

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201904 ISSN 2658-4123 (Print), 2658-6525 (Online)

Том 29, № 4. 2019

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

16+



Vol. 29, no. 4. 2019

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Issued quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

DOI: 10.15507/2658-4123

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
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 (Роскомнадзоре),
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. Большевикская, д. 68/1
Тел./факс: +7 (8342) 48-14-24

Founder, Publisher and Editorial House address:
68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,
Republic of Mordovia, 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 публикует материалы 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

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 publishes articles on 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

In order to permit complex expert evaluation, all manuscripts undergo double-blind peer review. All reviewers are acknowledged experts on the subject of peer-reviewed materials. The reviews are stored at the Journal’s editorial office for a period of five years. Reviews (or a substantiated rejection) are forwarded by the Editorial Board to the author(s) of the submitted article. Reviews are also forwarded on request to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Scientific Citations

EBSCO

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),
Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics,
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, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (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 P. Dimitrov** – Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Rostov-on-Don, Russia)
- 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, ORCID: 0000-0001-9995-8371 (Saransk, Russia)
- Vladimir T. Yerofeev** – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural and Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor (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

Кантор О. Г., Спивак С. И., Морозкин Н. Д. Параметрическая идентификация моделей с заданными качественными характеристиками.....	480
Бутов А. А., Волков М. А., Голованов В. Н., Коваленко А. А., Костишко Б. М., Самойлов Л. М. Математическое моделирование основных классов стохастических продуктивных систем.....	496
Гуртов В. А., Щеголева Л. В., Пахомов С. И. Прогнозная оценка численности докторов и кандидатов наук в России.....	510

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ионов П. А., Сенин П. В., Пьянзов С. В., Столяров А. В., Земсков А. М. Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством.....	529
Скрябин В. А. Особенности расчета кинематических параметров и величины шероховатости при абразивной доводке запорных поверхностей корпусов задвижек, соединяющих трубы.....	546
Комаров В. А., Салмин В. В., Курашкин М. И. Исследование генеральных планов предприятий технического сервиса в агропромышленном комплексе.....	560

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Божко И. В., Пархоменко Г. Г., Камбулов С. И. Условия равновесия сельскохозяйственных машин для основной обработки почвы.....	578
Анисимов А. В., Рудик Ф. Я. Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу.....	594
Измайлов А. Ю., Хорт Д. О., Смирнов И. Г., Филиппов Р. А., Кутырёв А. И. Анализ параметров работы устройства для гидравлического удаления сорной растительности.....	614
Ряднов А. И., Федоренко В. Ф., Федорова О. А., Мишуров Н. П., Давыдова С. А. Совершенствование технологии уборки веничного сорго.....	635
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....</i>	652
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....</i>	654

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Kantor O. G., Spivak S. I., Morozkin N. D. Parametric Identification of the Models with Specified Quality Characteristics.....	480
Butov A. A., Volkov M. A., Golovanov V. N., Kovalenko A. A., Kostishko B. M.,	
Samoilov L. M. Mathematical Modeling of Main Classes of Stochastic Productive Systems.....	496
Gurtov V. A., Shchegoleva L. V., Pakhomov S. I. Forecast of the Number of Doctorate Holders in Russia.....	510

MECHANICAL ENGINEERING

Ionov P. A., Senin P. V., Pyanzov S. V., Stolyarov A. V., Zemskov A. M. Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device.....	529
Skryabin V. A. Features of Calculating Kinematic and Roughness Parameters at Abrasive Finishing of Shut-Off Surfaces of Gate Valve Bodies Connecting Pipes.....	546
Komarov V. A., Salmin V. V., Kurashkin M. I. Study of Master Plans of Technical Service Enterprises in Agricultural Sector.....	560

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Bozhko I. V., Parkhomenko G. G., Kambulov S. I. Equilibrium Conditions of Agricultural Machines for Main Tillage.....	578
Anisimov A. V., Rudik F. Ya. The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding.....	594
Izmaylov A. Yu., Khort D. O., Smirnov I. G., Filippov R. A., Kutyrev A. I. Analysis of Work Parameters of the Device for Hydraulic Removal of Weed Vegetation.....	614
Rjadnov A. I., Fedorenko V. F., Fedorova O. A., Mishurov N. P., Davydova S. A. Improvements in Broom Corn Harvesting Process.....	635
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	652
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	654

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

УДК 519.6

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201904.480-495



Параметрическая идентификация моделей с заданными качественными характеристиками

О. Г. Кантор^{1*}, С. И. Спивак², Н. Д. Морозкин²

¹ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной
технический университет» (г. Уфа, Россия)

²ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»
(г. Уфа, Россия)

*o_kantor@mail.ru

Введение. По результатам решения задачи параметрической идентификации должна быть определена модель, которая в рамках выбранной структуры обеспечивает наилучшее воспроизведение экспериментальных данных. Понятие «наилучшее» не является жестко структурированным, поэтому процедура выявления такой модели подчиняется естественной логике и включает этапы формирования информационной базы исследования, определения множества приемлемых моделей и последующего выбора лучшей из них. Если это множество окажется большим, то процедура определения оптимальной модели может оказаться трудоемкой. В этой связи особую значимость приобретает разработка методов параметрической идентификации, в рамках которых уже на стадии формирования множества приемлемых моделей предоставляется возможность учета интересующих исследователя качественных аспектов идентифицируемой зависимости.

