes of their functioning.

**Keywords:** soil, motor-block, moldboard plow, stability of movement, power, energy consumption

**Funding:** The study was supported by project No. 18-013-00342 from the Russian Foundation for Basic Research and grant No. 14181GU/2019 from the Foundation for Assistance to Innovations.

**For citation:** Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I., et al. Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):414-427. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427>

### Введение

Зяблевая вспашка почвы широко применяется в процессе возделывания сельскохозяйственных культур на фермерских и личных подсобных хозяйствах, обеспечивая оптимальные условия для их наилучшего развития и роста. Проведение данного мероприятия, согласно агротехническим требованиям [1; 2], должно строго выполняться в летне-осенний период и способствовать накоплению

и сохранению влаги в почве для отдаче ее в весенний посевной период. При этом обернутый пласт почвы, полученный в результате проведения вспашки, должен по возможности максимально заделывать пожнивные остатки и сорную растительность на дно борозды<sup>1</sup> [3].

Для проведения технологической операции по вспашке почвы, в основной своей массе, широкое применение получили малогабаритные почвообра-

<sup>1</sup> Залигин О. Г., Гусаков С. О., Заборский В. П. Малая механизация в приусадебных и фермерских хозяйствах. Киев: Урожай, 1996. 367 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/471136/> (дата обращения: 13.06.2019).

батывающие машины, к числу которых принято относить мотоблоки в агрегате с плугами<sup>2</sup>. При этом стоит отметить, что основная обработка почвы является одной из самых трудоемких операций при возделывании сельскохозяйственных культур, на которую расходуется практически 40 % всех материальных и энергетических затрат<sup>3</sup> [4]. В связи с этим к пахотным агрегатам на базе мотоблоков необходимо предъявлять особые требования, в результате соблюдения которых существенным образом повысится эффективность<sup>4</sup> их функционирования [5].

### Обзор литературы

Перемещение малогабаритных почвообрабатывающих машин при выполнении технологических операций осуществляется за счет сил сцепления их колесных движителей с почвой, затрачивая при этом мощность энергетической установки (двигателя) на преодоление всех сил, действующих на элементы их конструкций и агрегируемые с ними рабочие органы [6; 7].

Анализом потребляемой мощности и удельной энергоемкости средств малой механизации достаточно широко занимались отечественные исследователи В. Ф. Купряшкин<sup>5</sup>, А. В. Безруков и дру-

гие<sup>6</sup> [8; 9]. В частности, В. Ф. Купряшкиным были получены расчетные зависимости для нахождения величин мощности для обеспечения функционирования почвообрабатывающей фрезы ФС-0,85 (1) и энергоемкости процесса фрезерования почвы (2):

$$P = (2 - \eta_o) \left\{ \frac{M_{кр} n_{\Phi}}{9550} + \left[ f(K_1 F_g - F_z) + \sqrt[3]{\frac{F_g^4 (1 - K_1)^4}{q D^2 b_k}} - F_x \right] v_{п} 10^{-3} \right\}, \quad (1)$$

$$E_{уд} = \frac{(2 - \eta_o) 10^{-3}}{3,6 B v_{п} h} \left\{ \frac{M_{кр} n_{\Phi}}{9550} + \left[ f(K_1 F_g - F_z) + \sqrt[3]{\frac{F_g^4 (1 - K_1)^4}{q D^2 b}} - F_x \right] v_{п} 10^{-3} \right\}, \quad (2)$$

где  $\eta_o$ ,  $\eta_{оф}$  и  $\eta_{ок}$  – соответственно, коэффициент полезного действия (КПД) передаточных частей почвообрабатывающей фрезы, КПД привода фрезбаранов и ходовых колес;  $F_z$  – выталкивающая сила на фрезерном рабочем

<sup>2</sup> Там же; Сельскохозяйственная техника и оборудование для фермерских хозяйств. М.: Информагротех, 1994. 384 с.

<sup>3</sup> **Кряжнов В. М., Спириин А. П., Сизов О. А.** Энергосберегающие технологии в земледелии. М.: Информагротех, 1998. 36 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000578191> (дата обращения: 13.06.2019).

<sup>4</sup> **Уланов А. С.** Особенности комплектования состава пахотного агрегата и выбора способа движения мотоблока при вспашке почвы // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной памяти профессора С. А. Лапшина. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 540–545.

<sup>5</sup> **Купряшкин В. Ф.** Устойчивость движения и эффективное использование самоходных почвообрабатывающих фрез. Теория и эксперимент. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. 140 с.

<sup>6</sup> **Ладутько С. Н., Заяц Э. В., Эбертс А. А.** К определению мощности, потребной для привода вертикальной почвенной фрезы // Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (25 декабря 2015 г.). Ч. I. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. С. 57–62. URL: <http://nauka.vsu.ru/wp-content/uploads/2016/05/13506.pdf> (дата обращения: 13.06.2019).

органе (ФРО), Н;  $F_x$  – подталкивающая сила на ФРО, Н;  $M_{кр}$  – крутящий момент на валу фрезерных рабочих органов, (Н·м);  $F_g$  – сила тяжести почвообрабатывающей фрезы ФС-0,85,  $F_g = 1716$  Н;  $K_1$  – коэффициент учитывающий геометрические параметры почвообрабатывающей фрезы,  $K_1 = 0,174$ ;  $q$  – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м<sup>3</sup>;  $b_k$  и  $D_k$  – ширина обода и диаметр ходовых колес, соприкасающихся с почвой, соответственно, м;  $h$  – фрезерования почвы, м;  $q$  – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м<sup>3</sup>;  $v_{п}$  – поступательная скорость фрезы ФС-0,85, м/с;  $f$  – коэффициент трения опорного полозка о почву,  $f = 0,41$ ;  $B$  – ширина захвата почвообрабатывающего агрегата, м.

Вышеуказанные исследования В. Ф. Купряшкина, легли в основу анализа баланса потребляемой мощности и энергоемкости процесса фрезерования почвы, самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы с адаптивным регулированием режима работы (СМПФА), предложенным А. В. Безруковым [8]. В этом случае расчетные зависимости требуемой мощности (3) и энергоемкости процесса обработки почвы (4) были получены с учетом специфики конструкции и особенностей работы СМПФА:

$$P = (2 - \eta_o) \left\{ \frac{M_{кр} n_{ф}}{9550} + \left[ f(K_1 F_g - F_z) + \sqrt[3]{\frac{F_g^4 (1 - K_1)^4}{q D_k^2 b_k}} - F_x + F_{рез} \right] v_{п} 10^{-3} \right\}, \quad (3)$$

$$E_{уд} = \frac{(2 - \eta_o) 10^{-3}}{3,6 B v_{п} h} \left\{ \frac{M_{кр} n_{ф}}{9550} + \left[ f(K_1 F_g - F_z) + \sqrt[3]{\frac{F_g^4 (1 - K_1)^4}{q D_k^2 b_k}} - F_x + F_{рез} \right] v_{п} 10^{-3} \right\}, \quad (4)$$

где  $F_{рез}$  – сила резания сканера в почве, кВт.

Отличительной особенностью расчетных зависимостей (3) и (4) от зависимостей (1) и (2) является присутствие в последних величины силы резания сканера в почве  $F_{рез}$ . Ее появление обусловлено наличием в конструкции почвообрабатывающей фрезы, сканера почвы, позволяющего определять ее твердость.

Однако необходимо отметить, что полученные расчетные зависимости (1), (2), (3) и (4) применимы к почвообрабатывающим машинам с активными рабочими органами, в частности к малогабаритной почвообрабатывающей фрезе ФС-0,85 и ее модификациям.

В исследованиях других авторов И. И. Гуреева [9] и С. Н. Ладутько<sup>6</sup> в области энергозатрат, были рассмотрены вопросы, касающиеся требуемой мощности и энергоемкости для функционирования вертикальной почвообрабатывающей фрезы. Так, ими использовалась зависимости:

$$P = \frac{K_o a v_a D^2}{413,8}, \quad (5)$$

$$E_{уд} = 191 - \frac{4,99}{v} V_o + \frac{0,791}{v^2} V_o^2, \quad (6)$$

где  $K_o$  – приведенный коэффициент объемного смятия, Н/см<sup>3</sup>;  $a$  – глубина фрезерования, см;  $v_a$  – скорость агрегата, м/с;  $D$  – диаметр фрезы, см;  $v$  – поступательная скорость фрезы, м/с;  $V_o$  – скорость отбрасываемой почвы, м/с.

Однако зависимости (5) и (6) справедливы для конкретных почвообрабатывающих машин, агрегируемых с тракторами тягового класса 0,9 и выше, что делает невозможным их применение с целью определения энергетических показателей малогабаритных почвообрабатывающих машин, в частности мотоблоков, так как они не учитывают особенности конструкции

их приводов<sup>7</sup> [5], комплектования пахотного агрегата на их базе, специфику их функционирования и агротехнических требований, предъявляемых ко вспашке почвы<sup>1</sup>.

Основываясь на том, что указанные исследования и полученные на их основе результаты, а именно расчетные зависимости для определения требуемой мощности функционирования почвообрабатывающих машин и энергоемкости обработки почвы, применимы только для машин с активными рабочими органами, необходимо провести теоретические изыскания по определению энергетических показателей почвообрабатывающих агрегатов, скомплектованных на базе средств малой механизации и тяговых рабочих органов и являющихся основой для дальнейшего выбора наиболее оптимальных режимов их функционирования.

### Материалы и методы

При работе мотоблока с лемешно-отвальным плугом требуемая мощность для обеспечения технологического процесса вспашки почвы  $P$  (кВт) определяется формулой:

$$P = P_{\text{ТЯГ}} + P_{\text{ПЕР}} + P_{\text{ТР}}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{ТЯГ}}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления на рабочем органе (лемешно-отвальном плуге), кВт;  $P_{\text{ПЕР}}$  – мощность, затрачиваемая на перекатывание ходовых колес, кВт;  $P_{\text{ТР}}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в приводе ходовых колес, кВт.

Здесь  $P_{\text{ТЯГ}} + P_{\text{ПЕР}}$  определяет мощность, затрачиваемую на создание тягового усилия на ходовых колесах  $P_{\text{Т}}$ , т. е.  $P_{\text{Т}} = P_{\text{ТЯГ}} + P_{\text{ПЕР}}$ .

Мощность  $P_{\text{Т}}$  будет определяться зависимостью:

$$P_{\text{Т}} = M_{\text{КРК}} \omega_{\text{к}} 10^{-3}, \quad (8)$$

где  $M_{\text{КРК}}$  – крутящий момент на ходовых колесах, Н·м;  $\omega_{\text{к}}$  – угловая скорость ходовых колес, рад/с.

Учитывая действующие на мотоблок силы для крутящего момента  $M_{\text{КРК}}$ , получим расчетную зависимость:

$$M_{\text{КРК}} = F_{\text{ТКС}} \frac{D_{\text{к}}}{2}, \quad (9)$$

где  $F_{\text{ТКС}}$  – суммарная сила тяги на колесах, Н;  $D_{\text{к}}$  – диаметр колеса, м.

Приняв во внимание условие устойчивости движения мотоблока по критерию отсутствия буксования ходовых колес с почвой, преобразуем выражение (5):

$$M_{\text{КРК}} = (F_{\text{СКΣ}} + R_{\text{X}} + F_{\text{ЛП}} + F_{\text{ЛД}}) \frac{D_{\text{к}}}{2}, \quad (10)$$

где  $F_{\text{СКΣ}}$  – сила сопротивления при перекатывании ходовых колес по почве, Н;  $R_{\text{X}}$  – сила сопротивления на лемешно-отвальном плуге, действующая в продольной плоскости, Н;  $F_{\text{ЛП}}$  – сила трения опорной пятки о дно борозды, Н;  $F_{\text{ЛД}}$  – сила трения полевой доски о стенку борозды, Н.

Если учесть зависимости, определяющие  $F_{\text{СКΣ}}$ ,  $F_{\text{ЛП}}$ ,  $F_{\text{ЛД}}$ , выражение (10) примет вид:

$$M_{\text{КРК}} = \left\{ \begin{aligned} & \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{\text{гМ}} + F_{\text{гБ}})^4}{(0,044p + 0,0038) D_{\text{к}}^2 b_{\text{к}} 10^9} + R_{\text{X}} +} \\ & + f(K_2 F_{\text{гМ}} + K_3 R_{\text{Z}} - K_4 R_{\text{X}}) + \\ & + f[K_5 R_{\text{X}} + K_6 R_{\text{Y}} + (K_7 F_{\text{г}} + K_8 F_{\text{гБ}}) k_{\text{СБ}}] \end{aligned} \right\} \frac{D_{\text{к}}}{2}, \quad (11)$$

<sup>7</sup> К вопросу классификации приводов технологических машин и особенностей определения общего коэффициента полезного действия / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем: материалы всерос. науч.-техн. конф. (19–23 октября 2009 г.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С. 360–364. URL: <https://docplayer.ru/105315539-Povyshenie-effektivnosti-funkcionirovaniya-mehnicheskikh-i-energeticheskikh-sistem.html> (дата обращения: 13.06.2019).

где  $F_{гМ}$  – сила тяжести мотоблока, Н;  $F_{гБ}$  – сила тяжести балласта, Н;  $D_k$  – диаметр колеса, м;  $b_{кз}$  – суммарная ширина ходовых колес, м;  $k_{сБ}$  – коэффициент бокового сцепления ходовых колес с почвой;  $f$  – коэффициент трения;  $K_1, \dots, K_8$  – коэффициенты, характеризующие геометрические параметры мотоблока.

Затем после подстановки (11) в (8) получаем:

$$P_T = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_k^2 b_{кз} 10^9} + R_x +} \\ + f(K_2 F_{гМ} + K_3 R_Z - K_4 R_X) + \\ + f[K_5 R_X + K_6 R_Y + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ}) k_{сБ}] \end{array} \right\} \frac{D_k}{2} \omega_k 10^{-3}. \quad (12)$$

Если определить поступательную скорость движения мотоблока  $v_{п}$  (км/ч) через угловую скорость  $\omega_k$ , то уравнение (12) примет окончательный вид:

$$P_T = 3,6v_{п} 10^{-3} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_k^2 b_{кз} 10^9} + R_x +} \\ + f(K_2 F_{гМ} + K_3 R_Z - K_4 R_X) + \\ + f[K_5 R_X + K_6 R_Y + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ}) k_{сБ}] \end{array} \right\}. \quad (13)$$

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в приводе  $P_{тр}$ , определяется зависимостью:

$$P_{тр} = (1 - \eta_o) P_T, \quad (14)$$

где  $\eta_o$  – общий КПД передаточной части.

Учитывая особенности трансмиссии мотоблока<sup>8</sup>, значение  $\eta_o$  можно определить по формуле:

$$\eta_o = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n, \quad (15)$$

где  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n$  – КПД отдельных элементов привода.

С учетом полученной ранее зависимости (13) уравнение (14) будет иметь следующий вид:

$$P_{тр} = 3,6v_{п}(1 - \eta_o)10^{-3} \times \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_k^2 b_{кз} 10^9} + R_x +} \\ + f(K_2 F_{гМ} + K_3 R_Z - K_4 R_X) + \\ + f[K_5 R_X + K_6 R_Y + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ}) k_{сБ}] \end{array} \right\}. \quad (16)$$

Подставляя установленные ранее зависимости (13), (15) в (7) с учетом ряда преобразований, получим уравнение для расчета требуемой мощности двигателя мотоблока при его агрегатировании с лемешно-отвальным плугом:

$$P = 3,6v_{п}(2 - \eta_o)10^{-3} \times \left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_k^2 b_{кз} 10^9} + R_x +} \\ + f(K_2 F_{гМ} + K_3 R_Z - K_4 R_X) + \\ + f[K_5 R_X + K_6 R_Y + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ}) k_{сБ}] \end{array} \right\}. \quad (17)$$

<sup>8</sup> Там же; **Купряшкин В. Ф.** Особенности определения коэффициента полезного действия в машинных агрегатах // Физическое образование: проблемы и перспективы развития: материалы 9-й межд. науч.-метод. конф. М., Рязань: РИЦ РГУ, 2010. С. 43–46; **Наумкин Н. И.** Теория механизмов и машин. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. 188 с.

Энергоемкость процесса обработки почвы определяется зависимостью:

$$E_{уд} = \frac{P}{W_V}, \quad (18)$$

где  $E_{уд}$  – удельная энергоемкость, кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $W_V$  – производительность в единицу объема обрабатываемой почвы, м<sup>3</sup>/ч. Объемная производительность  $W_V$  в нашем случае будет определяться зависимостью:

$$W_V = Bv_n h 10^3, \quad (19)$$

где  $B$  – ширина захвата рабочего органа, плуга, м;  $v_n$  – поступательная скорость движения мотоблока, км/ч;  $h$  – глубина обработки, м.

Тогда, с учетом (17) и (19) выражение (18) примет вид:

$$E_{уд} = \frac{3,6(2 - \eta_o)10^{-6}}{h} \times \left\{ \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{gM} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_{к\kappa}^2 b_{к\kappa} 10^9}} + R_x + \right. \\ \left. + f(K_2 F_{gM} + K_3 R_z - K_4 R_x) + \right. \\ \left. + f[K_5 R_x + K_6 R_y + (K_7 F_{gM} + K_8 F_{гБ})k_{сБ}] \right\}. \quad (20)$$

Полученные уравнения (17) и (20) отражают зависимости в общем виде, соответственно, потребляемой мощности и удельной энергоемкости при совершении вспашки почвы пахотным агрегатом на базе мотоблока с учетом его конструктивно-технологических параметров и свойства обрабатываемой среды.

### Результаты исследования

Из полученных уравнений (17) и (20) видно, что для их решения необходимо определить ряд силовых характеристик, влияющих на работу мотоблока при проведении вспашки. Анализ исследований работы малогабаритных почвообрабатывающих машин [10; 11] выявил, что рабочий орган, в частности лемешно-отвалный плуг, представляет собой один из главных объектов возмущения при проведении вспашки [12]. Это происходит в результате действия на его криволинейную поверхность (культурный отвал) сил  $R_x$ ,  $R_y$  и  $R_z$ , действующих на плуг в продольно-вертикальной, горизонтальной и поперечно-вертикальной плоскостях соответственно. Как показывают результаты исследований [13–15], указанные силовые факторы с большой степенью точности можно определить только в ходе проведения пространственного динамометрирования плужного корпуса, а для этого необходимо использовать специальные приспособления<sup>9</sup> [16; 17]. Для решения этой задачи на производственных площадках кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина при помощи экспериментального стенда [18], позволяющего имитировать реальные условия эксплуатации, были проведены лабораторные испытания плуга П1-20/3, агрегатируемого с мотоблоком «Нева» МБ-2С-7,5 Pro [19], в ходе которых были получены регрессионные модели силовых характеристик  $R_x$ ,  $R_y$  и  $R_z$  процесса взаимодействия лемешно-отвалного корпуса плуга мотоблока с почвой в виде уравнений в зависимости от варьируемых факторов: твердость почвы –  $p$  (МПа)

<sup>9</sup> Гусев А. Ю., Ромашкин Д. В., Терехин Е. Ю., Четверов Н. А. Анализ существующих конструкций экспериментальных стендов для динамометрирования лемешно-отвалного корпуса плуга // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузовский сборник научных трудов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 244–256.



и скорость движения  $v_n$  (км/ч)<sup>10</sup>, которые имеют следующий вид:

$$R_x = 185,3 - 7,7p - 65,6v_n + 116,1pv_n, \quad (21)$$

$$R_y = 49,1 + 3,5p - 17,1v_n + 32,7pv_n, \quad (22)$$

$$R_z = 37,0 - 1,8p - 14,1v_n + 23,9pv_n. \quad (23)$$

Полученные уравнения регрессионных моделей справедливы для условий, определяемых твердостью почвы в интервале от 0,65 до 1,65 МПа и скоростью движения пахотного агрегата в интервале от 1 до 4 км/ч. Данные условия были приняты на основании того, что мотоблоки в агрегате с лемешно-отвальными плугами могут эксплуатироваться только на легких и средних типах почвы, при которых значение твердости не превышает 1,7 МПа [20; 21], а скорости движения определяются условиями безопасной эксплуатации мотоблоков<sup>11</sup>.