Материалы и методы. Совокупность приемлемых методов в задачах параметрической идентификации во многом зависит от типа неопределенности экспериментальных данных. Так, например, вероятностно-статистические методы целесообразно использовать, если наблюдаемые факторы являются случайными и подчиняются какому-либо закону распределения вероятностей. Если же условия применения таких методов не выполняются, то полезным может оказаться представленный в работе подход, основанный на выявлении границ области расположения параметров модели, обеспечивающих достижение заданных уровней качественных характеристик.

Результаты исследования. Формализована процедура параметрической идентификации моделей, основанная на использовании предельно допустимых оценок параметров, позволяющая определять множество их значений, гарантирующих достижение требуемого качественного уровня описания экспериментальных данных, в том числе с позиций анализа влияния изменений требований к точности их воспроизведения. Представлена апробация разработанного метода на примере построения однофакторной модели химической кинетики.

© Кантор О. Г., Спивак С. И., Морозкин Н. Д., 2019



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

Обсуждение и заключение. Показано, что полученное значение константы скорости химической реакции в соответствии с введенными критериями обеспечивает приемлемую точность, адекватность и устойчивость идентифицированной кинетической модели. При этом по результатам расчетов была выявлена информация, которая может составить основу для планирования экспериментов, проводимых в целях повышения точности воспроизведения экспериментальных данных.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, предельно допустимые оценки, подход Л. В. Канторовича, качество модели

Для цитирования: Кантор О. Г., Спивак С. И., Морозкин Н. Д. Параметрическая идентификация моделей с заданными качественными характеристиками // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 480–495. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.480-495>

Parametric Identification of the Models with Specified Quality Characteristics

O. G. Kantor^{a*}, S. I. Spivak^b, N. D. Morozkin^b

^aUfa State Petroleum Technological University (Ufa, Russia)

^bBashkir State University (Ufa, Russia)

*o_kantor@mail.ru

Introduction. The model of a given structure should be identified based on the results of solving the problem of parametric identification. This model should provide the best possible the database development reproduction of the experimental data. The concept of “best” is not strictly structured. Therefore, the procedure for identifying such a model is subject to natural logic and includes the stages of data a determination of a set of acceptable models and subsequent selection of the best of them. If the set of acceptable models is large, the procedure for determining the best one can be time-consuming. In this regard, the development of methods for parametric identification, which at the stage of creating a set of acceptable models allows taking into account the qualitative aspects of the identified dependence, which are of interest to the researcher, is of particular importance.

Materials and Methods. The set of acceptable methods in the problems of parametric identification largely depends on the type of the experimental data. Uncertainty for example, probabilistic and statistical methods are useful if the observed factors are random and subject to any law of probability distribution. If the conditions for the use of such methods are not met, it may be useful to present an approach based on identifying the boundaries of location of the model parameters that ensure the achievement of specified levels of quality characteristics.

Results. The procedure of parametric identification of models is formalized. It is based on the use of maximum permissible parameter estimates and allows one to determining the set of parameter values that guarantee the achievement of the required qualitative level of experimental data description, including from the standpoint of analyzing the impact of changes in accord with requirements to the accuracy of their reproduction. The approbation of the developed method on the example of the construction of a one-factor model of chemical kinetics is presented.

Discussion and Conclusion. It is shown that the obtained value of the chemical reaction rate constant, in accordance with the introduced criteria, provides acceptable accuracy, adequacy, and stability of the identified kinetic model. At the same time, the results of calculations revealed the information that can form the basis for planning experiments carried out in order to improve the accuracy of the experimental data.

Keywords: parametric identification, maximum allowable estimates, approach of L.V. Kantorovich, models' quality

For citation: Kantor O.G., Spivak S.I., Morozkin N.D. Parametric Identification of the Models with Specified Quality Characteristics. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):480-495. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.480-495>

Введение

В самом общем виде задачи параметрической идентификации сводятся к проблеме определения набора числовых параметров $\bar{a} = \{a_1, \dots, a_p\}$ функциональной зависимости известной спецификации:

$$y = f(\bar{a}, \bar{x}). \quad (1)$$

Этот набор должен обеспечивать в некотором смысле лучшее соответствие имеющихся экспериментальных данных y_t и значений функции \hat{y}_t , $t = \overline{1, m}$, рассчитанных в соответствии с моделью (1).

Традиционная схема решения задач параметрической идентификации может быть сведена к двухэтапной процедуре:

1) на основании экспериментальных данных $\{x_t, y_t\}$, $t = \overline{1, m}$ с использованием выбранного метода определить набор значений параметров \bar{a} модели (1), что равнозначно установлению ее точного вида;

2) анализ достоверности полученной модели.

Анализ достоверности модели подразумевает проверку соответствия значений эндогенной переменной y_t , $t = \overline{1, m}$ представлениям исследователя, которые формализуются в виде некоторых критериев. К числу таких критериев могут относиться точность, адекватность, устойчивость и пр.¹, которые по своей сути являются качественными характеристиками полученной модели.

В том случае, если по результатам реализации второго этапа достигнутые значения рассматриваемых критериев не позволят считать модель достоверной, исследователю следует либо пересмотреть вид функциональной связи (1), либо уточнить и/или дополнить исходные данные, а затем вновь реализовать приведенную выше двух-

этапную процедуру. Очевидно, что количество итераций, которые предстоит осуществить исследователю, оценить заранее сложно. Безусловно, многое зависит от компетентности исследователя, однако степень неопределенности исходных данных, обусловленная их неточностью и ограниченным количеством, может существенно осложнить процесс решения задачи параметрической идентификации.

В этой связи особую актуальность приобретают методы, по результатам применения которых будет предоставляться возможность определения параметров идентифицируемых зависимостей, заведомо удовлетворяющих всем качественным характеристикам.

Важной особенностью задач математической обработки наблюдений является наличие априорной неточности в экспериментальных данных, источниками которой могут быть ошибки измерений или ошибки, возникающие в ходе непосредственной обработки данных. Это означает, что истинные значения исходных данных неизвестны наверняка, но относительно них можно утверждать, что их значения принадлежат некоторым не всегда заранее известным интервалам:

$$\begin{aligned} x_{it} \in [x_{it}, x_{it}], \quad y_t \in [y_t, y_t], \\ t = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (2)$$

В этих условиях может оказаться нецелесообразным определение единственного набора значений параметров модели (1), так как в силу того, что для исходных данных характерна интервальная неопределенность, единственность параметров модели будет означать, что получено точное решение на основании априори неточных данных. Поэтому более уместным может оказаться поиск интервалов значений

¹ Блехман И. И., Мышкис А. Д., Пановко Я. Г. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов. Киев: Наукова думка, 1976. 270 с.

параметров \bar{a} , обеспечивающих приемлемые значения качественных характеристик.

Обзор литературы

Решение задач параметрической идентификации на основе использования статистических методов является наиболее распространенным подходом в прикладном анализе наблюдений², согласно которому по экспериментальным данным $\{\bar{x}_t, y_t\}$, $t = \bar{1}, \bar{m}$ требуется определить регрессионную зависимость случайного результирующего фактора от неслучайных переменных, объясняющих его:

$$\hat{y}(\bar{x}) = f(\bar{x}) + \xi(\bar{x}), \quad (3)$$

где $\hat{y}(\bar{x})$ – функция, определяющая расчетные значения результирующего фактора, $\xi(\bar{x})$ – ошибки измерений результирующей переменной, которые могут зависеть и от неконтролируемых факторов.

Достаточно часто основой статистического инструментария является метод наименьших квадратов (МНК), применение которого позволяет получать несмещенные, состоятельные и эффективные оценки для параметров регрессионных зависимостей (3). Согласно МНК искомые параметры должны обеспечивать минимум суммы квадратов отклонений экспериментальных и расчетных значений результирующего фактора (эндогенной переменной). При этом должны выполняться определенные предпосылки³, являющиеся следствием условий Гаусса – Маркова⁴, которые справедливы далеко не для всех практических задач. Провер-

ка справедливости этих предпосылок предполагает исследование множества всех ошибок $\{\xi_t = \xi(\bar{x}_t), t = \bar{1}, \bar{m}\}$, в отношении которых должно быть установлено, что они случайны, распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией и не являются автокоррелированными.

В некоторых случаях проблемы неприменимости классического МНК удастся решить с помощью его модификаций⁵. Так, например, в случае гетероскедастичности или автокорреляции ошибок измерений, причинами которых могут выступать ошибки измерений объясняющих переменных \bar{x} , вместо классического МНК может использоваться обобщенный, а при определении параметров систем одновременных уравнений, двухшаговый или трехшаговый МНК. При этом и классический МНК, и все его модификации основаны на вероятностной теории статистических методов [1], согласно которой количество наблюдений должно быть достаточным для проведения расчетов, а сами экспериментальные данные должны состоять из независимых и одинаково распределенных случайных величин.

Перечисленные требования и классические предпосылки использования статистических методов в практических задачах математической обработки наблюдений могут не выполняться. Часто независимость экспериментальных данных, равно как и их одинаковая распределенность, принимаются как некоторая данность или формулируются как следствие «общих предпо-

² Алгоритмы и программы восстановления зависимостей / под ред. В. Н. Вапника. М.: Наука, 1984. 816 с. URL: <https://www.libex.ru/detail/book267535.html> (дата обращения: 20.10.2019); Белов В. М., Суханов В. А., Унгер Ф. Г. Обзор основных статистических методов определения параметров аппроксимирующих функций. Томск: ТИЦ СО АН СССР, 1990. 34 с.

³ Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: ЮНИТИ, 1998. 1022 с.

⁴ Дугерги К. Введение в эконометрику: учебник / пер. с англ. Изд. 3-е. М.: Инфра-М, 2009. 465 с.

⁵ Там же.

ложений», что далеко не всегда может соответствовать действительности. Помимо этого, в случае уникальных экспериментов данные априори могут не быть многочисленными, что способно усложнить проверку предпосылок МНК или даже поставить под сомнение принципиальную возможность применения вероятностных моделей, которые изначально ориентированы на исследование массовых явлений. Несоблюдение или игнорирование принципов и необходимых предпосылок статистических методов при решении задач параметрической идентификации может стать причиной получения модели, которая не будет являться адекватной объекту исследования.

В тех случаях, когда невозможно использование статистических методов, может применяться другой инструментарий [2; 3], в том числе основанный на теории нечетких множеств⁶ [4] или теории возможностей⁷. В контексте подобных ситуаций значительный интерес могут представлять и методы, основанные на обработке наблюдений в соответствии с подходом, предложенным Л. В. Канторовичем [5]. Суть этого подхода состоит в том, чтобы при опреде-

лении параметров модели максимально полно использовать всю имеющуюся количественную и качественную информацию об объекте исследования. Ключевым аспектом при реализации такого подхода является выявление интервалов значений параметров модели, каждый элемент которых обеспечивает соответствие заданным качественным характеристикам.

Идеи, высказанные Л. В. Канторовичем, заложили основу нового подхода к математической обработке наблюдений, который активно развивается в рамках интервального анализа благодаря теоретическим работам зарубежных⁸ [6–8] и российских авторов⁹ [9; 10], а также используется в отдельных научных направлениях [3; 11–13]. Одно из них связано с решением обратных задач химической кинетики при исследовании механизмов сложных химических реакций [14–17].

В настоящей работе представлен метод параметрической идентификации, основанный на использовании предельно допустимых оценок параметров при определении их интервальных оценок с учетом требуемых качественных характеристик, и его апробация

⁶ Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. М.: Изд-во «Машиностроение – 1», 2004. 397 с.; Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / сборник статей пер. с англ. под ред. Р. Р. Ягера. М.: Радио и связь, 1986. 408 с. URL: <http://elibr.pstu.ru/vufind/Record/RUPSTUbooks147886> (дата обращения: 20.10.2019).

⁷ Вошинин А. П. Задачи анализа с неопределенными данными – интервальность и/или случайность? // Интервальная математика и распространение ограничений: Рабочие совещания. МКВМ–2004. С. 147–158. URL: http://www-sbras.nsc.ru/interval/Conferences/IMRO_04/Voschinin.pdf (дата обращения: 20.10.2019); Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.; Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация...; Пытьев Ю. П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение. М.: Физматлит, 2016. 596 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008627200/ (дата обращения: 20.10.2019).

⁸ Жолен Л., Кифер М., Дидри О., Вальтер Э. Прикладной интервальный анализ. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 468 с. URL: <http://www.nsc.ru/interval/Library/ArpBooks/ArpIntAnal.pdf> (дата обращения: 20.10.2019).

⁹ Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986. 222 с. URL: https://www.studmed.ru/kalmykov-sa-shokin-yui-yuldashev-zh-metody-intervalnogo-analiza_6203900ede5.html (дата обращения: 20.10.2019); Шарый С. П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: Издательство «XYZ», 2019. 635 с. URL: <http://www.nsc.ru/interval/Library/InteBooks/SharyBook.pdf> (дата обращения: 20.10.2019).

для задачи построения модели химической кинетики.

Материалы и методы

Для оценки степени близости расчетных и экспериментальных данных введем в рассмотрение невязки – разности между расчетными и экспериментальными значениями переменной y :

$$\hat{y}_t - y_t, t = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Условие того, что расчетные и экспериментальные данные (2) в каждом наблюдении не должны отличаться более чем на некоторую величину ζ_p , задается системой неравенств:

$$|\hat{y}_t - y_t| \leq \zeta_p, t = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Очевидно, что искомые параметры $\bar{a} = \{a_1, \dots, a_p\}$ модели (1) влияют на величины невязок. При этом для одной и той же модели могут существовать несколько наборов значений параметров, которые одинаково хорошо будут описывать наблюдения, но в то же время будут существенно различаться между собой. Совокупность наборов значений всех подобных параметров, очевидно, задает некоторую область Λ^* , для обозначения которой будем использовать термин «область неопределенности». В данном случае термин «неопределенность» отражает тот факт, что каждая точка из области Λ^* может быть выбрана для задания окончательного вида модели (1), что в свою очередь равносильно отсутствию однозначного способа ее идентификации.