Для оценки энергетических показателей функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом подставим зависимости (21), (22) и (23) в уравнения (17) и (20). В результате получим следующие расчетные зависимости мощности и энергоёмкости:

$$P = 3,6v_n(2 - \eta_0)10^{-3} \times$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_{к\Sigma}^2 b_{к\Sigma} 10^9} + R_x} + \\ & + f \left[ \begin{aligned} & K_2 F_{гМ} + K_3 (K_{0z} - K_{1z}p - K_{2z}v_n + K_{12z}pv_n) - \\ & - K_4 (K_{0x} - K_{1x}p - K_{2x}v_n + K_{12x}pv_n) \end{aligned} \right] + \\ & + f \left[ \begin{aligned} & K_5 (K_{0x} - K_{1x}p - K_{2x}v_n + K_{12x}pv_n) + \\ & + K_6 (K_{0y} + K_{1y}p - K_{2y}v_n + K_{12y}pv_n) + \\ & + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ})_{сБ} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

$$E_{\text{ян}} = \frac{3,6(2 - \eta_0)10^{-6}}{h} \times$$

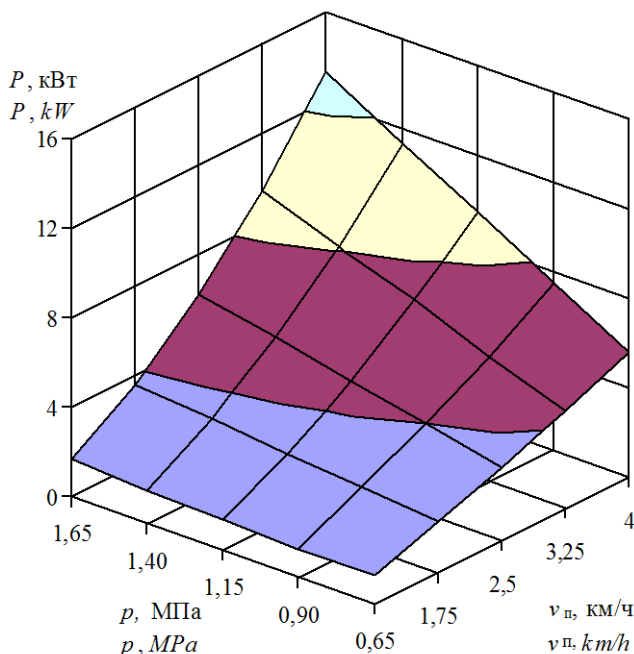
$$\left\{ \begin{aligned} & \sqrt[3]{\frac{(K_1 F_{гМ} + F_{гБ})^4}{(0,044p + 0,0038) D_{к\Sigma}^2 b_{к\Sigma} 10^9} + R_x} + \\ & + f \left[ \begin{aligned} & K_2 F_{гМ} + K_3 (K_{0z} - K_{1z}p - K_{2z}v_n + K_{12z}pv_n) - \\ & - K_4 (K_{0x} - K_{1x}p - K_{2x}v_n + K_{12x}pv_n) \end{aligned} \right] + \\ & + f \left[ \begin{aligned} & K_5 (K_{0x} - K_{1x}p - K_{2x}v_n + K_{12x}pv_n) + \\ & + K_6 (K_{0y} + K_{1y}p - K_{2y}v_n + K_{12y}pv_n) + \\ & + (K_7 F_{гМ} + K_8 F_{гБ})_{сБ} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

Таким образом, установленные зависимости требуемой мощности (24) и энергоёмкости (25) позволяют оценить затраты мощности и удельную энергоёмкость при вспашке почвы мотоблоком с лемешно-отвальным плугом с учетом его режимов работы и конструктивных параметров, а также твердости почвы.

Далее, учитывая конструктивные параметры мотоблока «Нева» МБ-2С-7,5 Рго и лемешно-отвального плуга П1-20/3, а именно его основные геометрические параметры, характеризующиеся коэффициентами  $K_1 = 0,975$ ,  $K_2 = 0,015$ ,  $K_3 = 0,65$ ,  $K_4 = 1,1$ ,  $K_5 = 0,11$ ,  $K_6 = 0,92$ ,  $K_7 = 0,016$  и  $K_8 = 0,016$ , диаметром  $D_{к\Sigma} = 0,5$  м и суммарной шириной  $b_{к\Sigma} = 0,4$  м его ходовых колес, силу тяжести  $F_{гМ} = 1197$  Н и принятые коэффициенты  $k_{сБ} = k_c = 0,3$ ,  $f = 0,41$ ,  $\eta_0 = 0,8$ , а также значения коэффициентов уравнений регрессионных моделей силовых характеристик  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  с учетом ряда преобразований, уравнения (24) и (25) примут следующие виды:

<sup>10</sup> Уланов А. С., Купряшкин В. Ф. Результаты лабораторных исследований взаимодействия плуга мотоблока с почвой и их анализ // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: П. В. Сенин [и др.]; отв. за вып. О. А. Кувшинова. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2018. С. 46-52.

<sup>11</sup> Руководство по эксплуатации мотоблока «Нева» МБ-2 и его модификаций: ЗАО «Красный Октябрь-Нева», 2013. 33 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/1041562/> (дата обращения: 13.06.2019); Романов Ф. Ф., Козин В. А., Ножнин С. Р. Концепция малогабаритного трактора // Актуальные проблемы агропромышленного комплекса: сб. докл. науч.-практ. конф. Вологда: ВМИ, 1993. С. 14-15; ГОСТ 12.2.140-2004. Тракторы малогабаритные. Общие требования безопасности.



Р и с. 1. Модель требуемой мощности двигателя  $P$  от скорости движения мотоблока и твердости почвы

Fig. 1. Model of the dependence of the required engine power  $P$  from the speed of the motor unit and the hardness of the soil

$$P = 3,6v_n(2-\eta_o)10^{-3} \times \left[ 215 - 6,6p - 72,9v_n + 129,2pv_n + 87,2(p+0,086)^{\frac{1}{3}} \right], \quad (26)$$

$$E_{уд} = \frac{3,6(2-\eta_o)10^{-6}}{Bh} \times \left[ 215 - 6,6p - 72,9v_n + 129,2pv_n + 87,2(p+0,086)^{\frac{1}{3}} \right]. \quad (27)$$

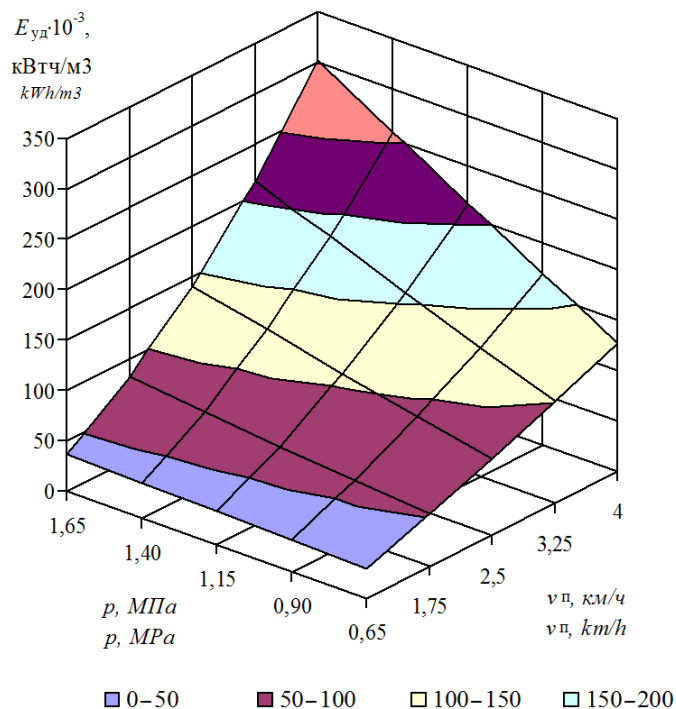
Подставленные значения твердости почвы  $p = 0,65 \dots 1,65$  МПа и скоростных режимов движения  $v_n = 1 \dots 4$  км/ч в условия (26) и (27) значений твердости почвы  $p = 0,65 \dots 1,65$  МПа и скоростных режимов движения  $v_n = 1 \dots 4$  км/ч, позволили получить графические интерпретации требуемой мощности для функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом

и энергоемкости процесса вспашки почвы, в зависимости от конкретных условий эксплуатации (1 и 2).

Полученные модели  $P = f(p; v_n)$  и  $E_{уд} = f(p; v_n)$  наглядно демонстрируют изменение энергетических параметров пахотного агрегата на базе мотоблока с лемешно-отвальным плугом.

Из анализа рисунка 1 следует, что значение требуемой мощности двигателя  $P$  изменяется в пределах от 1,3 до 13,3 кВт в интервале значений твердости почвы от 0,65 до 1,65 МПа и скорости движения мотоблока от 1 до 4 км/ч. При этом более интенсивный рост требуемой мощности наблюдается с увеличением скорости движения мотоблока.

Аналогично анализируя график удельной энергоемкости  $E_{уд}$  (рис. 2), можно сделать выводы, что в указанных пределах изменения твердости почвы и скорости движения пахотного агрегата



Р и с. 2. Модель удельной энергоёмкости обработки почвы  $E_{уд}$  от скорости движения мотоблока и твердости почвы

Fig. 2. Model of specific energy intensity of soil tillage  $E_{уд}$  from the speed of the motor unit and the hardness of the soil

та значение  $E_{уд}$  изменяется в пределах от  $28,7 \cdot 10^{-3}$  до  $301,6 \cdot 10^{-3}$  кВт·ч/м<sup>3</sup>. При этом, как в случае с требуемой мощностью двигателя, с увеличением скорости движения мотоблока наблюдается более интенсивный рост значений энергоёмкости процесса обработки почвы.

#### Обсуждение и заключение

Полученные уравнения расчета требуемой мощности для обеспечения работоспособности мотоблока в агрегате с лемешно-отвальным плугом (17) и энергоёмкости процесса вспашки почвы (20) с использованием регрессионных моделей (21), (22) и (23) силовых характеристик взаимодействия его корпуса с почвой  $R_x$ ,  $R_y$  и  $R_z$  позволяют оценить энергетические затраты при функционировании мотоблока, приняв во

внимание его конструктивные параметры и технологические режимы работы.

Кроме этого, учитывая состав пахотного агрегата, состоящего из мотоблока «Нева» МБ-2С-7,5 Pro и лемешно-отвального плуга П-20/3, были получены их частные решения, способствующие выбору оптимальных режимов его функционирования.

Также из анализа полученных графических зависимостей (рис. 1 и 2) следует, что в интервале значений твердости почвы от 0,65 до 1,65 МПа и скорости движения мотоблока от 1 до 4 км/ч значения требуемой мощности двигателя  $P$  изменяются в пределах от 1,3 до 13,3 кВт, а удельной энергоёмкости  $E_{уд}$  изменяются в пределах от  $28,7 \cdot 10^{-3}$  до  $301,6 \cdot 10^{-3}$  кВт·ч/м<sup>3</sup>.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Василенко В. В., Коржов С. И., Василенко С. В., Хахулин А. Н.** Способы повышения качества отвальной вспашки // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2014. № 3. С. 118–122. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243>
2. Integrated Farm Management for Sustainable Agriculture: Lessons for Knowledge Exchange and Policy / D. C. Rose [et al.] // Land use Policy. 2019. Vol. 81. Pp. 834–842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.001>
3. **Causarano Н.** Factors Affecting the Tensile Strength of Soil Aggregates // Soil and Tillage Research. 1993. Vol. 28, Issue 1. Pp. 15–25. URL: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=NL9306567> (дата обращения: 13.06.2019).
4. **Kim J. H., Kim K. U., Wu Y. G.** Analysis of Transmission Loads of Agricultural Tractors // Journal of Terramechanics. 2000. Vol. 37, Issue 3. Pp. 113–125. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(99\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(99)00022-1)
5. **Купряшкин В. Ф., Наумкин Н. И., Фирстов А. Ф., Уланов А. С.** Анализ динамических нагрузок в приводе машины для обработки почвы в теплицах МПТ-1,2 // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5, ч. 1. С. 94–100. URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=33725> (дата обращения: 13.06.2019).
6. **Мингалимов Р. Р., Мусин Р. М.** Исследования процесса образования и использования дополнительной движущей силы машинно-тракторного агрегата в результате применения движителей-рыхлителей // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 1. С. 126–132. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-protssessa-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-dopolnitelnoy-dvizhuschey-sily-mashinno-traktornogo-agregata-v-rezultate> (дата обращения: 13.06.2019).
7. **Донцов И. Е., Лысыч М. Н., Шабанов М. Л.** Результаты лабораторных исследований силовых параметров почвообрабатывающих рабочих органов // Лесотехнический журнал. 2017. Вып. 7, № 2. С. 166–175. DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5967eaca8aa488.95157042](https://doi.org/10.12737/article_5967eaca8aa488.95157042)
8. **Безруков А. В., Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Еремкин И. В.** Анализ баланса мощности, расходуемой самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезой с автоматическим регулированием режимов работы // Машиноведение. 2015. Вып. 1. С. 37–42. URL: <http://imash.kg/index.php/zhurnal-mashinovedenie-2015-vypusk-1> (дата обращения: 13.06.2019).
9. **Гуреев И. И., Климов Н. С.** Минимизация энергоемкости фрезерной обработки почвы // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 1. С. 64–67. DOI: <https://doi.org/10.18551/issn1997-0749.2018-01>
10. **Мяснишев Д. Г.** Проектирование мотоблоков с учетом требований эргономики // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1996. № 12. С. 15–20. URL: <http://www.tismash.ru> (дата обращения: 13.06.2019).
11. **Mattetti M., Varani M., Molari G., Morelli F.** Influence of the Speed on Soil-Pressure over a Plough // Biosystems Engineering. 2017. Vol. 156. Pp. 136–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.009>
12. **Horn R. F., Taubner H., Wuttke M., Baumgardt T.** Soil Physical Properties Related to Soil Structure // Soil and Tillage Research. 1994. Vol. 30, Issue 2. Pp. 187–216. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90005-1)
13. **Шмонин В. А.** Теория, конструкция и расчет ротационных почвообрабатывающих машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 7. URL: <https://rucont.ru/efd/356670> (дата обращения: 13.06.2019).
14. **Мударисов С. Г.** Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 7. С. 27–30. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200507.htm> (дата обращения: 13.06.2019).
15. **Girma G.** Dynamic Effects of Speed, Depth and Soil Strength Upon Forces on Plough Components // Journal of Agricultural Engineering Research. 1992. Vol. 51. Pp. 47–66. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80025-N](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80025-N)
16. **Донцов И. Е., Лысыч М. Н.** Установака для объемного динамометрирования почвообрабатывающих рабочих органов и результаты ее использования // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2017. № 2. С. 9–18. URL: <https://www.rucont.ru/efd/623597> (дата обращения: 13.06.2019).

17. **Мяленко В. И., Маринов Н. А.** Пространственное динамометрирование рабочих органов почвообрабатывающих орудий // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 5. С. 22–26. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-5-22-26>

18. **Овчинников В. А., Чаткин М. Н., Овчинникова А. В.** Оптимизация параметров и режимов работы дискового высевающего аппарата по критерию равномерности высева // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 379–388. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.379-388>

19. **Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Наумкин Н. И.** Обоснование конструкции динамометрического модуля для исследования лемешно-отвального плуга мотоблока и его практическая апробация с использованием технологий реверс-инжиниринга // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 400–415. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415>

20. **Смагин В. П., Заздравный А. Н.** Агрономическое значение твердости почв // Почвоведение. 1981. № 2. С. 138–141. URL: [http://www.pochva.com/index.php?content=5&journal=%CF%E5%F7%E2%E%E2%E5%E4%E5%ED%E8%E5&year=1981&number=2&number\\_id=622](http://www.pochva.com/index.php?content=5&journal=%CF%E5%F7%E2%E%E2%E5%E4%E5%ED%E8%E5&year=1981&number=2&number_id=622) (дата обращения: 13.06.2019).

21. Method and System of Plowing Depth Online Sensing for Reversible Plough / Yin Yanxin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, Issue 17. Pp. 326–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.199>

*Поступила 28.02.2019; принята к публикации 11.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019*

*Об авторах:*

**Купряшкин Владимир Федорович**, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: L-5153-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, [kupwf@mail.ru](mailto:kupwf@mail.ru)

**Уланов Александр Сергеевич**, инженер кафедры основ конструирования механизмов и машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), ResearcherID: L-4662-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, [ulanow.aleksandr2010@yandex.ru](mailto:ulanow.aleksandr2010@yandex.ru)

**Наумкин Николай Иванович**, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), доктор педагогических наук, кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: L-4643-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, [naumN@yandex.ru](mailto:naumN@yandex.ru)

**Безруков Анатолий Владимирович**, доцент кафедры основ конструирования механизмов и машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: N-5459-2016, [bezrukow157@yandex.ru](mailto:bezrukow157@yandex.ru)

**Шляпников Михаил Геннадьевич**, аспирант кафедры основ конструирования механизмов и машин, институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, г. Саранск, р. п. Ялга, ул. Российская, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-4695>, [mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru](mailto:mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Ф. Купряшкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов, теоретическое обоснование конструкции модуля для динамометрирования; А. С. Уланов – литературный анализ, проведение лабораторных исследований лемешно-отвального плуга мотоблока, обработка результатов эксперимента, редактирование текста; Н. И. Наумкин – участие в теоретических исследованиях, проведение критического анализа исследования и доработка текста; А. В. Безруков – компьютерные работы и верстка текста; М. Г. Шляпников – визуализация текста, обработка результатов эксперимента.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Vasilenko V.V., Korzhov S.I., Vasilenko S.V., Khakhulin A.N. Ways to Quality Improvement of Moldboard Plowing. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Voronezh State Agrarian University Bulletin*. 2014; (3):118-122. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243>
2. Rosea D.C., Sutherlandb W.J., Barnes A.P., Borthwickc F., et al. Integrated Farm Management for Sustainable Agriculture: Lessons for Knowledge Exchange and Policy. *Land Use Policy*. 2019; 81:834-842. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.001>
3. Caसारano H. Factors Affecting the Tensile Strength of Soil Aggregates. *Soil and Tillage Research*. 1993; 28(1):15-25. Available at: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=NL9306567> (accessed 13.06.2019). (In Eng.)
4. Kim J.H., Kim K.U., Wu Y.G. Analysis of Transmission Load of Agricultural Tractors. *Journal of Terramechanics*. 2000; 37(3):113-125. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(99\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(99)00022-1)
5. Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Firstov A.F., Ulanov A.S. Analysis of Dynamic Loads in the Drive of a Machine for Tillage in Greenhouses MPT-1,2. *Sovremennyye naukoemkie tehnologii = Modern High Technologies*. 2014; (5):94-100. Available at: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=33725> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
6. Mingalimov R.R., Musin R.M. Studies of the Process of Formation and Use of Additional Driving Force of Machine-Tractor Unit as a Result of Application of Propulsion-Rippers. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskohozyaystvennoy akademii = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin*. 2015; (1):126-132. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-protssessa-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-dopolnitelnoy-dvizhuschey-sily-mashinno-traktornogo-agregata-v-rezultate> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
7. Dontsov I.Ye., Lysykh M.N., Shabanov M.L. Results of Laboratory Studies of Power Parameters of Tillage Workers. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forest Engineering Journal*. 2017; 7(2):166-175. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.12737/artide\\_5967eaca8aa488.95157042](https://doi.org/10.12737/artide_5967eaca8aa488.95157042)
8. Bezrukov A.V., Naumkin N.I., Kupryashkin V.F., Eremkin I.V. Analysis of the Balance of Power Consumed by a Self-Propelled Small-Sized Tillage Cutter with Automatic Control of Operating Modes. *Mashinovedenie = Mechanical Science*. 2015; (1):37-42. Available at: <http://imash.kg/index.php/zhurnal-mashinovedenie-2015-vypusk-1> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
9. Gureev I.I., Klimov N.S. Minimizing the Energy Intensity of Milling Tillage. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskohozyaystvennoy akademii = Vestnik of the Kursk State Agricultural Academy*. 2016; (1):64-67. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18551/issn1997-0749.2018-01>
10. Myasishchev D.G. Design of Motor-Blocks with Regard to the Requirements of Ergonomics. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny = Tractors and Agricultural Machines*. 1996; (12):15-20. Available at: <http://www.tismash.ru> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
11. Mattetti M., Varani M., Molari G., Morelli F. Influence of the Speed on Soil-Pressure over a Plough. *Bio-systems Engineering*. 2017; 156:136-147. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.009>
12. Horn R.F., Taubner H., Wuttke M., Baumgartl T. Soil Physical Properties Related to Soil Structure. *Soil and Tillage Research*. 1994; 30(2):187-216. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90005-1)
13. Shmonin V.A. Theory, Design and Calculation of Rotary Tillage Machines. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny = Tractors and Agricultural Machines*. 2008; (7). Available at: <https://rucont.ru/efd/356670> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
14. Mudarisov S.G. Modeling the Process of Interaction of Working Bodies with the Soil. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny = Tractors and Agricultural Machines*. 2005; (7):27-30. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/200507.htm> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)
15. Girma G. Dynamic Effects of Speed, Depth and Soil Strength upon Forces on Plough Components. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1992; 51:47-66. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80025-N](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80025-N)
16. Dontsov I.Ye., Lysykh M.N. Installation for Three-Dimensional Dynamic Measurement of the Tilling Tools and the Results of Its Use. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashiny = Tractors and Agricultural Machines*. 2017; (2):9-18. Available at: <https://www.rucont.ru/efd/623597> (accessed 13.06.2019). (In Russ.)