По каждому из параметров $\bar{a} = \{a_1, \dots, a_p\}$ определим отрезок:

$$a_j \in [\underline{a}_j, \bar{a}_j], j = \overline{1, p}, \quad (6)$$

состоящий из значений a_j , каждое из которых сохраняет совместность системы (5) при некоторых значениях других параметров, а вне его совместность этой системы не обеспечивается никаким набором значений параметров. Бу-

дем называть этот отрезок «интервалом неопределенности», а его границы – «предельно допустимыми оценками» параметров идентифицируемой зависимости (1).

Поставим задачу определения интервалов значений параметров (6), которые удовлетворяют системе ограничений (5). При таком подходе не требуется знание статистических свойств распределения погрешностей измерений, так как в системе неравенств (5) величины $\{\xi_t\}$, по сути, являются характеристиками абсолютных ошибок аппроксимации, и информация об их значениях может быть доступна исследователю (например, на основании технических характеристик используемого оборудования).

Введем величину $\xi^* = \max_{t=\overline{1, m}} \{\xi_t\}$. Тогда в силу условий (5) будут справедливы соотношения:

$$|\hat{y}_t - y_t| \leq \xi^*, t = \overline{1, m},$$

из которых следует, что модель (1) должна описывать экспериментальные данные в пределах, обусловленных величиной ξ^* . Для обозначения ξ^* будем использовать термин «предельно допустимая погрешность аппроксимации».

Введем в рассмотрение множество Λ , задаваемое прямым произведением интервалов (6):

$$\Lambda = [a_1, \bar{a}_1] \times \dots \times [a_p, \bar{a}_p]. \quad (7)$$

Очевидно, что Λ является аппроксимирующим множеством для области неопределенности Λ^* . Назовем Λ «множеством неопределенности».

Будем предполагать, что требуемые качественные характеристики имеют количественное задание, то есть формализованы в виде количественных соотношений (равенств, неравенств и пр.) или критериев. Причем данные характеристики могут относиться к временным интервалам как ретроспективного, так и перспективного

анализа. Очевидно, что такая информация приводит к сужению множества Λ и, как следствие, необходимости рассмотрения вместо него множества $\tilde{\Lambda} = \Lambda \cap \Omega$, где Ω – множество значений параметров модели (1), которые обеспечивают приемлемые уровни интересующих исследователя качественных характеристик. Все дальнейшие рассуждения приводятся для множества Λ , но могут быть повторены в терминах множества $\tilde{\Lambda}$.

Ранее было отмечено, что в число качественных характеристик целесообразно включать те, которые позволяют получить оценки точности, адекватности и устойчивости получаемого решения¹⁰. Основываясь на описанном выше подходе, в качестве характеристики точности модели примем величину предельно допустимой погрешности аппроксимации ξ^* , являющуюся мерой максимального расхождения экспериментальных и расчетных значений искомой функции. Соответствие ее значения представлениям исследователя о точности модели эквивалентно тому, что уровень данной качественной характеристики оценивается как приемлемый. Расчет предельно допустимой погрешности ξ^* в соответствии с подходом Л. В. Канторовича [18] предлагается осуществлять на основе решения оптимизационной задачи:

$$\begin{aligned} \xi &\rightarrow \min_a \\ |\hat{y}_t - y_t| &\leq \xi, \quad t = \overline{1, m} \\ \xi &\geq 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В этом случае расчет предельно допустимых оценок параметров может проводиться на основе оптимизационных задач:

$$\begin{aligned} a_j &\rightarrow \min_a \left(\max_a \right), \quad j = \overline{1, p} \\ |\hat{y}_t - y_t| &\leq \xi^*, \quad t = \overline{1, m}. \end{aligned}$$

Адекватность модели должна устанавливаться в каждом конкретном случае с учетом специфики объекта исследования.

Для оценки устойчивости решения предлагается анализировать два множества:

– множество значений параметров $\Lambda' = \{\bar{a} \mid \xi^* \leq |\hat{y}_t - y_t| \leq \xi^*(1 + \theta), \theta \geq 0\}$, которые гарантируют приемлемое (на уровне θ) изменение решения к ослаблению требований на достигнутый уровень точности описания имеющихся данных ξ^* ;

– множество значений исходных данных, которые обеспечивают идентификацию модели (1) с учетом «ужесточения» требований на достигнутом уровне точности описания имеющихся данных ξ^* : $X' = \{\bar{x}_t, t = \overline{1, m} \mid |\hat{y}_t - y_t| \leq \xi^* \cdot \lambda, 0 \leq \lambda < 1\}$.

Определение точных границ областей Λ' и X' в случае задач больших размерностей может свестись к достаточно объемным вычислениям. По этой причине более целесообразным может оказаться выявление границ соответствующих аппроксимирующих множеств Λ'' и X'' , имеющих более простую структуру¹¹.

Для идентификации множества Λ'' предлагается использовать следующий подход.

Выберем набор параметров $\bar{a}^0 = \{a_1^0, \dots, a_p^0\}$: $\bar{a}^0 \in \Lambda^* \cap \Lambda$ (полагая, что ξ^* определено, а множество Λ^* – не идентифицировано). Зададим параметр θ и рассмотрим следующую оптимизационную задачу:

¹⁰ Блехман И. И., Мышкис А. Д., Пановко Я. Г. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов.

¹¹ Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х. Методы интервального анализа.

$$\begin{aligned} \eta &\rightarrow \min_{\eta, \{\delta_j\}} \\ |\hat{y}'_i - y_i| &\leq \zeta^*(1 + \theta), \quad t = \overline{1, m} \\ |1 - \delta_j| &\leq \eta, \quad \delta_j \geq 0, \quad j = \overline{1, p} \\ \eta &\geq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $y_i = f(\bar{a}^0, \bar{x}_i)$, $y'_i = f(\bar{a}', \bar{x}_i)$, $t = \overline{1, m}$, $\bar{a}' = \{a'_j | a'_j = \delta_j a_j^0, j = \overline{1, p}\}$.

По результатам решения задачи (10) должны быть рассчитаны максимальные относительные отклонения δ_j от каждого параметра a_j^0 , которые обеспечивают заданный уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных. По сути, это означает, что будет определено аппроксимирующее множество Λ'' для области Λ' , состоящее из значений параметров $\bar{a}' = \{a'_1, \dots, a'_p\}$, которые гарантировано обеспечивают для всех невязок $\hat{y}'_i - y_i$ абсолютную точность, не превышающую $\zeta^*(1 + \theta)$ (рис. 1).

Если малым значениям параметра θ будет соответствовать малое значение параметра η (а значит и малые относительные отклонения от точки \bar{a}^0), то решение задачи параметрической идентификации, задаваемое областью неопределенности Λ^* , является устойчивым в точке \bar{a}^0 относительно вариаций уровней точности.

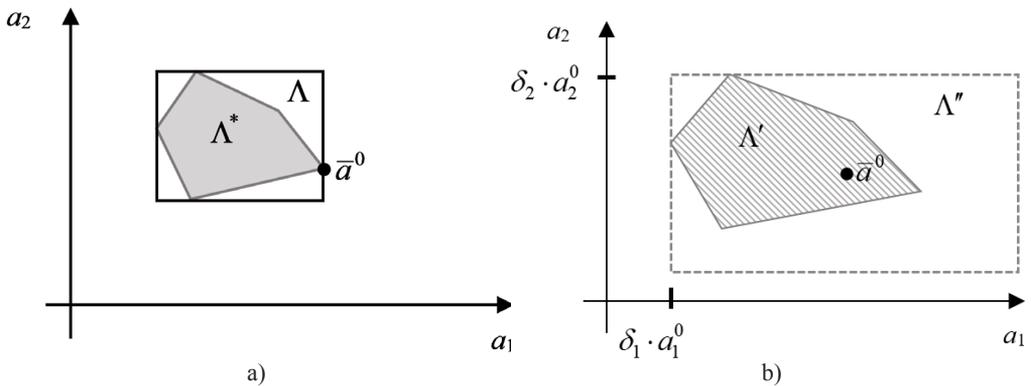
Вывод об устойчивости в целом множества Λ^* решения задачи параметрической идентификации может быть сделан на основании анализа результатов аналогичных расчетов для всех наборов значений параметров, лежащих на пересечении множеств Λ^* и Λ .

Таким образом, модель для идентификации множества X'' может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \zeta &\rightarrow \min_{\zeta, \{\gamma_i\}} \\ |\hat{y}''_i - y_i| &\leq \zeta^* \cdot \lambda, \quad t = \overline{1, m} \\ |1 - \gamma_i| &\leq \zeta, \quad \gamma_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n} \\ \zeta &\geq 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где $y_i = f(\bar{a}, \bar{x}_i)$; $y''_i = f(\bar{a}, \bar{x}'_i)$; $\bar{x}'_i = \{x'_i | x'_i = \gamma_i x_i, i = \overline{1, n}\}$; \bar{a} – произвольный элемент множества Λ^* ; λ – заданный числовой параметр ($0 \leq \lambda < 1$), характеризующий желаемое изменение точности соответствия расчетных и экспериментальных данных.

Оптимальное значение целевой функции задачи (11) ζ^* характеризует максимальную погрешность в параметрах при заданном уровне точности аппроксимации $\zeta^* \cdot \lambda$. Если малым вариациям точности аппроксимации



Р и с. 1. Геометрическая интерпретация начальных условий (а) и решения (б) задачи (10)

F i g. 1. Geometric interpretation of the initial conditions (a) and solution (b) of the problem (10)

(что отвечает значениям λ , близким к 1) будут соответствовать малые вариации исходных данных (то есть допустимые ζ^*), то исходные данные задачи параметрической идентификации при фиксированном наборе значений параметров $\bar{a} \in \Lambda^*$ являются устойчивыми относительно вариации уровней точности. Другими словами, если значение ζ^* соответствует представлениям исследователя о предельно допустимой погрешности измерения исходных данных, то качество исходных данных можно считать приемлемым.