17. Myalenko V.I., Marinov N.A. Spatial Dynamometering of Working Tools of Agricultural Implements. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2017; (5):22-26. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-11-5-22-26>

18. Ovchinnikov V.A., Chatkin M.N., Ovchinnikova A.V. Optimization of Parameters and Operating Modes of Disc Sowing Device According to Seeding Uniformity Criterion. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):379-388. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.379-388>

19. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I. Design of a Dynamometric Module for Studying a Motoblock Share-Moldboard Plow and Its Practical Testing by Using Reverse Engineering. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):400-415. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415>

20. Smagin V.P., Zazdravny A.N. Agronomical Significance of Soil Hardness. *Pochvovedenie* = Soil Science. 1981; (2):138-141. Available at: [http://www.pochva.com/index.php?content=5&journal=%CF%EE%F7%E2%EE%E2%E5%E4%E5%ED%E8%E5&year=1981&number=2&number\\_id=622](http://www.pochva.com/index.php?content=5&journal=%CF%EE%F7%E2%EE%E2%E5%E4%E5%ED%E8%E5&year=1981&number=2&number_id=622) (accessed 13.06.2019). (In Russ.)

21. Yin Y., Guo S., Meng Z., Qin W., et al. Method and System of Plowing Depth On-line Sensing for Reversible Plough. *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(17):326-331. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.199>

*Received 28.02.2019; revised 11.04.2019; published online 30.09.2019*

*About authors:*

**Vladimir F. Kupryashkin**, Head of Chair of Mobile Energy Facilities and Agricultural Machinery, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: L-5153-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, [kupwf@mail.ru](mailto:kupwf@mail.ru)

**Aleksandr S. Ulanov**, Engineer of Chair of Design Principles of Machines and Mechanisms, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), ResearcherID: L-4662-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, [ulanov.aleksandr2010@yandex.ru](mailto:ulanov.aleksandr2010@yandex.ru)

**Nikolay I. Naumkin**, Head of Chair of Basic Design of Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), D.Sc. (Pedagogy), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: L-4643-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, [naumn@yandex.ru](mailto:naumn@yandex.ru)

**Anatoliy V. Bezrukov**, Associate Professor of Chair of Basic Design of Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: N-5459-2016, [bezrukow157@yandex.ru](mailto:bezrukow157@yandex.ru)

**Michail G. Shlyapnikov**, Postgraduate Student of Chair of Basic Design of Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (5 Rossiyskaya St., Yalga, Saransk 430904, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-4695>, [mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru](mailto:mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

V. F. Kupryashkin – scientific management, formulation of the main concept of a research, writing the draft and drawing the conclusions, theoretical justification of a design of the module for dynamometer test; A. S. Ulanov – review of the relevant literature, carrying out laboratory researches of the motor-block moldboard plow, processing the results of the experiment, text editing; N. I. Naumkin – participation in theoretical studies, critical analysis of the study and revision of the text; A. V. Bezrukov – word processing, M. G. Shlyapnikov – visualization, processing of the results of the experiment.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

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

УДК 636.085.64

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201903.428-442



## Баротермическая обработка ингредиентов комбикормов

В. И. Сыроватка<sup>1</sup>, Н. В. Жданова<sup>1</sup>, А. Н. Рассказов<sup>1\*</sup>,  
Д. И. Торопов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИМЖ – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Россия)

<sup>2</sup>Постоянное представительство Республики Мордовия при Президенте Российской Федерации (г. Москва, Россия)

\*vniimzh@mail.ru

*Введение.* В статье обоснована необходимость высокотемпературной обработки ингредиентов комбикормов. Рассмотрены принципы работы и конструктивные особенности применяемых способов и оборудования для кормопроизводства. Проанализированы фазовые переходы, достоинства и выделены ключевые энергетические, технологические и технические недостатки. Целью исследования является обоснование возможности создания поточной линии тепловой обработки комбикормов путем применения тепловых затворов, обеспечивающих непрерывную загрузку сырья в реактор и выгрузку обработанных кормов при высоком давлении и температуре.

*Материалы и методы.* Предложено перевести процесс баротермической обработки в более высокую зону фазовой диаграммы системы  $p, t$  (давление и температура). Это участок зоны перегретого пара с параметрами температуры 300–374 °С, давления 12–21 МПа и экспозицией обработки 30–60 секунд, что заменяет высокочрезмерные процессы нормализации, экспандирования, экструдирования и гранулирования. Показано изменение энтальпии  $H$  в диапазоне  $P$  от 0 до 21 МПа и  $t$  от 0 до 600 °С. Тепловые режимы представлены в аналитических зависимостях (формулах), которые являются базовыми условиями применения цифровых технологий.

*Результаты исследования.* Предложено конструктивное исполнение реактора с тепловым затвором на загрузке и выгрузке, который является базовым агрегатом поточной линии тепловой обработки комбикормов. Результаты исследования являются основополагающими для разработки проекта и образца поточной малоёмкостной линии.

*Обсуждение и заключение.* Переход процесса баротермической обработки комбикормов в зону перегретого пара позволяет осуществить перевод плохо усвояемых элементов зерновых и бобовых в легкоусвояемые, очистить корма от патогенных бактерий. К преимуществам реактора и линии относятся простота конструкции, экономия энергии и возможность реализации перспективных цифровых технологий.

© Сыроватка В. И., Жданова Н. В., Рассказов А. Н., Торопов Д. И., 2019



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



**Ключевые слова:** баротермическая обработка комбикормов, фазовые переходы, реактор, поточная линия

**Для цитирования:** Баротермическая обработка ингредиентов комбикормов / В. И. Сыроватка [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 428–442. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.428-442>

## Barothermal Processing of Animal Feed Ingredients

V. I. Syrovatka<sup>1</sup>, N. V. Zhdanova<sup>1</sup>, A. N. Rasskazov<sup>1\*</sup>,  
D. I. Toropov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Livestock Mechanization – Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)*

<sup>2</sup>*Permanent Mission of the Republic of Mordovia to the President of the Russian Federation (Moscow, Russia)*

\*[vniimzh@mail.ru](mailto:vniimzh@mail.ru)

**Introduction.** The article substantiates the need for high-temperature processing of feed ingredients. Principles of operation and design features of the applied methods and equipment for feed production are considered. Phase transitions, along with advantages and energy, technological, and technical drawbacks are highlighted. The aim of the study is to justify a possibility of creating high-efficiency production lines using heat treatment of feeds by application of heat valves ensuring continuous loading of raw materials into a reactor and discharge of the treated feed at high pressures and temperatures.

**Materials and Methods.** It is proposed to transfer the process of barothermal processing to a higher zone of the phase diagram of the system  $p, t$  (pressure and temperature). This is a section of the superheated steam zone with temperature 300–374 °C, pressure 12–21 MPa and treatment exposure 30–60 seconds, which replaces costly processes of normalizing, expansion, extrusion and granulation. The change in enthalpy in the pressure range 0–21 MPa and temperature range 0–600 °C is shown. Thermal modes are presented as formulas which is the basic condition for the use of digital technologies.

**Results.** The design of the reactor with a thermal gate for loading and unloading, being the main unit of the production line of the feed heat treatment, was proposed. The results of the study are fundamental for the development of the sample flow low-capacity line.

**Discussion and Conclusion.** The transfer of the process of barothermal processing of feed into the zone of superheated steam allows for the transfer of poorly digestible elements of grain and legumes in easily digestible, pathogen-free feed. Advantages of the reactor and line include the user-friendly design, energy saving and possibility of implementation of advanced digital technologies.

**Keywords:** barothermal processing, animal feed, phase transitions, reactor, assembly line

**For citation:** 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. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.428-442>

### Введение

Актуальность данной работы состоит в том, что объем производства и качество продуктов питания – зеркальное

отражение этих показателей в комбикормах<sup>1</sup> [1; 2]. Известно, что мировое производство комбикормов в 2017 году составило 1,07 млрд т<sup>2</sup>, в том числе для

<sup>1</sup> Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»: утв. указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2016. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения: 15.05.2019).

<sup>2</sup> ЕМИСС за 2013–2017 гг. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru> (дата обращения: 15.05.2019).

свиней – 289 млн т или 28 % мирового производства; для птиц – 300 млн т, для молочных коров – 118 млн т. В Китае на 6000 заводах произведено 187 млн т комбикормов, в США – 173 млн т, в Бразилии – 70 млн т, в Индии – 34 млн т. В России произведено 27,3 млн т на комбикормовых заводах и в хозяйствах – 10,7 млн т. Общее производство комбикормов составило 38 млн т. Заводские корма использованы: для свиней – 10 млн т, для птиц – 15,2 млн т и для КРС – 2,1 млн т<sup>3</sup>. Кроме того, в животноводческих и птицеводческих хозяйствах ежегодно используется 40–50 млн т фуражного зерна в виде кормовых смесей. Мировое производство масличных культур (соя, рапс, арахис и подсолнечник) в сезоне 2016–17 года составило 509 млн т<sup>4</sup>, а с учетом семян хлопка, кокосовых орехов, масличной пальмы производство составит 571 млн т. В США произведено сои 114,3 млн т, при урожае 34 ц/га, в Бразилии – 101 млн т, в Аргентине – 57 млн т, в России – 3,5 млн т, а рапса – 1,5 млн т<sup>5</sup>.

### Обзор литературы

Решение задачи вытекает из потребности в тепловой обработке ингредиентов комбикормов.

В зависимости от вида фуражного зерна, сорта растения, условий его произрастания и других факторов в нем содержится 56...70 % безазотистых экстрактивных веществ<sup>6</sup>, которые плохо усваиваются животными и птицей. При тепловой обработке крахмал переходит в усвояемые декстрины и полисахариды.

Нейтрализация антипитательных веществ в сое и рапсе. Соя и рапс – важные белковые и энергетические компоненты. Соевая мука является основным источником белка при производстве комбикормов, однако содержит 5...10 % антипитательных веществ-ингибиторов, которые подавляют и задерживают ферменты, вырабатываемые поджелудочной железой. В результате поджелудочная железа вынуждена продуцировать их более интенсивно, что вызывает ее гипертрофию [3–5].

Эффективным путем устранения ингибиторов является высокотемпературная обработка в сочетании с повышенным давлением. Увеличивает эффективность термообработки также предварительное пропаривание сои в течение 20–30 мин. Наибольшую энергетическую ценность в комбикормах составляют семена рапса, поскольку содержат 40–48 % жира и 21–33 % сырого протеина при коэффициенте переваримости 84,4–93,4 % (табл.1)<sup>7</sup>.

Однако семена рапса содержат эруковую кислоту, которая не утилизируется ферментативной системой млекопитающих и птиц и имеет тенденцию накапливаться в их организме. Эруковая кислота вызывает нарушения сердечно-сосудистой системы, инфильтрации скелетной мускулатуры и миокарда, цирроз печени. Доля эруковой кислоты в составе растительных масел: рапсовое масло 56–65 %, горчичное – 50 %, сурепное масло – 47 %. Семена рапса подлежат глубокой термообработке.

<sup>3</sup> Производство комбикормов в России [Электронный ресурс]. URL: <https://agrovesti.net/news/indst/proizvodstvo-kombikormov-v-rossii.html> (дата обращения: 15.05.2019).

<sup>4</sup> Мировой рынок: производство масличных культур [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--80arlem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-gynok-proizvodstvo-maslicnyh-kultur> (дата обращения: 15.05.2019).

<sup>5</sup> UNESCO Sceince report: towards 2030. France: UNESCO Publishing, 2015. 794 p. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images> (дата обращения: 15.05.2019); **Фортов В. Е., Махутов Н. А.** Машиностроение России. В 2-х томах. Т. 1: Состояние и развитие. М.: ОЭММПУ РАН, 2010; Т. 2: Этапы и приоритеты развития. М.: ОЭММПУ РАН, 2016.

<sup>6</sup> Зерновые культуры [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 15.05.2019).

<sup>7</sup> Химический состав российских пищевых продуктов: Справочник / под ред. И. М. Скурихина, В. А. Тутельяна. М.: ДеЛи принт, 2002. 126 с. URL: [https://www.studmed.ru/skurihin-im-red-himicheskij-sostav-rossijskih-pishevyh-produktov\\_8fc891f30c3.html](https://www.studmed.ru/skurihin-im-red-himicheskij-sostav-rossijskih-pishevyh-produktov_8fc891f30c3.html) (дата обращения: 15.05.2019).

**Химический состав масличных культур**  
**The chemical composition of oilseeds**

Вид зерна / Type of grain	Вода, % / Water, %	Белок, % / Protein, %	Жир, % / Fat, %	Углеводы усвояемые, % / Digestible carbohydrates, %	Пищевые волокна, % / Alimentary fiber, %	Зола, % / Ash, %
Горох / Peas	14,0	20,5	2,0	49,5	11,2	2,8
Соя / Soy	12,0	34,9	17,3	17,3	13,5	5,0
Подсолнечник / Sunflower	8,0	20,7	42,9	10,5	5,0	2,9
Рапс / Rape	8,1	30,8	43,6	7,2	5,8	4,5
Фасоль / Beans	14,0	21,0	2,0	47,0	12,4	3,6
Чечевица / Lentils	14,0	24,0	1,5	46,3	11,5	2,7
Горчица / Mustard	6,4	25,8	30,8	23,4	8,8	4,8

Температура разложения эруковой кислоты – 380 °С, а плавления – 33,8 °С<sup>8</sup>.

Зерновое сырье и другие компоненты, используемые для производства комбикормов, нередко обсеменены микроорганизмами, где присутствуют токсичные для человека и животных продукты метаболизма этих грибов. Обеззараживание всех компонентов улучшает качество комбикормов.

Использование в комбикормах рыбной, мясокостной муки, мелассы, жиров и других незерновых компонентов невозможно без глубокой тепловой обработки [6].

Достижение температуры обрабатываемого комбикорма 170–180 °С в настоящее время [7; 8] осуществляется в несколько этапов с применением сложных технологических схем и дорогостоящего оборудования: первый этап – нормализация смеси, то есть рассыпной комбикорм паром прогревается до 100 °С; второй – смесь пропускается через экспандер, где подогревается до 130 °С, затем – в экструдер,

где температура смеси достигает 150 °С и в заключение корма подаются в гранулятор, где температура гранул достигает 180 °С [9; 10]. Этой температуры недостаточно для более глубокой декстринизации (только 60 %). На всех трех этапах повышение температуры корма достигается трением при высоком давлении, что энергоемко. Все это ведет к увеличению удельного расхода электроэнергии. Технологическую схему тепловой обработки ингредиентов комбикормов следует упростить, что значительно снизит удельную энергоемкость, металлоемкость и капиталоемкость; это возможно при выполнении процесса тепловой обработки в области сухого пара<sup>9</sup> [11; 12].

#### Материалы и методы

Исходя из мировых тенденций развития энергетики, необходимо переводить процесс баротермической обработки в более высокую область фазовой диаграммы системы  $p, t$  (давление, температура). В  $p, t$ -диаграмме фазового состояния воды рабочий

<sup>8</sup> Эруковая кислота [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 15.05.2019).

<sup>9</sup> Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Изд. 3-е. М.: Pergamon Press, 1994. Ч. 1. Т. 5. 584 с. URL: [http://old.pskgu.ru/ebooks/landau\\_05.html](http://old.pskgu.ru/ebooks/landau_05.html) (дата обращения: 15.05.2019).

процесс тепловой обработки комбикормов смещен от нулевой к критической точке (374 °C)<sup>10</sup> [13]. Это участок зоны перегретого пара с параметрами температуры 300–374 °C, давления 12–21 МПа и экспозицией обработки 30–60 с (рис. 1)<sup>11</sup>, что позволяет исключить высокзатратные несовершенные процессы (экспандирование, экструдирование, гранулирование), упростить структурную схему поточных линий по производству гранулированных кормов, в несколько раз снизить энергоемкость и металлоемкость, использовать отработанный пар (120–150 °C) на предварительную тепловую обработку сои, рапса, зернового сырья, а также мелассы, жира и других добавок, применить цифровые технологии и малоёмкостные поточные автоматизированные линии по производству обезвреженных, экологически чистых рассыпных, гра-

нулированных, лечебных кормов, а также вспученного фуражного зерна.

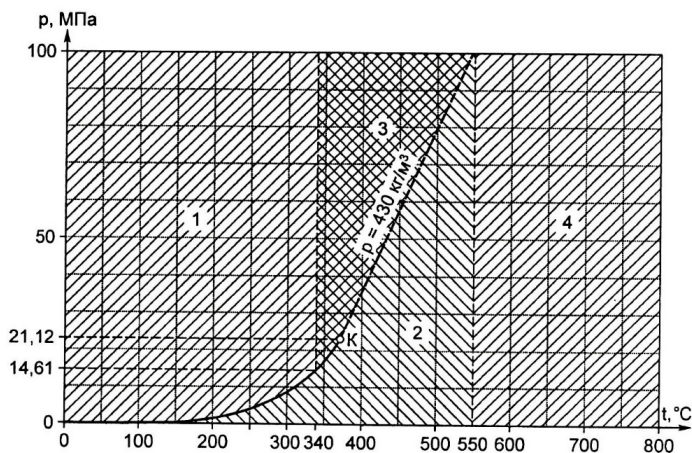
*Энтальпия системы теплового процесса*

Известно, что в результате подвода теплоты к телу ее температура повышается и вследствие увеличения объема тела производится внешняя работа; подведенная к телу теплота расходуется на увеличение внутренней энергии тела  $U$  и на совершение работы  $L$ <sup>12</sup> [14].

Это выражается уравнением:

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2}, \quad (1)$$

где  $Q_{1-2}$  – теплота, сообщенная телу при нагревании от состояния 1 до состояния 2;  $\Delta U_{1-2}$  – изменение внутренней энергии тела в том же процессе, равное разности внутренних энергий системы в точках 2 и 1;  $L_{1-2}$  – работа, совершенная телом в процессе перехода системы



Р и с. 1. Области применения уравнений состояния Международной системы в  $p, t$ -диаграмме:  $K$  – критическая точка

F i g. 1. Fields of application of equations of state International system in  $p, t$ -diagram:  $K$  – critical point

<sup>10</sup> Toggerson B. K., Nguyen D. Physics 131: Forces, Energy and Entropy. Physics Educational Materials. Amherst, Massachusetts: University of Massachusetts Amherst Libraries, 2017. 443 p. URL: [https://scholarworks.umass.edu/physics\\_ed\\_materials/1](https://scholarworks.umass.edu/physics_ed_materials/1) (дата обращения: 15.05.2019).

<sup>11</sup> Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. Изд. 2-е. М.: Энергоатомиздат, 1984. 80 с. URL: <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/p/PNB/learning/Thermodynamics/Tab4/33380.pdf> (дата обращения: 15.05.2019).

<sup>12</sup> Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. М.: «Энергия», 1974. С. 34.

из точки 1 в точку 2 (повышение давления в котле).

Уравнение (1) выражает первый закон термодинамики или частный случай общего закона сохранения энергии: для любой изолированной системы количество энергии, заключенное в этой системе, сохраняется неизменным.

Это же соотношение, записанное в дифференциальной форме, имеет вид:

$$dQ = dU + dL. \quad (2)$$

Принято, что теплота, подводимая к системе, считается положительной, а теплота, отводимая от системы – отрицательной. Соответственно, работу, производимую системой, считать положительной, а работу, совершаемую над системой – отрицательной.

Так как работа расширения является функцией процесса  $p, V$ -диаграммы, то уравнение (2) можно записать:

$$dQ = dU + pdV. \quad (3)$$

Сумма внутренней энергии системы  $U$  и произведения давления системы  $p$  на величину объема системы  $V$  называется энтальпией (теплосодержанием) и обозначается через  $H$ :

$$H = U + pV. \quad (4)$$

Энтальпия – это та энергия, которая доступна для преобразования в теплоту или работу при определенной температуре и давлении. Энтальпия измеряется в тех же единицах, что и теплота, работа, внутренняя энергия.

Первый закон термодинамики характеризует процессы превращения энергии теплоты или работы с количественной стороны<sup>13</sup>.

Второй закон термодинамики характеризует качественную сторону этих

процессов. Так же как и первый закон, он сформулирован на основании опытов: любой реальный самопроизвольный процесс является необратимым. Теплота не может сама собой переходить от более холодного тела к более нагретому, поэтому идею о существовании вечного двигателя второго рода осуществить невозможно (Планк)<sup>14</sup>.

Термическим коэффициентом полезного действия (КПД) цикла  $\eta_B$  называется отношение работы цикла  $(Q_1 - Q_2)$  к количеству теплоты  $Q_1$ , подведенного к рабочему телу в цикле:

$$\eta_T = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (5)$$

где  $Q_2$  – количество полезно использованной теплоты.

$$\eta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (6)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – начальная и конечная температура цикла.

Энтропия (от греческого «поворот») – степень неполноты, неопределенности знаний, впервые был введен Клаузиусом в термодинамике в 1865 году для определения меры необратимого рассеивания энергии, меры отклонения реального процесса от идеального:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad (7)$$

где  $dS$  – приращение энергии;  $\delta Q$  – минимальная теплота, подведенная к системе;  $T$  – абсолютная температура процесса.

Дифференциал энтальпии, выраженный в собственных переменных, через энтропию  $S$  и давление  $p$ :

$$dH = d(U + pV),$$

<sup>13</sup> Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика.

<sup>14</sup> Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. М: «Энергия», 1974. С. 54–56.

$$dH = \delta Q + Vdp, \quad (8)$$

$$dH = TdS + Vdp.$$

Энтальпией системы удобно пользоваться в тех случаях, когда в качестве независимых переменных, определяющих состояние системы, выбирают давление  $p$  и температуру  $T$ ,  $H(p, T)$ .

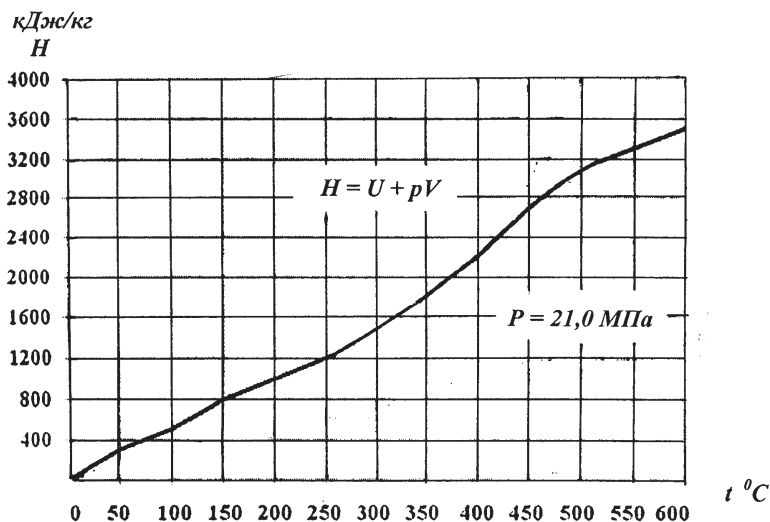
По таблице 3<sup>15</sup> рассчитаны и показаны изменения энтальпии (рис. 2) в диапазоне  $t$  от 0 до 600 °С и  $p$  от 0 до 21,0 МПа.

Из графика (рис. 2) видно, что энтальпия системы при температуре 300–400 °С в пять раз выше, чем при температуре на участке 100 °С, а коэффициент теплопередачи резко возрастает. Этот тепловой поток при высоком давлении и коэффициенте теплопередачи ускоряет прогрев комбикормов и многократно сокращает время обработки (от 60–70 минут до 50–60 секунд). При этом достигается экономия удельных затрат энергии и металлоемкости.

Удельный расход комбикормов при использовании измельченных смесей фуражного зерна, но не подверженных тепловой обработке, возрастает в 1,2...1,3 раза. В таком случае выгодно применять, в особенности для свиней, вспучивание отдельных видов фуражного зерна или их смесей.

Задача заключается в обеспечении заданных режимов баротермической обработки концентрированных кормов в непрерывном потоке за счет создания устройств загрузки и выгрузки в виде тепловых затворов, обеспечивающих непрерывную загрузку сырья и выгрузку обработанных кормов (при высоком давлении и температуре), что позволяет исключить простой реактора при загрузке и выгрузке, повысить КПД реактора и его производительность, при этом снизить потери энергии [14].

Реактор баротермической обработки концентрированных кормов<sup>16</sup> [29] включает горизонтально расположенную емкость (далее корпус) 1 (рис. 3)



Р и с. 2. Изменения энтальпии  $H$  при увеличении  $p$  от 0 до 21,0 МПа и  $t$  от 0 до 600 °С  
 F i g. 2. Changes in the enthalpy  $H$  with increasing  $p$  from 0 to 21,0 MPa and  $t$  from 0 to 600 °С

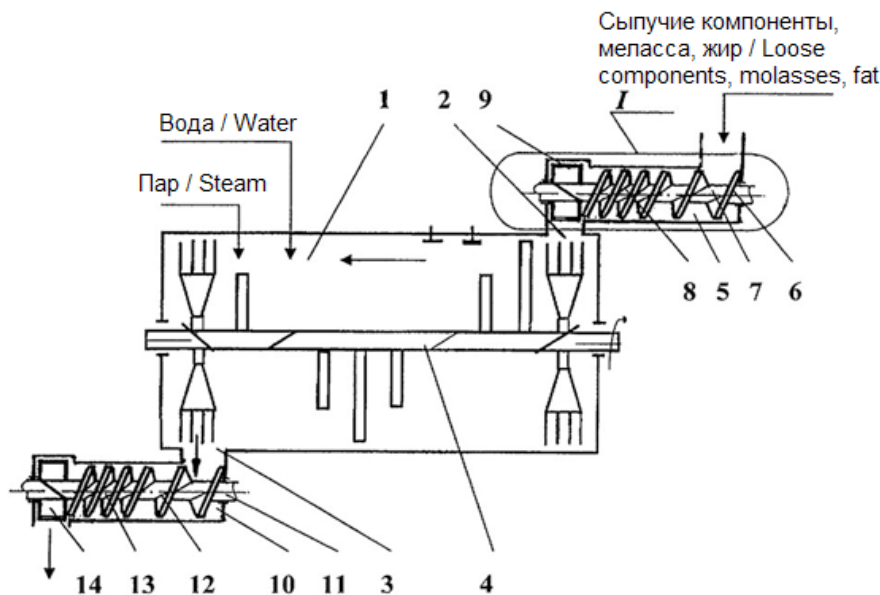
<sup>15</sup> Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. С. 42–43.

<sup>16</sup> Реактор баротермической обработки концентрированных кормов: пат. 2429731 Рос. Федерация. № 2010109483/13; заявл. 12.03.2010; опубл. 27.09.2011. Бюл. № 27.

с загрузочной горловиной 2, выгрузным люком 3 и рабочим органом 4. На загрузочной горловине 2 установлен тепловой затвор загрузки, состоящий из цилиндрического корпуса 5, внутри которого на валу 6 последовательно расположены: двухступенчатый шнек, прецизионно сопряженный с корпусом затвора (рис. 4), ленточная навивка и лопасти квадратной формы 9, установленные под углом  $\alpha = 30^\circ$  к оси вала, имеющие рабочие кромки, заточенные под углом  $15-20^\circ$ . К выгрузному люку 3 присоединен тепловой затвор выгрузки, состоящий из цилиндрического корпуса 10, внутри которого на валу 11 последовательно расположены: двухступенчатый шнек с ленточной навивкой (12 и 13) и лопасти квадратной фор-

мы 14, установленные под углом  $30^\circ$  к оси вала, имеющие рабочие кромки, заточенные под углом  $15-20^\circ$ .

Конструктивное выполнение тепловых затворов загрузки и выгрузки в виде последовательно установленных на валу двухступенчатого шнека и лопастей позволяет за счет исполнения шнека, имеющего ленточную навивку (шаг навивки  $S$  первой ступени больше шага навивки второй ступени  $S1$  в 2 раза), принимать рассыпной концентрированный корм (сырье) первой ступени, перемещать его вдоль оси вала ко второй ступени, в которой происходит уплотнение и продавливание за счет изменения шага навивки и дальнейшее продвижение до встречи с лопастями, которые в свою очередь измельчают

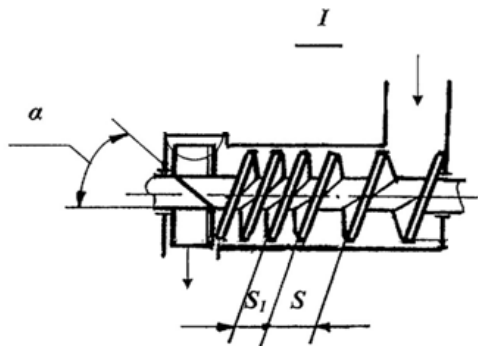


Р и с. 3. Реактор баротермической обработки концентрированных кормов:

- 1 – корпус реактора; 2 – загрузочная горловина реактора; 3 – выгрузной люк; 4 – рабочий орган реактора; 5 – корпус теплового затвора загрузки; 6 – вал; 7 – двухступенчатый шнек; 8 – одноступенчатый шнек; 9 – лопасти; 10 – корпус теплового затвора выгрузки; 11 – вал теплового затвора; 12 – первая ступень двухступенчатого шнека; 13 – вторая ступень шнека; 14 – лопасти

F i g. 3. Reactor for barothermal processing of concentrated feed:

- 1 – reactor vessel; 2 – reactor loading neck; 3 – unloading hatch; 4 – reactor operating unit; 5 – heat load valve case; 6 – shaft; 7 – two-stage auger; 8 – one-stage auger; 9 – blades; 10 – body of the thermal discharge valve; 11 – shaft of the thermal shutter; 12 – first stage of the two-stage auger; 13 – second stage of the auger; 14 – blades



Р и с. 4. Тепловой затвор  
F i g. 4. Thermal shutter

уплотненную массу. Так как одним из основных условий работы реактора при баротермической обработке кормов является поддержание постоянного давления и температуры, то уплотненный во второй ступени шнека корм не дает возможности выхода, находящегося под давлением пара и соответственно потери теплоты, причем достигается это за счет прецезионного сопряжения между шнеком и корпусом. Измельчение уплотненной массы необходимо для равномерной дальнейшей баротермической обработки корма.

За счет наличия двух затворов одинаковой конструкции упрощается строение самого реактора и его обслуживание, так как он работает в непрерывном режиме.

Реактор баротермической обработки концентрированных кормов (рис. 3) работает следующим образом: концентрированный рассыпной корм (комбикорм или его компоненты) непрерывным потоком поступает в корпус 5 теплового затвора загрузки, непосредственно на первую ступень 7 двухступенчатого шнека, расположенного на валу 6, которая перемещает его вдоль оси вала ко второй ступени 8, при этом сыпучий корм уплотняется, частично разрушается, далее в спрессованном виде он передается к лопастям 9, имеющим заточенные рабочие кромки, которыми измельчается и принудительно самими

лопастями передается в загрузочную горловину 2 корпуса 1 реактора, в котором под воздействием высокой температуры и давления происходит баротермическая обработка корма, при этом рабочий орган 4 реактора производит рыхление, смешивание и перемещение его вдоль корпуса 1 к выгрузочному люку 3, под которым расположен тепловой затвор выгрузки. Выгрузка из реактора происходит принудительно рабочим органом 4 реактора в корпус 10 теплового затвора выгрузки непосредственно на первую ступень 12 двухступенчатого шнека, расположенного на валу 11 теплового затвора, которая перемещает его вдоль оси вала ко второй ступени 13, при этом на второй ступени сыпучий корм уплотняется и в спрессованном виде передается к лопастям 14, которыми измельчается и принудительно выталкивается наружу.

Использование данного реактора при баротермической обработке рассыпных концентрированных кормов позволяет исключить остановку реактора на загрузку и выгрузку, за счет надежной конструкции тепловых затворов загрузки и выгрузки (рис. 4), что дает возможность обеспечить непрерывную (поточную) работу реактора под рабочим давлением пара, ускорить время обработки, повысить производительность, сократить потери теплоты, а следовательно и энергии, при гаран-



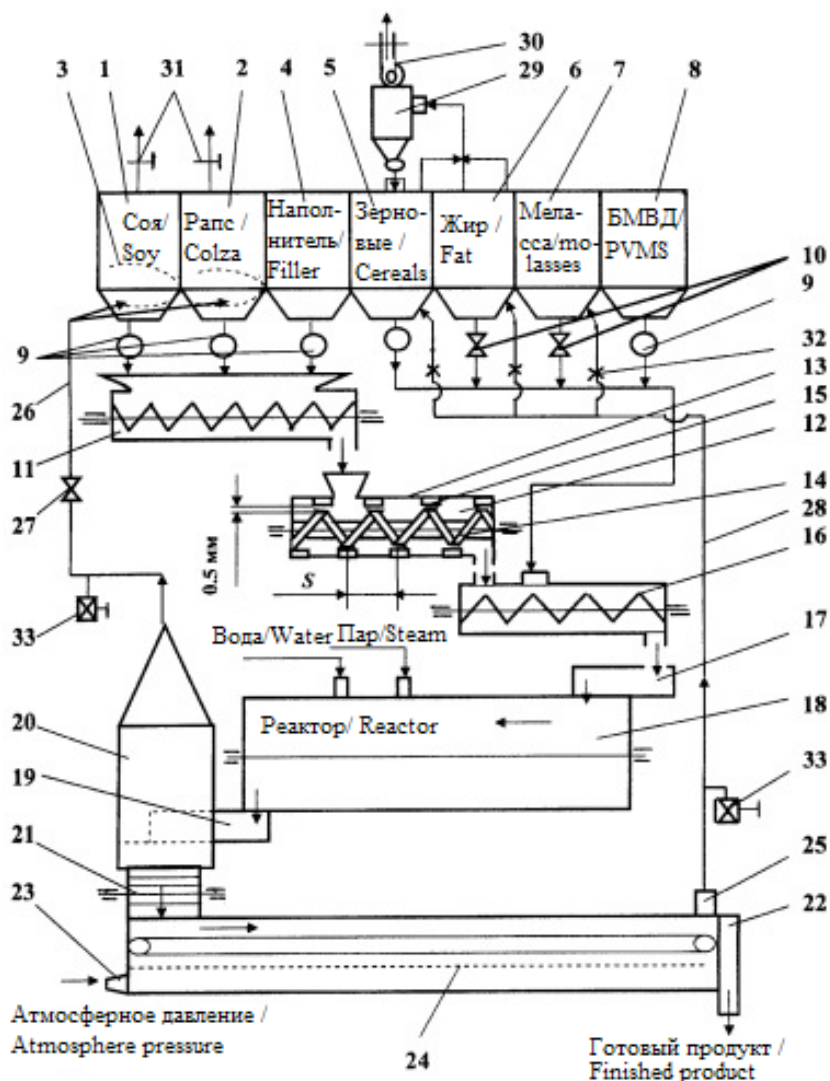
тированном выполнении процесса декстринизации крахмала и санитарной обработки концентрированных кормов.

Линия тепловой обработки комбикормов (рис. 5)<sup>17</sup> включает приемный бункер для сои 1 (soy receiving bin 1) и приемный бункер для рапса 2 (rapeseed receiving bin 2) с установленными в их нижней части теплообменниками 3 (heat exchangers 3), бункер для наполнителей 4 (filler bin 4), для зерновых 5 (grain bin 5), для жира 6 (fat bin 6), для мелассы 7 (molasses hopper 7), для БМВД 8 (protein-vitamin mineral supplements bin 8), дозаторы непрерывного действия 9 (continuous dispensers 9) или краны 10 (cranes 10); под приемными бункерами для сои 1 (soy receiving bin 1), рапса 2 (rapeseed receiving bin 2) и наполнителей 4 (filler bin 4) размещен смеситель 11 (mixer 11), последовательно сообщенный с винтовой зерноплющилкой 12 (grain crusher 12), внутри цилиндрического корпуса которой 13 (cylindrical housing 13) расположены цилиндрический шнек 14 (cylindrical auger 14) с однозаходным винтовым элементом и радиальные кольца 15 (radial rings 15), установленные на внутренней стороне цилиндрического корпуса 13 (cylindrical housing 13) на расстоянии друг от друга равном шагу S-ленточной резьбы шнека с зазором к виткам шнека 0,5 мм и имеющие высоту 3–4 мм, и шнековым транспортером 16 (screw conveyor 16), соединенным с тепловым затвором загрузки 17 (thermal shutter boot 17) реактора баротермической обработки 18 (barothermal processing reactor 18), имеющего тепловой затвор выгрузки 19 (thermal shutter discharge 19), встроенный в газгольдер 20 (gazgolder 20), который нижней частью, посредством барабанного шлюза 21 (drum gateway 21) соединен с охладителем 22 (chiller 22), снабженным механизмом дозированной подачи атмосферного воздуха 23 (atmospheric

dosing mechanism 23), перфоратором 24 (perforator 24) и механизмом регулирования количества отбора теплоносителя 25 (mechanism for regulating the amount of coolant selection 25), а верхней частью посредством паропровода 26 (steam lines 26), имеющего кран 27 (crane 27), сообщен с теплообменниками 3 (heat exchangers 3) приемных бункеров 1 и 2 (receiving hopper 1 and 2), при этом охладитель 22 (chiller 22) через тепловую магистраль 28 (heat line 28) сообщен с приемными бункерами 5–7 (receiving bins 5–7). Над приемным бункером для зерновых 5 (receiving bin for grain 5) установлен циклон 29 (cyclone 29) с вентилятором 30 (fan 30), над приемными бункерами для сои 1 и рапса 2 (receiving bins for soybean 1 and rapeseed 2) установлены предохранительные клапаны 31 (safety valve 31), а на входе пара в приемные бункера для зерновых 5 (receiving bin for grain 5), жира 6 (fat bin 6), мелассы 7 (molasses hopper 7) установлены паровые краны 32 (steam taps 32). Паропровод 26 (steam lines 26) и тепловая магистраль 28 (heat line 28) снабжены устройством для сбора и слива конденсата 33 (device for collecting and draining condensate 33).

Работа линии тепловой обработки комбикормов (рис. 5) осуществляется следующим образом. Исходное сырье (ингредиенты) засыпают в приемные бункеры: 1 – для сои, 2 – для рапса, 4 – для наполнителя, 5 – для зерновых, 6 – для жира, 7 – для мелассы, 8 – для БМВД. При работающем реакторе баротермической обработки 18 через тепловой затвор выгрузки 19 и газгольдер 20 по паропроводу 26 и при открытом кране 27 пар под давлением поступает в теплообменники 3 приемных бункеров для сои 1 и для рапса 2, где происходит предварительное запаривание сои и рапса. Далее установленную дозу каждого из перечисленных компонентов подают в смеситель 11 дозаторами

<sup>17</sup> Линия тепловой обработки комбикормов: пат. 2480132 Рос. Федерация. № 2011145708/13; заявл. 10.11.2011; опубл. 27.04.2013. Бюл. № 12.



Р и с. 5. Линия тепловой обработки комбикормов  
 Fig. 5. Heat treatment line of mixed feeds

непрерывного действия 9 из приемных бункеров 1, 2, 4. Смесь равномерным потоком высыпается в винтовую зерноплющилку 12, в которой за счет шнека 14, расположенного в цилиндрическом корпусе 13 и имеющего однозаходный винтовой элемент, продавливается вдоль зерноплющилки и в процессе продавливания через зазор, равный

0,5 мм между кольцами 15, установленными на внутренней стороне цилиндрического корпуса 13 на расстоянии друг от друга, равном шагу S-ленточной резьбы шнека, и имеющих высоту 3–4 мм, и витками шнека 14, происходит плющение и измельчение частиц до размеров толщиной менее 0,5 мм, чем обеспечивается хороший доступ

пара при дальнейшей обработке в баротермическом реакторе 18. Обработанная смесь сои, рапса и наполнителя поступает в шнековый транспортер 16, в который также посредством дозаторов непрерывного действия 9 и кранов 10 подаются ингредиенты из приемных бункеров 5–8, все составляющие смешиваются и перемещаются через тепловой затвор загрузки 17 в реактор баротермической обработки 18, где при заданных температуре, давлении и экспозиции происходит кондиционирование, гомогенизация кормов с одновременным перемещением обрабатываемой массы в сторону теплового затвора выгрузки 19, который также встроен в газгольдер 20, и далее обработанный комбикорм посредством барабанного шлюза 21 выгружается в охладитель 22, в который подается атмосферный воздух, регулируемый механизмом дозированной подачи 23 и, равномерно распределяясь по всей длине охладителя, снабженного перфоратором 24, охлаждается и выпускается в тару. При включенном вентиляторе 30 циклона 29 и посредством механизма регулирования количества отбора теплоносителя 25 по тепловой магистрали 28 тепло из охладителя подается к приемным бункерам 5–7 для подогрева зерновых, жира и мелассы и регулируется паровыми кранами 32. Небольшая часть ингредиентов (зерновых) засасывается пневмосистемой и, оседая в циклоне 29, сыпается в приемный бункер 5 для дальнейшей переработки. Образовавшийся конденсат с устройства для сбора и слива 33 на паровой системе 26 и тепловой магистрали 28 удаляют при неработающей линии. Избыток давления (пара), поступающего в теплообменники приемных бункеров 1 и 2, стравливают через предохранительные

клапаны 31. Линия тепловой обработки работает в непрерывном поточном режиме: содержит реактор с регулируемыми загрузочным и выгрузным затворами, узлы подготовки и подачи всех ингредиентов, пульт с интеллектуальной системой управления, исполняющий заданный технологический алгоритм работы, составленный на основе цифровой технологии и конструктивных параметров, представленных в статье.

#### Обсуждение и заключение

Перевод процесса баротермической обработки ингредиентов комбикормов в зону 300–374 °С и давления 12–21 МПа  $p, t$ -диаграммы обеспечивает стерильность, интенсификацию и надежность процесса перевода вредных и плохо усвояемых составляющих элементов зерновых и бобовых в полезные, легко усвояемые корма [15].

Применение реактора баротермической обработки кормов с тепловыми затворами взамен автоклавов и запарникам обеспечивает непрерывную поточную работу линии, экономию времени обработки и тепловой энергии<sup>18</sup>.

Линия тепловой обработки комбикормов с реактором совмещает энергоемкие процессы нормализации, экспандирования, экструдирования и гранулирования, при этом повышается качество обработки, снижается удельная энергоемкость и металлоемкость<sup>19</sup>. Комбикорма очищаются от сальмонеллы, патогенных бактерий, грибов и плесени. Время обработки 60–120 секунд. Представленный режим баротермической обработки и конструктивные решения линии могут быть полезными при разработке проектов на базе цифровых технологий комбикормовых предприятий и цехов животноводческих и птицеводческих ферм.

<sup>18</sup> Сыроватка В. И. Тепловая обработка комбикормов. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства РАСХН, 2015. С. 68–74.