Учитывая, что в формализации модели (11) присутствует произвольный вектор параметров $\bar{a} \in \Lambda^*$, то для формулировки вывода о качестве исходных данных требуется рассмотреть задачи (11) $\forall \bar{a} \in \Lambda^*$. Однако, если размер множества Λ^* небольшой (что равнозначно приемлемой неопределенности решения), и функция (1) является непрерывной, качество исходных данных может быть установлено на основе рассмотрения ограниченного множества векторов $\bar{a} \in \Lambda^*$. В этой связи целесообразным является проведение оценки степени неопределенности решения задачи параметрической идентификации [14], что с учетом справедливости соотношения $\Lambda^* \subset \Lambda$ может быть осуществлено с использованием предельно допустимых оценок параметров:

$$\text{diam } \Lambda^* = \text{diam } \Lambda = \max_{j=1, p} (\bar{a}_j - \underline{a}_j). \quad (12)$$

Результаты исследования

Апробация представленного подхода проводилась на классическом примере построения простейшей модели химической кинетики для реакции «превращения дибромантарной кислоты в бромистоводородную и бромомалеиновую»¹² [19]:



Для химической реакции (13) вид кинетической модели, описывающей изменение концентрации вещества (a) с течением времени (t), следующий:

$$\frac{da}{dt} = -ka, \quad (14)$$

где k – константа скорости реакции, причем из реакции (14) следует, что $k \geq 0$.

Значения константы скорости реакции k рассчитывались по формуле:

$$k = \frac{1}{t} \cdot \lg \frac{T_0}{3T_0 - 2T_n}, \quad (15)$$

где T_n – титры, измеряемые в моменты времени t_n .

Для расчета концентрации дибромантарной кислоты использовалась формула:

$$a_n = a_0 \left(3 - \frac{2T_n}{T_0} \right), \quad (16)$$

где a_0 – начальная концентрация.

Условиями проведения реакции гарантировалось постоянство константы скорости k . Поэтому справедливость кинетического уравнения (14) была установленной в силу того, что по результатам расчетов на основании формулы (16) получались близкие значения k .

Ниже приводятся этапы параметрической идентификации модели (14), реализованные в соответствии с представленным выше подходом. Расчет предельно допустимой погрешности аппроксимации по имеющимся экспериментальным данным (табл. 1) проводился на основе модели:

$$\begin{aligned} \xi &\rightarrow \min \\ |\hat{a}_i - a_i| &\leq \xi, \quad i = \overline{1, 19} \\ k &\geq 0, \quad \xi \geq 0, \end{aligned} \quad (17)$$

¹² Вант-Гофф Я. Г. Очерки по химической динамике. Л.: ОНТИ-Химтеорет, 1936. 178 с.

где a_i – концентрации дибромантарной кислоты, рассчитанные по формуле (16) на основе экспериментальных данных о титрах; a_i – расчетные значения концентрации согласно модели (17) (табл. 1).

По методу Рунге – Кутты для задачи (17) было получено единственное оптимальное решение $k^* = 0,03122$. Таким образом, был установлен точный вид модели (14):

$$\frac{da}{dt} = -0,03122a, \quad (18)$$

и получена первая качественная характеристика – точность описания экспериментальных данных $\zeta^* = 0,01840$ (это значение показывает, что в каждом опыте константа скорости k^* (табл. 1) обеспечивает описание экспериментальных концентраций с погрешностью, не превышающей 0,01840). Константе k^* соответствует обобщенный показатель точности описания данных – средняя ошибка аппроксимации¹⁴, равная 2,42 %. Интервал неопределенности по константе скорости в виду единственности оптимального значения k^* является вырожденным.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Результаты численной реализации модели (17)
Results of numerical implementation of the model (17)