<sup>19</sup> Сыроватка В. И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах. М.: ГНУ ВНИИМЖ, 2010. 248 с. <https://www.twirpx.com/file/1866990/> (дата обращения: 15.05.2019).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Измайлов А. Ю.** Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // Вестник российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 536–538. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>
2. **Голикова Т. А.** Научное обеспечение реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации. Выступление заместителя председателя Правительства РФ // Вестник Российской академии наук. 2019, Т. 89, № 4. С. 311–314. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873894311-314>
3. **Madau F. A., Furesi R., Pulina P.** Technical Efficiency and Total Factor Productivity Changes in European Dairy Farm Sectors // Agricultural and Food Economics. 2017. Vol. 5, Issue 17. Pp. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40100-017-0085-x>
4. **Kostlivý V., Fuksová Z.** Technical Efficiency and Its Determinants for Czech Livestock Farms // Agricultural Economics. 2019. Vol. 65, Issue 4. Pp. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.17221/162/2018-AGRICECON>
5. Subsidies and Technical Efficiency in Agriculture: Evidence from European Dairy Farms / L. La-truffe [et al.] // American Journal of Agricultural Economics. 2017. Vol. 99, Issue 3. Pp. 783–799. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajae/aaw077>
6. **Kharmanda G.** The Safest Point Method as an Efficient Tool for Reliability-Based Design Optimization Applied to Free Vibrated Composite Structures // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. Т. 17, № 2 (89). С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>
7. **Ferket P. R.** Technological Advances Could Make Extrusion an Economically Alternative to Pelleting // Feedstuffs. 1991. Vol. 63, Issue 9. Pp. 19–21. URL: <http://edepot.wur.nl/121964> (дата обращения: 15.05.2019).
8. **Krolczyk J. B.** Homogeneity Assessment of Multi-Element Heterogeneous Granular Mixtures by Using Multivariate Analysis of Variance // Tehnicki Vjesnik. 2016. Vol. 23, Issue 2. Pp. 383–388. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20151031183255>
9. **Best P.** Extruder Operating Costs. Comparisons with Double Pelleting in a Dutch Feedmill // Feed International. 1993. Vol 14, no. 6. Pp. 32–34.
10. **Wasserstein R. L., Lazar N. A.** The Asa’s Statement on P-Values: Context, Process and Purpose // The American Statistician. 2016. Vol. 70, no. 2. Pp. 129–133. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
11. **Krolczyk J. B.** The Effect of Mixing Time on the Homogeneity of Multi-Component Granular Systems // Transactions of Famera. 2016. Vol. 40, Issue 1. Pp. 45–56. URL: <https://hrcaak.srce.hr/file/229037> (дата обращения: 15.05.2019).
12. **Strielkowski W., Lisin E.** Economic Aspects of Innovations in Energy Storage // International Journal Of Energy Economics And Policy. 2017. Vol. 7, no. 1. Pp. 62–66. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/3528> (дата обращения: 15.05.2019).
13. **Khoshbin-e-Khoshnazar M. R.** Ice Phase Transition as a Sample of Finite System Phase Transition // Physics Education. 2016. Vol. 32, Issue 2. URL: <https://www.physedu.in/uploads/publication/23/371/4.-Ice-Phase-transition-as-a-sample-of-finite-system-phase--transition.pdf> (дата обращения: 15.05.2019).
14. **Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б.** Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 455–465. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895455-465>
15. **Лухт Х., Долуд М., Зябрев В.** Гидротермическая обработка соевых бобов // Комбикорма. 2019. № 1. С. 31–34. URL: <http://kombi-korma.ru/arkhiv/no-01-19> (дата обращения: 15.05.2019).

*Поступила 07.12.2019; принята к публикации 10.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019*

Об авторах:

**Сыроватка Владимир Иванович**, заведующий лабораторией ФГБНУ ВНИИМЖ, ИМЖ – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, Россия, г. Москва, поселение Рязановское, поселок Знамя Октября, д. 31), академик РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2846-9041>, [vniimzh@mail.ru](mailto:vniimzh@mail.ru)

**Жданова Наталья Владимировна**, инженер-исследователь ИМЖ, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, Россия, г. Москва, поселение Рязановское, поселок Знамя Октября, д. 31), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-044X>, [vniimzh@mail.ru](mailto:vniimzh@mail.ru)

**Рассказов Александр Николаевич**, ведущий научный сотрудник ИМЖ, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, г. Москва, поселение Рязановское, поселок Знамя Октября, д. 31), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-5404>, [vniimzh@mail.ru](mailto:vniimzh@mail.ru)

**Торопов Дмитрий Иванович**, полномочный представитель Республики Мордовия при Правительстве Российской Федерации, Постоянное представительство Республики Мордовия при Президенте Российской Федерации (127018, г. Москва, ул. Образцова, д. 29), [toropov54@mail.ru](mailto:toropov54@mail.ru)

Заявленный вклад соавторов:

В. И. Сыроватка – научное руководство, подготовка начального варианта текста, развитие методологии, представление данных в тексте, курирование данных; Н. В. Жданова – сбор данных и доказательств, изучение концепции, подготовка рисунков; А. Н. Рассказов – компьютерные работы, сбор данных и доказательств, формализованный анализ данных; Д. И. Торопов – критический анализ и доработка текста, курирование данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Izmailov A.Yu. Smart Technologies and Robotic Tools in Agricultural Production. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019; 89(5):536-538. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>
2. Golikova T.A. Scientific Support of the Implementation of the Priorities of the Scientific and Technological Development of the Russian Federation. Speech by Deputy Prime Minister of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019; 89(4):311-314. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873894311-314>
3. Madau F.A., Furesi R., Pulina P. Technical Efficiency and Total Factor Productivity Changes in European Dairy Farm Sectors. *Agricultural and Food Economics*. 2017; 5(17):1-14. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40100-017-0085-x>
4. Kostlivý V., Fuksová Z., Carpentier A. Technical Efficiency and Its Determinants for Czech Livestock Farms. *Agricultural Economics*. 2019; 65(4):175-184. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/162/2018-AGRICECON>
5. Latruffe L., Bravo-Ureta B.E. Subsidies and Technical Efficiency in Agriculture: Evidence from European Dairy Farms. *American Journal of Agricultural Economics*. 2017; 99(3):783-799. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1093/Ajae/Aaw077>
6. Kharmanda G. The Safest Point Method as an Efficient Tool for Reliability-Based Design Optimization Applied to Free Vibrated Composite Structures. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2017; 17(2):46-55. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>
7. Ferket P.R. Technological Advances Could Make Extrusion an Economically Alternative to Pelling. *Feedstuffs*. 1991; 63(9):19-21. Available at: <http://edepot.wur.nl/121964> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)

8. Krolczyk J.B. Homogeneity Assessment of Multi-Element Heterogeneous Granular Mixtures by Using Multivariate Analysis of Variance. *Tehnicki Vjesnik*. 2016; 23(2):383-388. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20151031183255>
9. Best P. Extruder Operating Costs. Comparisons with Double Pelleting in a Dutch Feedmill. *Feed International*. 1993; 14(6):32-34. (In Eng.)
10. Wasserstein R.L., Lazar N.A. The ASA's Statement on P-Values: Context, Process and Purpose. *The American Statistician*. 2016; 70(2):129-133. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
11. Krolczyk J.B. The Effect of Mixing Time on the Homogeneity of Multi-Component Granular Systems. *Transactions of Famena*. 2016; 40(1):45-56. Available at: <https://hrcak.srce.hr/file/229037> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)
12. Strielkowski W., Lisin E. Economic Aspects of Innovations in Energy Storage. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2017; 7(1):62-66. Available at: <https://www.econjournals.com/index.php/ijee/article/view/3528> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)
13. Khoshbin-e-Khoshnazar M.R. Ice Phase Transition as a Sample of Finite System Phase Transition. *Physics Education*. 2016; 32(2). Available at: <https://www.physedu.in/uploads/publication/23/371/4.-Ice-Phase-transition-as-a-sample-of-finite-system-phase--transition.pdf> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)
14. Kovalchuk M.V., Naraykin O.S., Yatsishina E.B. Nature-Like Technologies: New Opportunities and New Challenges. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019; 89(5):455-465. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895455-465>
15. Luht H., Dolud M., Zyabrev V. Hydrothermal Treatment of Soybeans. *Kombikorma* = Mixed Feeds. 2019; (1):31-34. Available at: <http://kombi-korma.ru/arkhiv/no-01-19> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)

*Received 07.12.2018; revised 10.04.2019; published online 30.09.2019*

*About authors:*

**Vladimir I. Syrovatka**, Head of Laboratory of Institute of Livestock Mechanization Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (31 Poselok Znamya Oktyabrya, Poselenie Ryazanovskoe, Moscow 108823, Russia), Academician of RAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2846-9041>, [vniimzh@mail.ru](mailto: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, Poselenie Ryazanovskoe, Moscow 108823, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-044X>, [vniimzh@mail.ru](mailto: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, Poselenie Ryazanovskoe, Moscow 108823, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-5404>, [vniimzh@mail.ru](mailto:vniimzh@mail.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, Russia), [toropov54@mail.ru](mailto:toropov54@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

V. I. Syrovatka – scientific management, writing the draft, development of the methodology, presentation of data in the text, supervising the data; N. V. Zhdanova – collecting data and evidence, studying the concept, preparing the drawings; A. N. Rasskazov – computer work, data collection and evidence, formal data analysis; D. I. Toropov – critical analysis and revision of the text, supervising the data.

*All authors have read and approved the final manuscript.*



## Метод определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов

Н. Н. Барышева\*, С. П. Пронин

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (г. Барнаул, Россия)

\*[mnn-t@mail.ru](mailto:mnn-t@mail.ru)

*Введение.* Всхожесть семян пшеницы является важным показателем их качества, используется для расчета и корректировки нормы высева. При определении всхожести необходимо учитывать ее изменения на этапе хранения. Решением данной проблемы станет разработка метода, который позволит определять всхожесть на любой технологической стадии (на этапах уборки, хранения, высева). Целью статьи является исследование зависимости мембранного потенциала от качества семян, разработка метода определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов.

*Материалы и методы.* Проведенный авторами обзор научных работ, посвященных методам оценки качества семян пшеницы, свидетельствует о необходимости разработки высокочувствительных методов определения количественной характеристики всхожести с целью обеспечения скорости измерения и получения более точных результатов для дальнейшего использования. В результате проведенного обзора был разработан подход, который позволяет решить поставленную задачу посредством использования метода, основанного на исследовании мембранного потенциала зерен пшеницы.

*Результаты исследования.* В данной статье проведено исследование зависимости мембранного потенциала семян пшеницы от их всхожести. Полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили, что значение потенциала может быть использовано для оценки качества семян. Определены требования и оптимальные условия проведения экспериментальных исследований.

*Обсуждение и заключение.* В результате исследования была установлена зависимость мембранного потенциала семян пшеницы от их всхожести, разработан метод определения всхожести семян пшеницы. Реализация данного метода позволит сельскохозяйственным предприятиям и фермерским хозяйствам проводить экспресс-оценку всхожести семян пшеницы на любой технологической стадии (на этапах уборки, хранения, высева).

**Ключевые слова:** зерна пшеницы, метод, оценка качества, всхожесть, мембранный потенциал

**Для цитирования:** Барышева Н. Н., Пронин С. П. Метод определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 443–455. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.443-455>

© Барышева Н. Н., Пронин С. П., 2019



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

## Method of Determining Seed Germination by Using Membrane Potential of Wheat Seeds

N. N. Barysheva\*, S. P. Pronin

*Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia)*

\**mnn-t@mail.ru*

*Introduction.* The germination of wheat seeds is an important indicator of their quality, used to calculate and adjust the seeding rate. It is necessary to take into account germination changes at the storage stage. The solution of this problem will be development of a method that will allow to determinate germination at any technological stage (at the stage of harvesting, storage, seeding). The aim of the article is to study the dependence of membrane potential on grain quality, to develop a method for determining the germination of wheat seeds based on their membrane potentials.

*Materials and Methods.* The authors' review of research papers about methods of assessing the wheat seeds quality indicates the need for the development of highly sensitive methods of the germination test, which allow one to ensure the speed of measurement and obtain more accurate results for further use. An approach was developed on the basis of the review, which allows for solving the problem using the method based on the study of membrane potentials of wheat seeds.

*Results.* In this article, the study of the dependence of wheat seeds membrane potential from their germination was conducted. The results of experiments confirmed that the value of the potential could be used as quality assessment parameter. The requirements and optimal conditions for conducting the experiment were determined.

*Discussion and Conclusion.* The dependence of the wheat seeds membrane potential on their germination was established and the method for determining wheat seeds germination was developed. The implementation of this method will allow agricultural enterprises and farms to carry out the rapid assessment of wheat seeds germination at any technological stage (at the stage of harvesting, storage, seeding).

**Keywords:** wheat seed, method, quality assessment, germination, membrane potential

**For citation:** Barysheva N.N., Pronin S.P. Method of Determining Seed Germination by Using Membrane Potential of Wheat Seeds. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):443-455. DOI: <http://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.443-455>

### Введение

Зерна пшеницы представляют собой основу сельскохозяйственной промышленности в России и во всем мире. Жизнеспособность семян является основным критерием диагностики качества, тесно связанным с процентом всхожести<sup>1</sup>. Известно, что для оценки качества семян определяют их всхожесть [1].

Этот показатель представляет собой количественную характеристику и выражается в процентах. Общепринятая

градация всхожести варьируется до 100 % с шагом в 1 % [2].

Проблема диагностики всхожести семян пшеницы заключается в том, что она изменяется в процессе хранения [3]. Сельскохозяйственные предприятия, фермерские хозяйства должны в кратчайшие сроки получать достоверный результат для расчета и корректировки объема семян для посева. Мониторинг их состояния во время хранения важен для обеспечения сохранности высококачественных коллекций [4].

<sup>1</sup> Hampton J. G., TeKrony D. M. Handbook of Vigour Test Methods. Zurich: ISTA, 1995. 117 p. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19960707176> (дата обращения: 01.06.2019).



Оценка физиологического потенциала семян является основным компонентом контроля их качества.

Цель работы – исследовать зависимость мембранного потенциала от качества семян и разработать метод определения всхожести семян пшеницы на основе их мембранных потенциалов.

### Обзор литературы

Традиционные методы диагностики качества семян пшеницы в соответствии с правилами Международной ассоциации по контролю качества семян (ISTA) включают лабораторные методы с использованием регуляторов роста [5], методы окрашивания тетразолием<sup>2</sup> [6; 7], тесты жизнеспособности [2; 8]. Однако это трудоемкие, затратные по времени процессы [9].

В настоящее время существует ряд других методов оценки качества семян пшеницы. Эти методы основаны на обнаружении различных физических свойств, которые хорошо коррелируют с определенными факторами качества. Многие методы основаны на одном из следующих свойств: плотность, твердость, колебательные характеристики, передача рентгеновских лучей и гамма-лучей, оптическое отражение, электрические свойства и ядерный магнитный резонанс [10]. В оптических методах используют оптическое оборудование и компьютеризированную обработку данных, которые способны обеспечить высокоскоростную оценку качества и сортировку нескольких продуктов с высокой степенью точности [2].

Использование различных современных технологий получения изображений, таких как твердотельная телевизионная камера, камера линейного сканирования, рентгеновское сканирование, ультразвуковое сканирование

и визуализация, в сочетании с технологиями обработки изображений открыли новые возможности для исследователей при разработке новых и усовершенствовании существующих методов неразрушающей оценки качества сельскохозяйственной продукции [10]. Однако эти методы требуют дорогостоящего оборудования, высокой квалификации и соответствующей подготовки специалистов.

Многие методы позволяют получить статус прорастания в градации: положительный (семена проросли), отрицательный (семена не проросли) [2; 11].

В приведенной классификации методов оценки качества семян отсутствуют методы, основанные на измерении биоэлектрических сигналов непосредственно с зерен пшеницы. В данном случае исключаются методы электрической диагностики, основанные, например, на измерении тока, пропускаемого через зерно, или измерении его сопротивления.

Известно, что генерация биоэлектрических сигналов играет важную роль в жизни растений, так как характеризует их физиологическое состояние [2; 3; 5; 7]. Все высшие растения могут использовать биоэлектрические сигналы для регулирования различных физиологических функций [3], поэтому анализ природы и закономерностей электрических сигналов [12] у растений представляется весьма актуальным<sup>3</sup>.

Функциональная роль биоэлектрических сигналов [2; 3; 13; 14] в высших растительных организмах привлекает пристальное внимание исследователей [15; 16; 23; 24].

Так, роль мембранных потенциалов была изучена наиболее тщательно для относительно небольшой группы

<sup>2</sup> **Peters J., Lanham B.** Tetrazolium Testing Handbook: Contribution no. 29 to the Handbook on Seed Testing. Lincoln, Neb.: The Association, 2000. URL: <https://www.worldcat.org/title/tetrazolium-testing-handbook-contribution-no-29-to-the-handbook-on-seed-testing/oclc/49853771#relatedsubjects> (дата обращения: 01.06.2019).

<sup>3</sup> **Hlavachova Z.** Electrical Properties of Agricultural Products // Encyclopedia of Agrophysics. 2011. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1\\_47](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_47)

так называемых «подвижных» растений, которые используют потенциал действия для быстрого локомоторного ответа под действием неблагоприятных факторов [3]. В настоящее время установлено, что мембранный потенциал представляет собой сигнал, который вызывает кратковременные переходные изменения во многих жизненно важных процессах (дыхание, фотосинтез, рост и т. д.) на этапе их распространения [13; 14; 16; 24].

Согласно теории Гольдмана – Ходжкина – Катца (ГНК) мембранный потенциал определяется коэффициентами проницаемости для ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  и концентрациями ионов на внешней и внутренней сторонах мембраны:

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K [K^+]_{out} + P_{Na} [Na^+]_{out} + P_{Cl} [Cl^-]_{in}}{P_K [K^+]_{in} + P_{Na} [Na^+]_{in} + P_{Cl} [Cl^-]_{out}}, \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура;  $F$  – постоянная Фарадея, равная 96485,35 Кл/моль $^{-1}$ ;  $P_K$ ,  $P_{Na}$ ,  $P_{Cl}$  – коэффициенты проницаемости для ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ;  $[K^+]_{out}$ ,  $[Na^+]_{out}$ ,  $[Cl^-]_{out}$  – концентрации ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  на внешней стороне мембраны;  $[K^+]_{in}$ ,  $[Na^+]_{in}$ ,  $[Cl^-]_{in}$  – концентрации ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  на внутренней стороне мембраны.

Предположим, что оболочка зерна представляет собой мембрану. Тогда, при условии проращивания семян в воде, на внутренней стороне оболочки образуется определенная концентрация ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ . Проницаемость мембраны и внутренние ионные процессы обеспечивают выход ионов наружу. Таким образом, на мембране возникает мембранный потенциал  $E$ , который подчиняется уравнению (1). Поскольку качество семян определяется проницаемостью их оболочек и концентрацией ионов, то мембранный потенциал может выступать как параметр, обеспечивающий количественную оценку всхожести семян.

Обзор значимых независимых переменных в уравнении (1) показал, что основными факторами, влияющими на изменение мембранного потенциала семян, являются температура, внутренняя и внешняя концентрация ионов.

Основываясь на уравнении (1), температура напрямую воздействует на значение мембранного потенциала. Поэтому для проведения исследования необходимо стабилизировать температуру. Для исключения влияния внешней концентрации при проращивании семян пшеницы необходимо использовать дистиллированную воду.

Дополнительные факторы воздействия:

- наличие механических повреждений. Механические повреждения оболочки зерна могут вызвать искажение результатов исследования, что снизит достоверность;

- время хранения до определения мембранного потенциала (старение семян). Установлено, что жизнеспособность семян изменяется со временем, а следовательно, изменяется и всхожесть семян. Этот фактор необходимо брать во внимание [17; 18].

Из уравнения (1) следует, что основные факторы воздействия на мембранный потенциал – это концентрация ионов и проницаемость мембраны (оболочки).

Определив явные факторы влияния на мембранный потенциал, представим вид регрессионной модели:

$$E_i = C_0 \ln(G_i) + C_1, \quad (2)$$

где  $i$  – значение всхожести;  $C_0$  – константа, равная  $\frac{RT}{F}$  (температура не изменяется в процессе исследования);  $G_i$  – всхожесть семян, которая определяется согласно уравнению (1) как:

$$\frac{P_K [K^+]_{out} + P_{Na} [Na^+]_{out} + P_{Cl} [Cl^-]_{in}}{P_K [K^+]_{in} + P_{Na} [Na^+]_{in} + P_{Cl} [Cl^-]_{out}}.$$

### Материалы и методы

Для экспериментальных исследований были предоставлены семена яровой пшеницы сорта «Зимушка» Алтайским отделением Россельхозцентра (Россия, Сибирский Федеральный округ, Барнаул). Было отобрано в общей сложности 7 образцов с разной всхожестью. Всхожесть отмечена в процентах. Для исследования предоставлены семена с процентом всхожести 87 %, 89 %, 90 %, 92 %, 95 %, 97 %, 99 %.

#### *Предварительный контроль прорастания семян по методам ISTA*

Перед проведением измерения мембранного потенциала был проведен контрольный тест всхожести по методам ISTA. Из партии образцов часть семян отправили на прорастание для проверки и установления их всхожести [24] в соответствии с правилами, установленными Международной ассоциацией по контролю качества семян (ISTA) [1]. Семена помещались на двух слоях фильтровальной бумаги в чашках Петри. Бумага предварительно смачивалась водой. Через семь дней при  $20 \pm 1$  °C были проведены подсчеты проросших семян. В соответствии с количеством проросших семян установлен процент всхожести. Были получены идентичные проценты всхожести в лаборатории Россельхозцентра.

#### *Подготовка к измерению мембранного потенциала*

Перед измерением мембранного потенциала отобранные из партии образ-

цы с разным процентом всхожести прошли дополнительную подготовку. Подготовка семян заключается в следующем. Вначале все семена просматривались на наличие поврежденных, пустотелых, которые исключались из дальнейшего процесса исследований.

Затем зерна устанавливали на поролоновую форму внутри пластиковой коробки (300 мм × 120 мм × 50 мм) на расстоянии 5 мм друг от друга. Форма увлажняется дистиллированной водой (100 мл). Были установлены три пластиковые коробки с поролоновыми формами. Использование дистиллированной воды позволяет исключить влияние внешней концентрации ионов на результат измерения мембранного потенциала зерна пшеницы (исключается следующий фактор).

Пластиковые коробки помещаются на 12 часов в термокамеру (рис. 1). Термокамера содержит датчики, которые контролируют изменение температуры, установленной на уровне 20 °C. После стабилизации температуры исключается еще один фактор влияния на мембранный потенциал.

Далее запускаются вентиляторы для конвекции воздуха внутри камеры. Камера плотно закрывается на 12 часов. После извлекается по одной форме и измеряется мембранный потенциал семян.

#### *Калибровка устройства LA 50 USB*

Перед измерением проводилась калибровка АЦП LA-50 USB с помощью магазина сопротивлений (производство



Р и с. 1. Система диагностики, термокамера

F i g. 1. A diagnostic system and a thermal camera

Германия), источника постоянного тока и измерительных электродов. Магазин сопротивлений позволил смоделировать выходное значение в диапазоне от  $-200$  мВ до  $-55$  мВ.

*Процесс измерения*

В процессе измерения каждое семя пшеницы помещалось в электрод и протыкалось вторым электродом. Регистрация сигнала происходила с помощью устройства LA 50 USB. Запись сигнала во времени осуществлялась на протяжении 10 с. На рисунке 2 представлена схема подключения электродов.

При получении данных в лаборатории относительная влажность составляла 30 %, а температура составляла  $19^{\circ}\text{C}$ .

Для измерения мембранного потенциала зерна использовалась измерительная система со следующей структурной схемой (рис. 3).

Узлы измерительного устройства и аналого-цифрового преобразования формируют напряжение для передачи его в ПК с последующей обработкой фиксируемого сигнала. Узел подсистемы обработки информации включает

в себя модели и алгоритмы, на основе которых происходит анализ полученной в результате измерений информации.

Обмен данными аналого-цифрового преобразования между ПК и устройством осуществляется через интерфейс USB. ПК при помощи специальной программы, входящей в комплект поставки, осуществляет обработку поступающих от устройства данных аналого-цифрового преобразования и управление устройством через интерфейс USB.

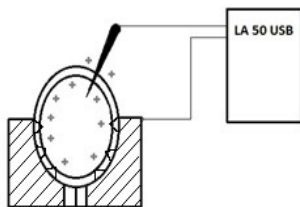
Для измерения биоэлектрических сигналов семян пшеницы применялась система диагностики, представленная на рисунке 1.

Система состояла из платы сбора данных (ЛА-50USB, Россия), электродов, компьютера.

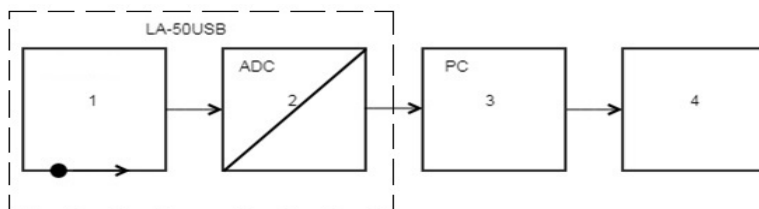
**Результаты исследования**

*Обработка результатов. Метод скользящей средней*

После сбора данных все сигналы представляют аддитивную смесь «сигнал + шум». Информация о помехах уменьшает отношение сигнал/шум и снижает полезность данных.



Р и с. 2. Схема подключения электродов  
F i g. 2. Electrodes connection diagram



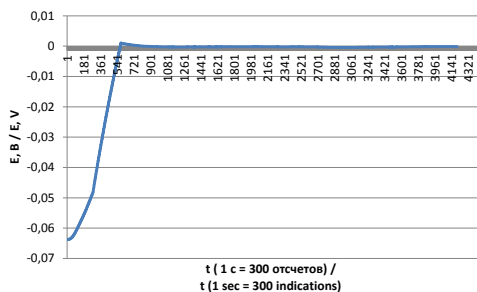
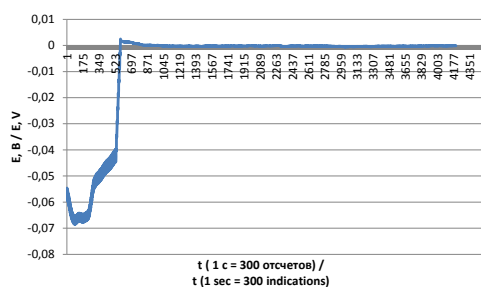
Р и с. 3. Обобщенная структурная схема: 1 – измерительное устройство; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – подсистема обработки информации; 4 – потребитель информации  
F i g. 3. Generalized structural diagram: 1 – measuring device; 2 – analog-to-digital converter; 3 – information processing subsystem; 4 – consumer information

Повысить достоверность информации возможно путем применения методов предварительной обработки [19; 20]. В настоящее время существуют различные методы предварительной обработки [21]. Как показал анализ полученной смеси, на полезный сигнал накладывается высокочастотный шум. Следовательно, целесообразно применить метод низкочастотной фильтрации, или метод скользящей средней [22]. Для примера на рисунке 4 показан результат усреднения. Информативным параметром является значение напряжения  $E$  в точке  $t = 0$  с. В данной точке мембранный потенциал удовлетворяет уравнению (1). Дальнейшие изменения мембранного потенциала – это уже потенциал действия.

При статистической обработке группы результатов прямых многократных независимых измерений проводилась оценка измеряемой величины, за которую принималось среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений.

Далее вычисляли среднее квадратическое отклонение результатов измерений (табл. 1).

После осуществлялась проверка на грубые погрешности. Для исключения грубых погрешностей из результатов исследований был применен критерий Граббса. Согласно данному критерию группа результатов измерений должна принадлежать нормальному распределению, что и подтверждено результатами статистической обработки данных.



Р и с. 4. Результаты исследования до сглаживания и после (окно в 50 значений)

F i g. 4. Results of the study before and after smoothing (a window of 50 values)

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Результаты статистической обработки данных**  
**Results of statistical processing**

Температура, К / Temperature, K	Всхожесть, % / Germination, %	$E_1$ , mV	$E_2$ , mV	$E_3$ , mV	...	$E_n$ , mV	Среднее значение, мВ / Average value, mV	Среднее квадратическое отклонение (S) / Average square deviation (S)
293	87 %	-185,69	-190,27	-186,70	...	-186,05	-186,99	8,53
293	89 %	-139,37	-139,21	-140,02	...	-134,50	-142,05	5,24
293	90 %	-123,17	-125,05	-125,85	...	-127,48	-125,92	6,46
293	92 %	-106,45	-105,02	-105,9	...	-102,41	-104,94	6,51
293	95 %	-74,86	-75,60	-75,31	...	-77,08	-76,41	4,06
293	97 %	-63,21	-64,04	-63,1	...	-64,74	-64,17	3,51
293	99 %	-52,63	-55,30	-56,47	...	-55,1	-54,97	5,01

Наблюдаемые значения статистики Пирсона не попадают в критическую область ( $K_{\text{набл}} < K_{\text{кр}}$ ), поэтому нет оснований отвергать основную гипотезу, выборки имеют нормальное распределение.

Для исключения погрешностей были определены  $G_1$  и  $G_2$ , предполагая, что наибольший  $x_{\text{max}}$  или наименьший  $x_{\text{min}}$  результат измерений вызван грубыми погрешностями:

$$G_1 = \frac{|x_{\text{max}} - \bar{x}|}{S}, G_2 = \frac{|\bar{x} - x_{\text{min}}|}{S}, \quad (3)$$

где  $x_{\text{max}}$  – наибольший результата измерения;  $x_{\text{min}}$  – наименьший результат измерений;  $\bar{x}$  – среднее значение;  $S$  – среднее квадратическое отклонение.

Сравнивались  $G_1$  и  $G_2$  с теоретическим значением  $G_T$  критерия Граббса при выбранном уровне значимости  $q$ . Если  $G_1 > G_T$ , то  $x_{\text{max}}$  исключается как маловероятное значение. Если  $G_2 > G_T$ , то  $x_{\text{min}}$  исключается как маловероятное значение.

Если  $G_1 \leq G_T$ , то  $x_{\text{max}}$  не считается промахом и показатель сохраняется в ряду результатов измерений. Если  $G_2 \leq G_T$ , то  $x_{\text{min}}$  не считается промахом и показатель сохраняется в ряду результатов измерений. В таблице 2 представлены результаты статистической обработки.

После статистической обработки данных был проведен дисперсионный анализ с целью поиска зависимостей в экспериментальных данных. В качестве типа дисперсионного анализа выбран одномерный однофакторный анализ для двух независимых групп данных. В данном случае группы объединены по одному признаку.

В процессе проведения анализа осуществлена проверка нулевой гипотезы о равенстве средних. Поскольку анализируются две группы, применялся двухвыборочный  $t$ -критерий Стьюдента для независимых выборок.

По результатам анализа, если средние значения двух выборок исследуемой величины одинаковы, то оценки факторной и остаточной дисперсий представляют собой несмещенную оценку генеральной дисперсии и различаются несущественно.

Таким образом, сопоставление оценок этих дисперсий по критерию Фишера демонстрирует, что нулевую гипотезу о равенстве факторной и остаточной дисперсий нельзя отклонять. В таблице 3 представлены результаты проверки нулевой гипотезы.

Для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  был определен  $f_{\text{кр}}$  из таблицы распределения Фишера – Снедекора. В связи с тем, что  $f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$ , нулевая гипотеза о существ-

Таблица 2

Table 2

**Погрешность экспериментального исследования  
Experimental error**

Всхожесть, % / Germination, %	Среднее значение, мВ / Average value, mV	Доверительный интервал / Confidence interval		$\varepsilon_{\alpha=0,95}$ , мВ / $\varepsilon_{\alpha=0,95}$ , mV	$\varepsilon$ , %
87 %	-186,99	-190,23	-183,76	-3,23	1,73 %
89 %	-142,05	-144,04	-140,06	-1,99	1,40 %
90 %	-125,92	-128,37	-123,48	-2,45	1,94 %
92 %	-104,94	-107,41	-102,47	-2,47	2,35 %
95 %	-76,41	-77,95	-74,87	-1,54	2,01 %
97 %	-64,17	-65,51	-62,84	-1,33	2,08 %
99 %	-54,97	-56,88	-53,08	-1,89	3,45 %

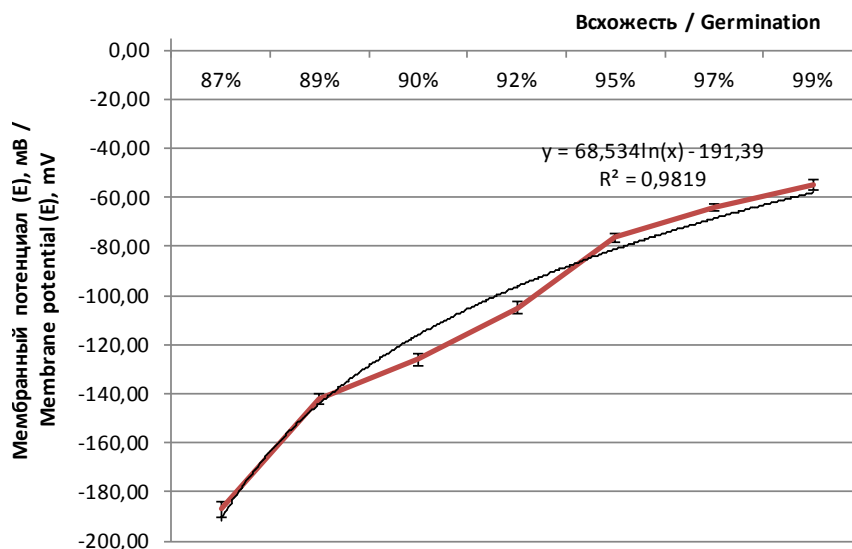
**Результаты проверки нулевой гипотезы**  
**Results of testing the null hypothesis**

Всхожесть, % / Germination, %	Эксперимент № 1. Среднее значение, мВ / Experiment No. 1. The average value, mV	Эксперимент № 2. Среднее значение, мВ / Experiment No. 2. The average value, mV	$f_{\text{набл}} /$ $f_{\text{observable}}$	$f_{\text{кр}} /$ $f_{\text{critical}}$	Комментарий / Comment
87 %	-186,99	-187,2	0,01	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
89 %	-142,05	-143,53	2,40	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
90 %	-125,92	-126,49	0,28	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
92 %	-104,94	-105,20	0,05	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
95 %	-76,41	-77,29	1,14	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
97 %	-64,17	-65,63	3,90	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
99 %	-54,97	-53,4	2,81	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$

венном влиянии фактора на результаты экспериментов отклоняется (нулевая гипотеза о равенстве групповых средних принимается). Другими словами, средние значения двух групп в целом различаются несущественно.

На рисунке 5 представлены результаты измерения семян пшеницы разной всхожести. Очевидные различия значений наблюдались между семенами с высокой всхожестью и низкой.

Результаты исследований показали, что разность потенциалов между внутренней и внешней оболочкой семян пшеницы зависит от их всхожести, а следовательно, значение может быть использовано в качестве параметра оценки качества. Так, начальное значение потенциала (в нулевой отрезок времени) составило для семян со всхожестью 99 % – 55 мВ, для семян низкой всхожести (87 %) – 187 мВ при усло-



Р и с. 5. Среднее значение потенциала в начальный отрезок времени ( $t = 0$  с) для семян разного процента всхожести.

F i g. 5. Average value of the potential in the initial period of time ( $t = 0$  sec) for seeds of different germination percentages

вии, что температура в период набухания зерен составляла 20 °С.

В процессе экспериментального исследования выявлена оптимальная температура для проведения эксперимента: 20–22 °С.

На основе уравнения ГНК и экспериментальных исследований научно доказано, что проращивание семян пшеницы при температуре 20 °С обеспечивает достоверную всхожесть семян. Полученный результат не противоречит диапазону температур, рекомендованному стандартом [1].

### Обсуждение и заключение

Разработана методология определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов, которая существенно отличается от известных методик. Разработана экспериментальная установка, способная

обеспечить все необходимые условия для исследований. Определены требования и оптимальные условия проведения экспериментов. На основе экспериментальных исследований установлена зависимость мембранного потенциала семян пшеницы от их всхожести.

Задачи, решенные в данной статье, могут быть использованы для экспресс-оценки качества семян пшеницы на любой технологической стадии (на этапе уборки, хранения, посева).

Планируется проведение практической проверки полученных результатов в сельскохозяйственном производстве. Предполагается продолжить исследования в данном направлении для семян пшеницы разных сортов, имеющих различный химический состав, учитывая влияющие внешние факторы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Bewley J. D., Black M.** Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination // Springer. 1982. Vol. 2. Pp. 3–9. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-642-68643-6>
2. A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds / T. Zhang [et al.] // Sensors. 2018. Vol. 18, Issue 3. 813 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/s18030813>
3. **Yang L., Wen B.** Seed Quality. In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. Vol. 1. Pp. 553–563. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00205-7>
4. **Colville L.** Seed Storage. In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. Vol. 1. Pp. 335–339. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00080-0>
5. **Okon E., Etta H. E., Zuba V.** Influence of Furofan-Treated Seeds on Sowing Characteristics of Winter Wheat Cultivars // Russian Agricultural Sciences. 2016. Vol. 42, Issue 1. Pp. 1–4. DOI: <http://doi.org/10.3103/S1068367416010250>
6. Improved Assessment of Viability and Germination of Cattleya (Orchidaceae) Seeds Following Storage / S. T. Hosomi [et al.] // In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant. 2012. Vol. 48. Pp. 127–136. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11627-011-9404-1>
7. **Santos M. A. O., Novembre A. D. L. C., Marcos-Filho J.** Tetrazolium Test to Assess Viability and Vigour of Tomato Seeds // Seed Science and Technology. 2007. Vol. 35, no. 1. Pp. 213–223. DOI: <http://doi.org/10.15258/sst.2007.35.1.19>
8. A Continental-Scale Study of Seed Lifespan in Experimental Storage Examining Seed, Plant, and Environmental Traits Associated with Longevity / D. J. Merritt [et al.] // Biodiversity and Conservation. 2014. Vol. 23, Issue 5. Pp. 1081–1104. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10531-014-0641-6>
9. **Downes K. S.** Plant Germplasm Conservation in Australia: Strategies and Guidelines for Developing, Managing and Utilising Ex Situ Collections // Austral Ecology. 2011. Vol. 36, Issue 7. Pp. 42–43. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02274.x>
10. **Anisur R., Byoung-Kwan Ch.** Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review // Seed Science Research. 2016. Vol. 26, Issue 4. Pp. 285–305. DOI: <http://doi.org/10.1017/S0960258516000234>



11. Using Hyperspectral Imaging to Determine Germination of Native Australian Plant Seeds / Sh. R. Turner [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2015. Vol. 145. Pp. 19–24. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jphotoobiol.2015.02.015>
12. Measurement Techniques and Application of Electrical Properties for Nondestructive Quality Evaluation of Foods – A Review / Sh. N. Jha [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2011. Vol. 48, Issue 4. Pp. 387–411. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x>
13. **Sibaoka T.** Physiology of Rapid Movements in Higher Plants // Annual Review of Plant Physiology. 1969. Vol. 20. Pp. 165–184. URL: <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.pp.20.060169.001121> (дата обращения: 01.06.2019).
14. **Pickard B. G.** Action Potentials in Higher Plants // Botanical Review. 1973. Vol. 39, no. 2. Pp. 172–201. URL: [http://www.jstor.org/stable/4353850?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/4353850?seq=1#page_scan_tab_contents) (дата обращения: 01.06.2019).
15. **Fromm J., Lautner S.** Electrical Signals and Their Physiological Significance in Plants // Plant Cell Environ. 2007. Vol. 30, Issue 3. Pp. 249–257. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x>
16. **Pyatygin S. S., Opritov V. A., Vodeneev V. A.** Signaling Role of Action Potential in Higher Plants // Russian Journal of Plant Physiology. 2008. Vol. 55, Issue 2. Pp. 285–291. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1021443708020179>
17. **Egli D. B.** Species Differences in Seed Growth Characteristics // Field Crops Research. 1981. Vol. 4. Pp. 1–12. DOI: [http://doi.org/10.1016/0378-4290\(81\)90049-6](http://doi.org/10.1016/0378-4290(81)90049-6)
18. **Baskin C. C., Baskin J. M.** Seeds: Ecology, Biogeography and Evolution of Dormancy and Germination. Elsevier, 2001. 666 p. URL: [http://books.google.ru/books/about/Seeds.html?id=uGJL\\_Ys6wlQC&redir\\_esc=y](http://books.google.ru/books/about/Seeds.html?id=uGJL_Ys6wlQC&redir_esc=y) (дата обращения: 01.06.2019).
19. **Baranowski P., Mazurek W., Pastuszka-Wozniak J.** Supervised Classification of Bruised Apples with Respect to the Time after Bruising on the Basis of Hyperspectral Imaging Data // Postharvest Biology and Technology. 2013. Vol. 86. Pp. 249–258. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.07.005>
20. **Kamruzzaman M., ElMasry G., Sun D.-W., Allen P.** Non-Destructive Assessment of Instrumental and Sensory Tenderness of Lamb Meat Using NIR Hyperspectral Imaging // Food Chemistry. 2013. Vol. 141, Issue 1. Pp. 389–396. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.094>
21. **Liu D., Sun D.-W., Zeng X.-A.** Recent Advances in Wavelength Selection Techniques for Hyperspectral Image Processing in the Food Industry // Food and Bioprocess Technology. 2014. Vol. 7, Issue 2. Pp. 307–323. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11947-013-1193-6>
22. **Chen P., Sun Z.** A Review of Non-Destructive Methods for Quality Evaluation and Sorting of Agricultural Products // Journal of Agricultural Engineering Research. 1991. Vol. 49. Pp. 85–98. DOI: [http://doi.org/10.1016/0021-8634\(91\)80030-I](http://doi.org/10.1016/0021-8634(91)80030-I)
23. **Воденеев В. А., Катичева Л. А., Сухов В. С.** Электрические сигналы у высших растений: механизмы генерации и распространения // Биофизика. 2016. Том 61. С. 598–606. URL: <https://www.eposlink.com/ru/catalog/library/elibrary/book/biofizika-2260/publication/113936/> (дата обращения: 01.06.2019).
24. **Пятыгин С. С., Оприлов В. А., Воденеев В. А.** Сигнальная роль потенциала действия у высших растений // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 2. С. 312–319. URL: <http://www.rusplant.ru/index.php?page=Posts.ListPost&number=2&year=2008&cat=4&PHPSESSID=lcowsvifjo> (дата обращения: 01.06.2019).

*Поступила 25.02.2019; принята к публикации 02.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019*

*Об авторах:*

**Барышева Надежда Николаевна**, доцент кафедры информационных систем в экономике, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т. Ленина, д. 46), кандидат технических наук, ResearcherID: C-9650-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1338-9740>, mnn-t@mail.ru

**Пронин Сергей Петрович**, заведующий кафедрой информационных технологий, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т. Ленина, д. 46), профессор, доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0202-9232>, [sppronin@mail.ru](mailto:sppronin@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Н. Н. Барышева – обзор и анализ литературы, разработка методики, формулировка выводов, проведение экспериментов, подготовка первоначального варианта рукописи; С. П. Пронин – проведение теоретических исследований, формулирование основной концепции исследования, доработка текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Bewley J.D., Black M. Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination. *Springer*. 1982; 2:3-9. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-642-68643-6>
2. Zhang T., Wei W., Zhao B., et al. A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds. *Sensors*. 2018; 18(3):813. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.3390/s18030813>
3. Yang L., Wen B. Seed Quality. In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Vol 1. Amsterdam: Elsevier; 2017. p. 553-563. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00205-7>
4. Colville L. Seed Storage. In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Vol 1. Amsterdam: Elsevier; 2017. p. 335-339. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00080-0>
5. Okon E., Etta H.E., Zuba V. Influence of Furoalan-Treated Seeds on Sowing Characteristics of Winter Wheat Cultivars. *Russian Agricultural Sciences*. 2016; 42(1):1-4. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.3103/S1068367416010250>
6. Hosomi S.T., Custodio C.C., Seaton P.T., et al. Improved Assessment of Viability and Germination of Cattleya (Orchidaceae) Seeds Following Storage. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*. 2012; 48:127-136. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/s11627-011-9404-1>
7. Santos M.A.O., Novembre A.D.L.C., Marcos-Filho J. Tetrazolium Test to Assess Viability and Vigour of Tomato Seeds. *Seed Science and Technology*. 2007; 35(1):213-223. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.15258/sst.2007.35.1.19>
8. Merritt D.J., Martyn A.J., Ainsley P., et al. A Continental-Scale Study of Seed Lifespan in Experimental Storage Examining Seed, Plant, and Environmental Traits Associated with Longevity. *Biodiversity and Conservation*. 2014; 23(5):1081-1104. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/s10531-014-0641-6>
9. Downes K.S. Plant Germplasm Conservation in Australia: Strategies and Guidelines for Developing, Managing and Utilizing Ex Situ Collections. *Austral Ecology*. 2011; 36(7):42-43. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02274.x>
10. Anisur R., Byoung-Kwan Ch. Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review. *Seed Science Research*. 2016; 26(4):285-305. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1017/S0960258516000234>
11. Turner Sh.R., Nansen Ch., Zhao G., et al. Using Hyperspectral Imaging to Determine Germination of Native Australian Plant Seeds. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2015; 145:19-24. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.02.015>
12. Jha Sh.N., Narsaiah K., Basediya A.L., et al. Measurement Techniques and Application of Electrical Properties for Nondestructive Quality Evaluation of Foods – a Review. *Journal of Food Science and Technology*. 2011; 48(4):387-411. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x>

13. Sibaoka T. Physiology of Rapid Movements in Higher Plants. *Annual Review of Plant Physiology*. 1969; 20:165-184. Available at: <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.pp.20.060169.001121> (accessed 01.06.2019). (In Eng.)
14. Pickard B.G. Action Potentials in Higher Plants. *Botanical Review*. 1973; 39(2):172-201. Available at: [http://www.jstor.org/stable/4353850?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/4353850?seq=1#page_scan_tab_contents) (accessed 01.06.2019). (In Eng.)
15. Fromm J., Lautner S. Electrical Signals and Their Physiological Significance in Plants. *Plant Cell Environ*. 2007; 30(3):249-257. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x>
16. Pyatygin S.S., Opritov V.A., Vodeneev V.A. Signaling Role of Action Potential in Higher Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008; 55(2):285-291. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1134/S1021443708020179>
17. Egli D.B. Species Differences in Seed Growth Characteristics. *Field Crops Research*. 1981; 4:1-12. (In Eng.) DOI: [http://doi.org/10.1016/0378-4290\(81\)90049-6](http://doi.org/10.1016/0378-4290(81)90049-6)
18. Baskin C.C., Baskin J.M. Seeds: Ecology, Biogeography and Evolution of Dormancy and Germination. Amsterdam: Elsevier; 2001. 666 p. Available at: [http://books.google.ru/books/about/Seeds.html?id=uGJL\\_Ys6wIQC&redir\\_esc=y](http://books.google.ru/books/about/Seeds.html?id=uGJL_Ys6wIQC&redir_esc=y) (accessed 01.06.2019). (In Eng.)
19. Baranowski P., Mazurek W., Pastuszka-Wozniak J. Supervised Classification of Bruised Apples with Respect to the Time after Bruising on the Basis of Hyperspectral Imaging Data. *Postharvest Biology and Technology*. 2013; 86:249-258. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.07.005>
20. Kamruzzaman M., ElMasry G., Sun D.-W., Allen P. Non-Destructive Assessment of Instrumental and Sensory Tenderness of Lamb Meat Using Nir Hyperspectral Imaging. *Food Chemistry*. 2013; 141(1):389-396. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.094>
21. Liu D., Sun D.-W., Zeng X.-A. Recent Advances in Wavelength Selection Techniques for Hyperspectral Image Processing in the Food Industry. *Food and Bioprocess Technology*. 2014; 7(2):307-323. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/s11947-013-1193-6>
22. Chen P., Sun Z. A Review of Non-Destructive Methods for Quality Evaluation and Sorting of Agricultural Products. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1991; 49:85-98. (In Eng.) DOI: [http://doi.org/10.1016/0021-8634\(91\)80030-I](http://doi.org/10.1016/0021-8634(91)80030-I)
23. Vodenev V.A., Katicheva L.A., Sukhov V.C. Electrical Signals in Higher Plants: The Mechanisms of Generation and Propagation. *Biofizika = Biophysics*. 2016; (61):598-606. Available at: <https://www.eposlink.com/ru/catalog/library/elibrary/book/biofizika-2260/publication/113936/> (accessed 01.06.2019). (In Russ.)
24. Pyatygin S.S., Opritov V.A., Vodeneev V.A. Signaling Role of Action Potential in Higher Plants. *Fiziologiya rasteniy = Plant Physiology*. 2008; 55(2):312-319. Available at: <http://www.rusplant.ru/index.php?page=Posts.ListPost&number=2&year=2008&cat=4&PHPSESSID=lcowrsvifjo> (accessed 01.06.2019). (In Russ.)

*Received 25.02.2019; revised 02.04.2019; published online 30.09.2019*

*About authors:*

**Nadezhda N. Barysheva**, Associate Professor of Chair of Information Systems in Economy, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenina, Barnaul 656038, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: C-9650-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1338-9740>, [mnn-t@mail.ru](mailto:mnn-t@mail.ru)

**Sergey P. Pronin**, Head of Chair of Information Technology, Polzunov Altai State Technical University, (46 Lenina, Barnaul 656038, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0202-9232>, [sppronin@mail.ru](mailto:sppronin@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

N. N. Barysheva – reviewing and analyzing the literature, development of method, formulation of conclusions, experiments, writing the draft; S. P. Pronin – conducting theoretical research, formulation of the basic research concepts, final editing.

*All authors have read and approved the final manuscript.*



## Определение усилий, необходимых для очеса колоса пшеницы

**В. Ю. Савин\***

*Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»  
(г. Калуга, Россия)*

*\*savin.study@yandex.ru*

*Введение.* Одним из параметров, характеризующих процесс очеса, является усилие, необходимое для очеса колоса. Усилие варьируется в некоторых пределах в зависимости от сорта растений, влажности зерна и морфоструктурных параметров продуктивности колоса. Для определения усилий очеса озимой пшеницы различных сортов проведена серия опытов.

*Материалы и методы.* Экспериментальные исследования производились в Калужской области на полях Калужского НИИ Сельского Хозяйства. Объект исследования – пшеница сортов «Касар», «Московская 56», «Московская 40». В связи с тем, что морфоструктурные элементы продуктивности колоса могут существенно изменяться в зависимости от условий выращивания, непосредственно перед испытаниями была произведена оценка длины колоса и плотности колосьев. Также было выдвинуто предположение, что на процесс взаимодействия гребенки с колосом влияют такие параметры, как ширина и толщина колоса.

*Результаты исследования.* Получены усилия очеса указанных сортов пшеницы при использовании гребенок со щелью 5–7 мм. Усилия очеса пшеницы сорта «Касар» при использовании гребенки со щелью 6 мм изменялись в пределах 17,4...24,2 Н; при использовании гребенки со щелью 7 мм усилия составили 13,4...16,8 Н.

*Обсуждение и заключение.* Подтверждено предположение о зависимости усилия очеса от ширины щели очесывающей гребенки. При использовании гребенок с шириной щели 5 и 6 мм в процессе очеса пшеницы сорта «Московская 40» диапазоны усилий составили 16,5...20,6 Н и 8,1...14 Н соответственно. Установлено влияние на величину усилия очеса таких параметров колоса, как ширина, толщина и плотность.

**Ключевые слова:** уборка зерновых, очесывающее устройство, очесывающий барабан, очесывающая гребенка, усилие очеса, колос пшеницы

**Для цитирования:** Савин В. Ю. Определение усилий, необходимых для очеса колоса пшеницы // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 456–466. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.456-466>



## Determination of the Force Required for Stripping the Wheat Ear

V. Yu. Savin\*

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University  
(Kaluga, Russia)*

\*savin.study@yandex.ru

*Introduction.* The force required for stripping the ear is one of important parameters characterizing the process of stripping. The force varies within certain limits depending on the type of plant, grain moisture, and structural and morphological parameters of the ear. A series of experiments was carried out to determine forces of different types of wheat stripping.

*Materials and Methods.* Experimental studies were carried out in the Kaluga Oblast in the fields of Kaluga Research Institute of Agriculture. The study dealt with wheat varieties “Kasar”, “Moskovskaya 56”, and “Moskovskaya 40”. Ear parameters were estimated directly before testing as structural and morphological parameters of the ear can change significantly depending on growing conditions. It was suggested that such parameters as the width and thickness of the ear affect the process of the latter interaction with stripping fingers.

*Results.* Forces of stripping the said wheat varieties were obtained using stripping fingers with a gap of 5–7 mm. Stripping forces of the “Kasar” wheat varied from 17,4 to 24,2 N, under conditions of the gap of 6 mm, and from 13,4 to 16,8, with the gap of 7 mm.

*Discussion and Conclusion.* Dependence of the stripping force on the gap width of stripping fingers was confirmed by results of our experiments. Forces varied in the range of 16,5–20,6 N when stripping off “Moskovskaya 40” wheat in the case of the gap of 5 mm and 8,1–14 N in the case of the 7-mm gap. The effect of such ear parameters as the width, thickness and density was established.

**Keywords:** grain harvesting, rippler, rippling drum, stripping fingers, stripping force, ear of wheat

**For citation:** Savin V.Yu. Determination of the Force Required for Stripping the Wheat Ear. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):456-466. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.456-466>

### Введение

Одной из перспективных технологий уборки зерновых культур является технология очеса растений на корню. В нашей стране и за рубежом производятся исследования, направленные на создание линейки очесывающих адаптеров к зерноуборочным комбайнам [1], а также прицепных уборочных машин очесывающего типа<sup>1</sup>, удовлетворяющих требованиям уборки зерновых.

Отличительной особенностью технологии очеса зерновых на корню является повышение доли зерна в получаемом ворохе [2; 3], что создает предпо-

сылки для увеличения производительности уборочного агрегата.

Для уборки сельхозкультур предложены различные схемы очесывающих аппаратов, имеющих некоторые технологические отличия и особенности [4; 5], обуславливающие область их использования. Основными типами очесывающих устройств для уборки зерновых являются однобарабанные и двухбарабанные гребневые устройства.

Одним из параметров, характеризующих процесс очеса, является усилие, необходимое для очеса колоса. Очевидно, что усилие варьируется в некоторых

<sup>1</sup> Прицепное очесывающее устройство: пат. 2656414 Рос. Федерация. № 2016140996; заявл. 18.10.2016; опубл. 05.06.2018, Бюл. № 16. URL: [http://www1.fips.ru/fips\\_serv1/fips\\_servlet?DB=RUPA T&DocNumber=2656414&TypeFile=html](http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPA T&DocNumber=2656414&TypeFile=html) (дата обращения 15.05.2019).

пределах в зависимости от сорта растений, влажности зерна и морфоструктурных параметров продуктивности колоса. Для определения усилий очеса озимой пшеницы различных сортов проведена серия опытов.

Результаты исследований по определению усилий очеса необходимы для решения нескольких задач. Одной из таких задач является определение потребной мощности на привод очесывающего барабана [6; 7]. Результаты опытов позволят производить оценку требуемой мощности на очес с учетом фактических морфоструктурных показателей продуктивности колоса растений и корректно подбирать энергетические параметры агрегата в целом.

Другой важной задачей уборки зерновых методом очеса является минимизация таких явлений, как отрыв колоса и тербление растений из почвы. Данные явления негативно влияют на процесс направленного движения очесанного вороха по гребенке. При этом возможное наматывание вырванных стеблей на очесывающий барабан ведет к повышенным потерям зерна. Учет данного фактора при проектировании очесывающих устройств вынуждает увеличивать диаметр очесывающего барабана, что ведет к повышению потребной мощности холостого хода барабана.

Полученные усилия очеса позволяют сформировать базу для сравнения со значениями усилий отрыва колоса, усилиями тербления растений из почвы и дать рекомендации по минимизации потерь зерна, вызванных указанными явлениями.

На основании анализа обозначенных проблем сформулированы следующие задачи исследования:

- выбор морфоструктурных показателей продуктивности колоса, влияющих на усилие очеса;

- определение усилий очеса по сортам пшеницы;

- оценка морфоструктурных показателей продуктивности колоса по сортам пшеницы;

- сопоставление полученных усилий очеса с морфоструктурными показателями продуктивности колосьев пшеницы соответствующих сортов.

### Обзор литературы

Прочность связи зерна с колосом определяется усилием, с каким оно удерживается в цветоложе и в колосе чешуями. Усилие на отрыв зерна от цветоложа в 2,5 раза превышает силу, удерживающую чешуями зерно в колосе<sup>2</sup>.

Известно, что в зависимости от спелости зерна эти усилия изменяются по-разному [8]. Сила отрыва зерна от цветоложа по мере созревания уменьшается. Сила, удерживающая зерно в колосе чешуями, увеличивается.

Разрушение связей зерна с колосом может быть статическое и динамическое. При статическом разрушении определяют силу, необходимую для этого.

Динамическое разрушение связей зерна происходит при приложении быстро изменяющейся нагрузки. При этом скорость изменения нагрузки настолько велика, что значительная часть работы внешней силы переходит в кинетическую энергию движущихся частиц зерносомистой массы, а энергия упругих деформаций оказывается сравнительно малой. В связи с этим динамическое разрушение связей зерна воспроизводят, когда необходимо определить работу внешних сил. Известны способы реализации данного метода разрушения, предполагающие использование маятникового или ротационного копров [9; 10].

Статическое разрушение связей зерна с колосом будет характеризоваться нормальными скоростями деформации,

<sup>2</sup> Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин: учебник для вузов сельскохозяйственного машиностроения. 2-е изд., перераб. и доп. / под редакцией Е. С. Босого. М.: Машиностроение, 1978. 568 с.

то есть скоростями, лежащими в пределах следующего диапазона:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0,01 - 3 \text{ мин}^{-1}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – относительное удлинение;  $t$  – время.

Известны результаты исследований статистического метода разрушения связей зерна<sup>3</sup>. При вращении колоса в центрифуге, реакция связей, обусловленная центробежной силой, разрушает эти связи силой:

$$P = \frac{Gr\omega^2}{g}, \quad (2)$$

где  $G$  – вес зерна;  $r$  – расстояние от оси вращения до зерна в колосе;  $\omega$  – угловая скорость центрифуги;  $g$  – ускорение свободного падения.

Для твердых пшениц полученная сила составила 1,5...1,9 Н; для мягких пшениц – 0,98...1,75 Н.

Исследования усилий отрыва зерна от колоса в период восковой и полной спелости на полевых измерительных станциях с использованием динамометра [11] показали уменьшение усилия отрыва с каждым днем перестоя после полной спелости. Максимальные усилия отрыва зерна от колоса к концу агросрока для озимой пшеницы сорта «Лучезар» составили 4 Н.

Известны результаты исследования энергоемкости выделения зерна из колоса при знакопеременном нагружении связей зерна с колосом [12]. Максимальное усилие в цикле выделения зерен из колоса пшеницы составило около 31 Н.

Некоторые авторы рассматривают процесс очеса как одну из разновидно-

стей процесса обмолота [13]. Отмечено, что использование этой разновидности технологии обмолота позволяет значительно снизить потребление энергии.

Процесс выделения зерна из колоса при очесе имеет определенные особенности. В процессе очеса щель гребенки взаимодействует не с отдельным зерном, а с колосками, содержащими по несколько зерен и при этом еще и взаимодействующими друг с другом. Также необходимо отметить, что работа некоторых конструкций очесывающих аппаратов подразумевает не протягивание колоса между зубьями гребенки с выделением зерна, а отрыв колоса [14]. Это уже несколько специфическая технология и термин «усилие очеса» здесь не совсем корректен.

#### Материалы и методы

Для определения сил, необходимых для разрушения связей зерна пшеницы с колосом, была проведена серия опытов. Экспериментальные исследования производились в Калужской области на полях Калужского НИИ Сельского Хозяйства. Объект исследования – пшеница сортов «Касар», «Московская 56», «Московская 40». Влажность зерна пшеницы указанных сортов на протяжении исследований составляла 12,2–13,6 %.

Пшеница «Касар» – новый сорт озимой пшеницы, созданный совместно учеными Калужского НИИСХ и НИИСХ Юго-Востока (г. Саратов). Колос веретеновидный. Плотность составила 20–22 колоска на 10 см колоса. Сорт по результатам оценки в экологическом сортоиспытании в среднем за 2009–2012 гг. при урожайности зерна 63,9 ц/га достоверно превысил стандартный сорт пшеницы озимой «Московская 39» на 12,3 ц/га или на 23,8 %<sup>4</sup>. Сорт проходит испытания в Госкомиссии РФ.

<sup>3</sup> Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин: Учебник для вузов сельскохозяйственного машиностроения. 2-е изд., перераб. и доп. / под редакцией Е. С. Босого. М.: Машиностроение, 1978. 568 с.

<sup>4</sup> ФГБНУ Калужский НИИСХ. Исследования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kniish.org/research/> (дата обращения 15.05.2019).

Пшеница «Московская 40» – мягкая озимая пшеница. Колос веретеновидный, средней плотности или плотный, белый, короткий или средней длины. Ости на конце колоса средней длины или длинные. Масса 1000 зерен 37–48 г. Рекомендован для возделывания в Тульской области. Средняя урожайность в регионе – 33,7 ц/га.<sup>5</sup>

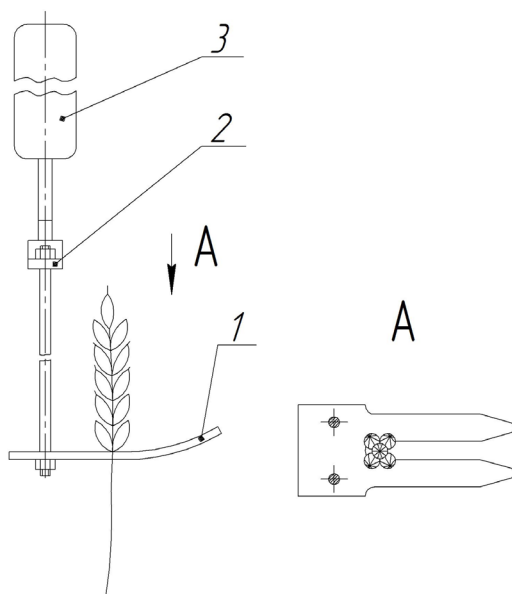
Пшеница «Московская 56» – мягкая озимая пшеница. Колос полубулавовидный, рыхлый или средней плотности, белый, короткий или средней длины. Ости на конце колоса средней длины. Масса 1000 зерен 40–49 г. Рекомендован для возделывания в Тульской области и Центральной зоне Московской области. Средняя урожайность в Центральном регионе – 32,2 ц/га.<sup>6</sup>

В связи с тем что морфоструктурные элементы продуктивности колоса могут существенно изменяться от условий выращивания, непосредственно перед

испытаниями была произведена оценка длины колоса и плотности колосьев. Также было выдвинуто предположение, что на процесс взаимодействия гребенки с колосом влияют такие параметры, как ширина и толщина колоса. Данные параметры также были оценены.

Морфоструктурные параметры продуктивности колоса измерялись с использованием линейки и штангенциркуля. Средние показатели подсчитывались по десяти замерам.

Для физического моделирования процесса очеса и измерения усилия очеса было изготовлено измерительное устройство на базе тензопреобразователя. Схема измерительного устройства представлена на рисунке 1. Измерительное устройство включает механическую часть и регистрирующую часть. Механическая часть устройства напрямую взаимодействует с колосом растения и имеет контактные поверхности,



Р и с. 1. Измерительное устройство: 1 – гребенка; 2 – кронштейн; 3 – тензопреобразователь  
 F i g. 1. Measuring device: 1– stripping fingers; 2 – bracket; 3– strain gauge

<sup>5</sup> Государственный реестр селекционных достижений. Реестр. Сорт Московская 40 [Электронный ресурс]. URL: <https://reestr.gossort.com/reestr/sort/9253284> (дата обращения 15.05.2019).

<sup>6</sup> Государственный реестр селекционных достижений. Реестр. Сорт Московская 56 [Электронный ресурс]. URL: <https://reestr.gossort.com/reestr/sort/9553369> (дата обращения 15.05.2019).



повторяющие рабочие поверхности криволинейных, отогнутых вперед гребенок очесывающего устройства, боковые кромки зубьев которых расположены параллельно. В процессе измерения колос протягивался через щель гребенки при ее поступательном движении регистрировались максимальные усилия очеса.

В связи с различными показателями морфоструктурных элементов указанных сортов, измерение усилия очеса для каждого сорта производилось гребенками с различной шириной щели: 5, 6 и 7 мм. Предполагалось, что использование гребенок с различной шириной щели даст различную степень очеса и различные усилия очеса.

Для каждого сочетания сорта и ширины гребенки минимальное запланированное количество опытов было равно восьми. Дополнительные опыты проводились при появлении резковыделяющихся результатов.

#### Результаты исследования

Произведена оценка предложенных морфоструктурных показателей колоса (табл. 1). Показатели плотности колоса исследуемых сортов в целом были близки. При этом пшеница сорта «Московская 56» имела меньшее число колосков на 1 см колоса – 2,1. Что касается размеров колоса, то здесь явно выделялась пшеница «Касар». Растения данного сорта имели значительно более круп-

ные колосья. Средние значения ширины и толщины составили 12,8 и 11 мм соответственно.

Предварительные опыты по очесу пшеницы «Касар» указанными гребенками показали, что очес гребенкой с шириной щели 5 мм нецелесообразен, так как большинство опытов закончились обрывом колоса. Результаты измерений усилий очеса пшеницы «Касар» с гребенками 6 и 7 мм показаны на диаграмме рисунка 2. Как видно из диаграммы, усилие очеса при использовании гребенки со щелью 7 мм изменялось в пределах 13,4...16,8 Н. Усилие очеса при использовании гребенки со щелью 6 мм составило 17,4...24,2 Н.

Исследования очеса пшеницы «Московская 56» показали, что измерение усилия очеса гребенкой с шириной щели 7 мм нецелесообразно, так как взаимодействие гребенки и колоса находится на минимальном уровне, и колосья практически не прочесываются. Результаты измерений усилий очеса пшеницы «Московская 56» с гребенками 5 и 6 мм показаны на диаграмме рисунка 3. Как видно из диаграммы, усилие очеса при использовании гребенки со щелью 6 мм изменялось в пределах 7,4...12,2 Н. Усилие очеса при использовании гребенки со щелью 5 мм составило 12...17,2 Н.

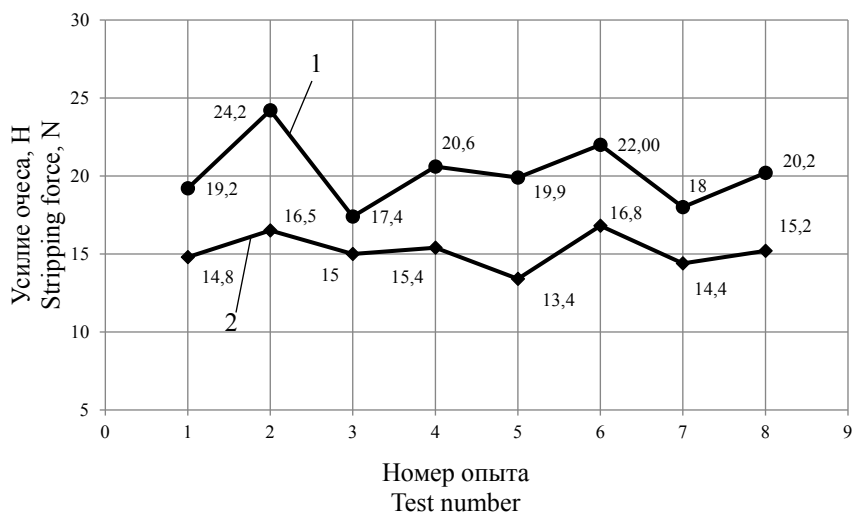
При использовании гребенки с шириной щели 7 мм при очесе пшеницы

Таблица 1

Table 1

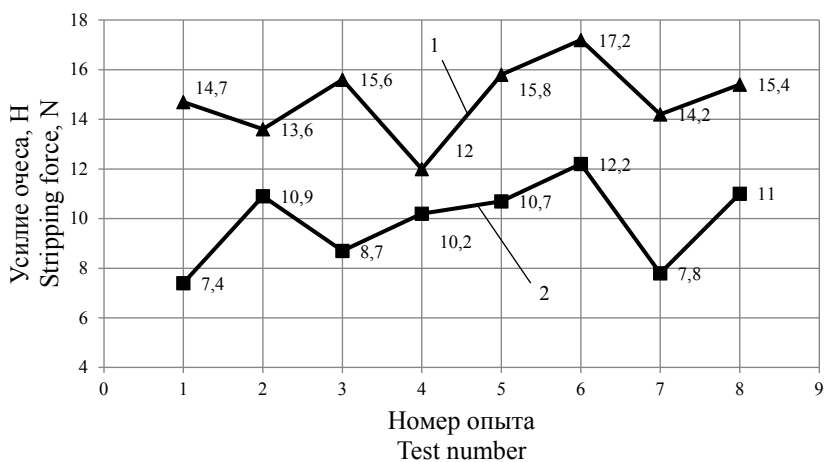
Показатели структуры колосьев пшеницы  
Structure indicators of wheat ears

Сорт / Wheat variety	Длина, мм / Length, mm	Плотность (число колосков на 1 см колоса) / Density (Spikelet per 1 cm of ear)	Среднее значение ширины, мм / Average width, mm	Среднее значение толщины, мм / Average thickness, mm
Касар / Kasar	80–92	2,2	12,8	11
Московская 40 / Moskovskaya 40	64–72	2,2	9	8,6
Московская 56 / Moskovskaya 56	70–80	2,1	10,3	9,2



Р и с. 2. Диаграмма усилий очеса колоса пшеницы сорта «Касар»: 1 – гребенка со щелью 6 мм; 2 – гребенка со щелью 7 мм

Fig. 2. Diagram of stripping strange of “Kasar” wheat: 1 – stripping fingers with a gap of 6 mm; 2 – stripping fingers with a gap of 7 mm



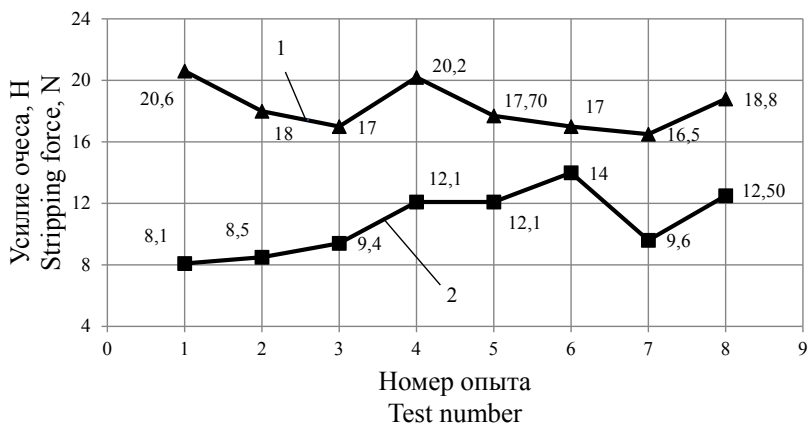
Р и с. 3. Диаграмма усилий очеса колоса пшеницы сорта «Московская 56»: 1 – гребенка со щелью 5 мм; 2 – гребенка со щелью 6 мм

Fig. 3. Diagram of stripping force of “Moskovskaya 56” wheat: 1 – stripping fingers with a gap of 5 mm; 2 – stripping fingers with a gap of 6 mm

«Московская 40» также наблюдаем значительное непрочесывание колосьев. Результаты измерений усилий очеса пшеницы «Московская 40» с гребенками 5 и 6 мм показаны на диаграмме рисунка 4. Согласно диаграмме усилие очеса при использовании гребенки со щелью 6 мм изменялось в пределах

8,1...14 Н. Усилие очеса при использовании гребенки со щелью 5 мм составило 16,5...20,6 Н.

Напрашивается вывод, что непрочесывание колосьев пшеницы сортов «Московская 40» и «Московская 56» гребенками с шириной щели 7 мм при проведении экспериментальных иссле-



Р и с. 4. Диаграмма усилий очеса колоса пшеницы сорта «Московская 40»:  
1 – гребенка со щелью 5 мм; 2 – гребенка со щелью 6 мм

F i g. 4. Diagram of stripping strange of “Moskovskaya 40” wheat:  
1 – stripping fingers with a gap of 5 mm; 2 – stripping fingers with a gap of 6 mm

дований будет соответствовать аналогичному явлению при работе очесывающего устройства. Однако в работе М. А. Бурьянова [15] указано, что колебания стебля при работе очесывающего устройства способствуют контакту зубьев гребенки с колосом и выделению зерна. При этом граничные условия возникновения и параметры колебаний не указаны, поэтому данный вопрос требует дополнительного изучения.

#### Обсуждение и заключение

В результате исследования получены экспериментальные данные по значениям усилий очеса колосьев пшеницы сортов, характерных для Центрального экономического района Российской Федерации. Максимальные усилия получены при очесе колосьев пшеницы сорта «Касар» гребенкой с шириной щели 6 мм: 17,4...24,2 Н. Минимальные усилия получены при очесе колосьев пшеницы сорта «Московская 56» гребенкой с шириной щели 6 мм: 7,4...12,2 Н.

Установлена зависимость усилий очеса от морфоструктурных показате-

лей продуктивности колоса: ширины, толщины, плотности. Так, диапазон полученных усилий очеса колосьев пшеницы сорта «Московская 40» составил 12...17,2 Н. При очесе же более крупных колосьев пшеницы сорта «Касар» диапазон усилий составил 17,4...24,2 Н. Пшеница сорта «Московская 40» в сравнении с сортом «Московская 56» имеет чуть большую плотность колоса равную 2,2. При этом усилие очеса возрастает с 12...17,2 Н до 16,5...20,6 Н.

Установлена зависимость усилий очеса от ширины щели очесывающей гребенки. Так, при использовании гребенок с шириной 5 и 6 мм при очесе пшеницы сорта «Московская 40» диапазоны усилий составили 16,5...20,6 Н и 8,1...14 Н соответственно. Одной из причин зависимости является степень выделения зерна из колоса. Другой причиной может быть расположение центров приложения усилий при взаимодействии колоса и зубьев гребенки, что требует дополнительного изучения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. **Ковлягин Ф. В., Маслов Г. Г.** Уборка зерновых культур методом очеса // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1991. № 8. С. 5–6.
2. **Савин В. Ю.** Определение состава очесанного вороха при уборке пшеницы с использованием прицепного очесывающего устройства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2016. № 4 (51). С. 96–99. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2016.4.96>
3. **Жалнин Э. В.** Уборка с очесом на корню: за и против // Сельский механизатор. 2013. № 8 (54). С. 10–12. URL: <http://selmech.msk.ru/> (дата обращения 15.05.2019).
4. **Галкин А. В., Фадеев Д. Г., Ушаповский И. В.** Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 389–399. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
5. **Алдошин Н. В., Мосяков М. А.** Совершенствование конструкции очесывающих устройств для уборки зернобобовых культур // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. № 2. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>
6. **Галкин А. В., Фадеев Д. Г.** Исследование затрат энергии на привод гребневого очесывающе-транспортирующего барабана льноуборочной машины // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1. С. 198–203. URL: [http://www.agrotech-orel.ru/releases/magazine/1-\(1\)-2014.pdf](http://www.agrotech-orel.ru/releases/magazine/1-(1)-2014.pdf) (дата обращения 15.05.2019).
7. **Галкин А. В., Фадеев Д. Г.** Энергетические показатели гребневых очесывающе-транспортирующих аппаратов при различных способах очеса стеблей льна // Техника и оборудование для села. 2015. № 9. С. 9–11. URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos> (дата обращения 15.05.2019).
8. **Липовский М. И.** Обоснование рационального двухфазного обмолота зерновых культур // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2004. Вып. 76. С. 25–38. URL: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/196909/#1> (дата обращения 15.05.2019).
9. **Ягельский М. Ю., Родимцев С. А.** Исследование энергии разрушения стеблей растений сельскохозяйственных культур // Техника в сельском хозяйстве. 2014. № 5. С. 21–23.
10. **Косолапов Е. В., Матушкин О. П.** Применение аналого-цифрового преобразователя для исследования прочностных свойств стебельного материала // Фундаментальные исследования. 2015. № 6. С. 30–34. URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38388> (дата обращения 15.05.2019).
11. Методы и результаты определения естественной силы связи зерна с колосом в период созревания и полной спелости / А. И. Бурьянов [и др.] // Зерновое хозяйство России. 2018. № 6. С. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-60-6-21-25>
12. **Ожерельев В. Н., Никитин В. В.** Энергоемкость выделения зерна из колоса // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 4. С. 22–24.
13. **Fu J., Chen Zh., Han L., Ren L.** Review of Grain Threshing Theory and Technology // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11, Issue 3. Pp. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3432>
14. **Федин М. А., Кухарев О. Н., Семов И. Н.** Определение потерь зерна за очесывающей жаткой с ротором, оснащенной гребенкой с тангенциальным каналом // Нива Поволжья. 2017. № 4 (45). С. 175–181. URL: [https://niva-volga.ru/file/vipuski/2017\\_4\\_45/2017\\_4\\_45\\_ru.pdf](https://niva-volga.ru/file/vipuski/2017_4_45/2017_4_45_ru.pdf) (дата обращения 15.05.2019).
15. **Бурьянов М. А.** Исследование взаимодействия колоса растения с зубьями однобарабанной навесной на комбайн жаткой при уборке зерновых культур очесом // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского Государственного Аграрного Университета. 2011.

№ 67. С. 91–100. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/issledovanie-vzaimodeystviya-kolosa-rasteniya-s-zubyami-odnobarabannoy-navesnoy-na-kombayn-zhatkoy-pri-uborke-zernovyh-kultur-ochesom> (дата обращения 15.05.2019).

Поступила 01.03.2019; принята к публикации 02.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019

Об авторе:

**Савин Владимир Юрьевич**, доцент кафедры тепловых двигателей и гидромашин калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана» (248000, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), кандидат технических наук, ResearcherID: D-4378-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, [savin.study@yandex.ru](mailto:savin.study@yandex.ru)

**Благодарности:** Автор выражает благодарность члену-корреспонденту РАН, доктору сельскохозяйственных наук, профессору Горбачеву И. В. за помощь в подготовке статьи.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Kovliagin F.V. Harvesting of Grain Crops by Combing. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 1991; (8):5-6. (In Russ.)
2. Savin V.Yu. Determination of Composition of Threshed Heap at Harvesting Wheat Using the Trail-Type Rippler. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Voronezh State Agrarian University Bulletin. 2016; (4):96-99. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2016.4.96>
3. Zhalnin E.V. Cleaning With a Comb on the Roots: Pros and Cons. *Selskiy Mehanizator* = Country Mechanic. 2013; (8):10-12. Available at: <http://selmech.msk.ru/> (accessed 15.05.2019). (In Russ.)
4. Galkin A.V., Fadeev D.G., Uschapovsky I.V. Studying Quality Characteristics of Flax Fiber Depending on Deseeding Device Design. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):389-399. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
5. Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. Improving the Design of a Combing Device for Harvesting Leguminous Crops. *Vestnik federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Goryachkin Moscow State Agroengineering University Bulletin. 2018; (2):23-27. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>
6. Galkin A.V., Fadeev D.G. Energy Research on Deseeding and Transporting Device Wire of Flax Harvester. *Agrotehnika i agroobespechenie* = Agrotechnics and Power Supply. 2014; (1):198-203. Available at: [http://www.agrotech-orel.ru/releases/magazine/1-\(1\)-2014.pdf](http://www.agrotech-orel.ru/releases/magazine/1-(1)-2014.pdf) (accessed 15.05.2019). (In Russ.)
7. Galkin A.V., Fadeev D.G. Energy Indicators of Combing and Transporting Combing Devices at Different Methods of Flax Stem Combing. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2015; (9):9-11. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos> (accessed 15.05.2019). (In Russ.)
8. Lipovsky M.I. Justification of Rational Two-Phase Threshing of Grain Crops. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2004; (76):25-38. Available at: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/196909/#1> (accessed 15.05.2019). (In Russ.)
9. Yagelsky M.Yu., Rodimtsev S.A. The Study of the Energy of Crop Stems Destruction. *Tekhnika v selskom khozyaystve* = Machinery in Agriculture. 2014; (5):21-23. (In Russ.)

10. Kosolapov E.V., Matushkin O.P. Utilization of Analog-To-Digital Converter to Research Strength Properties of Stalk Material. *Fundamentalnyie issledovaniya* = Fundamental Research. 2015; (6):30-34. Available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38388> (accessed 15.05.2019). (In Russ.)
11. Buryanov A.I., Chervyakov I.V., Kolinko A.A., et al. Methods and Results of Identification of Natural Interconnection of Grain and an Ear during Ripening and Complete Ripeness. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2018; (6):21-25. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-60-6-21-25>
12. Ozhereliev V.N., Nikitin V.V. The Energy Intensity of the Allocation of Grain from the Spike. *Tehnika v selskom hozyaystve* = Agricultural Machinery. 2013; (4):22-24. (In Russ.)
13. Fu J., Chen Zh., Han L., Ren L. Review of Grain Threshing Theory and Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018; 11(3):12-20. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3432>
14. Fedin M.A., Kukharev O.N., Semov I.N. Determination of Grain Losses over the Combing Header with Rotor Equipped with Comb with a Tangential Channel. *Niva Povolzhya* = Cornfield of Volga Region. 2017; (4):175-181. Available at: [https://niva-volga.ru/file/vipuski/2017\\_4\\_45/2017\\_4\\_45\\_ru.pdf](https://niva-volga.ru/file/vipuski/2017_4_45/2017_4_45_ru.pdf) (accessed 15.05.2019). (In Russ.)
15. Burianov M.A. Investigation of Plant Stalk Interaction with Teeth of One-Drum Combine Mounted Header While Harvesting of Crops Through Stripping. *Politematicheskii setevoy elektronnyiy nauchnyiy zhurnal Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta* = Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. 2011; (67):91-100. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/issledovanie-vzaimodeystviya-kolosa-rasteniya-s-zubyami-odnobarabannoy-navesnoy-na-kombayn-zhatkoy-pri-uborke-zernovyh-kultur-ochesom> (accessed 15.05.2019). (In Russ.)

*Received 01.03.2019; revised 02.04.2019; published online 30.09.2019*

*About author:*

**Vladimir Yu. Savin**, Associate Professor of Chair of Heat Engines and Hydromachines, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (2 Bazhenova St., Kaluga 248000, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: D-4378-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, [savin.study@yandex.ru](mailto:savin.study@yandex.ru).

**Acknowledgments:** Author would like to express gratitude to Professor I. V. Gorbachev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Agriculture), for the help in writing the article.

*The author has read and approved the final manuscript.*

### 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:

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

01.04.05 Оптика

01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

05.20.02 Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

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 7.0.5–2008). 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(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, ResearcherID, 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.

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.

Электронные версии статей размещаются на сайте Научной электронной библиотеки. Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 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 system 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 and Means of Agricultural Mechanization

Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture

Technologies and Means of Maintenance in Agriculture

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In 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 7.0.5–2008* 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 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, ResearcherID, 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.

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.

Electronic copies of the journal with full text of the articles in PDF are in free access at the website of Academic Electronic Library. The Journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index in the catalogue of the agency of Rospechat 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 03.09.2019 г. Дата выхода в свет 30.09.2019 г.

Формат 70 × 100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 12,03.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 1775. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, 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 03.09.2019. Date of publishing 30.09.2019.

Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Conventional printed sheets 12,03.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 1775. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)