t , мин. / min	T^{13} , мг/см ³ / mg/cm ³	k , мин. ⁻¹ / min ⁻¹	Концентрация, мг/см ³ / Concentration, mg/cm ³		Ошибка / Error	
			a	a_i	абсолютная, мг/см ³ / absolute error, mg/cm ³	относительная, % / relative error, %
0	10210,0	–	1000,0	–	–	–
2	10530,0	32,4	937,3	939,5	–2,20	–0,23
4	10790,0	30,2	886,4	882,6	3,80	0,42
6	11050,0	30,0	835,5	829,2	6,30	0,75
8	11250,0	28,5	796,3	779,0	17,30	2,17
10	11550,0	31,7	737,5	731,9	5,60	0,77
13	11940,0	31,8	661,1	666,4	–5,30	–0,81
16	12290,0	32,7	592,6	606,9	–14,30	–2,42
19	12530,0	31,9	545,5	552,6	–7,10	–1,30
22	12840,0	32,9	484,8	503,2	–18,40	–3,79
26	13030,0	32,0	447,6	444,1	3,50	0,77
30	13300,0	31,0	394,7	392,0	2,70	0,68
34	13570,0	31,6	341,8	346,0	–4,20	–1,22
39	13710,0	30,8	314,4	296,0	18,40	5,85
45	14050,0	31,0	247,8	245,4	2,40	0,95
52	14320,0	31,4	194,9	197,3	–2,40	–1,21
60	14520,0	31,0	155,7	153,7	2,00	1,32
71	14690,0	29,6	122,4	109,0	13,40	10,95
90	15030,0	32,1	55,8	60,3	–4,50	–8,02

¹³ В таблице 1 T, k – экспериментальные данные / In Table 1 T, k – experimental data.

¹⁴ $\bar{A} = \frac{1}{19} \sum_{i=1}^{19} \left| \frac{\hat{a}_i - a_i}{a_i} \right|$.

Кинетическая модель (18) является адекватной в силу логичной динамики расчетных значений концентраций дибромантарной кислоты.

Анализ устойчивости модели (18) проводился с учетом того, что в идентифицируемой зависимости определению подлежит единственный параметр. Поэтому множество Λ' представляет собой интервал, границы которого могут быть найдены на основе следующих оптимизационных задач:

$$\begin{aligned} k &\rightarrow \min (\max) \\ |\hat{a}_i - a_i| &\leq \xi^* (1 + \theta), \quad i = \overline{1, 19} \quad (19) \\ k &\geq 0, \end{aligned}$$

где $\theta \geq 0$ – заданный числовой параметр, отражающий «ослабление» усло-

вий на степень близости экспериментальных и расчетных значений.

Оптимальное решение задачи (19) при $\theta = 0,15$ следующее:

$$\begin{aligned} k^{\min} &= 0,03097 = (1 - 0,0080)k^*, \\ k^{\max} &= 0,03146 = (1 + 0,0077)k^*. \end{aligned}$$

Модель для анализа устойчивости исходных данных относительно вариации уровней точности имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \zeta &\rightarrow \min_{k, \{\gamma_n\}} \\ |\tilde{a}_i - a_i| &\leq \zeta^* \cdot \lambda, \quad i = \overline{1, 19} \\ |1 - \gamma_i| &\leq \zeta, \quad \gamma_i \geq 0, \quad i = \overline{1, 19} \quad (20) \\ k &\geq 0, \quad \zeta \geq 0, \end{aligned}$$

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Результаты численной реализации модели (20) при $\lambda = 0,85$
Results of the numerical implementation of the model (20) with $\lambda = 0,85$

t, мин. / min	γ_i	Концентрации, мг/см ³ / Concentration, mg/cm ³		Ошибка / Error	
		\tilde{a}_i	a_i	абсолютная, мг/см ³ / absolute error, mg/cm ³	относительная, % / relative error, %
0	0,001046	1000,0	–	–	–
2	–0,001046	933,0	939,0	–6,00	–0,64
4	–0,001046	882,0	881,7	0,20	0,02
6	0,001046	835,5	828,0	7,50	0,90
8	–0,000393	793,1	777,5	15,60	1,97
10	–0,001046	732,8	730,0	2,70	0,37
13	–0,001046	656,2	664,3	–8,10	–1,23
16	–0,000509	588,8	604,4	–15,60	–2,66
19	–0,001046	540,4	550,0	–9,60	–1,78
22	0,001046	484,8	500,5	–15,60	–3,23
26	–0,001046	442,3	441,3	1,00	0,22
30	–0,001046	389,3	389,1	0,20	0,04
34	–0,001046	336,3	343,1	–6,80	–2,03
39	–0,001046	308,8	293,1	15,60	5,07
45	–0,001046	242,0	242,7	–0,70	–0,28
52	–0,001046	189,0	194,7	–5,70	–3,01
60	–0,001046	149,8	151,4	–1,60	–1,08
71	–0,001046	116,4	107,1	9,30	7,99
90	–0,001046	49,7	59,0	–9,30	–18,75

где \tilde{a}_i и a_i – концентрации дибромантарной кислоты, рассчитанные по формуле (16) и согласно модели (20) на основе скорректированных на коэффициент $(1-\gamma_i)$ значений титров.

Ниже (табл. 2) представлены результаты расчетов, полученные при $\lambda = 0,85$ в соответствии с оптимальными значениями $\zeta^* = 0,00105$ и $k^* =$

$= 0,03147$ (средняя ошибка аппроксимации составила 2,85 %).

Таким образом, абсолютная погрешность на уровне k^* может быть обеспечена за счет вариации титров не более чем на 0,105 % от их экспериментальных значений, что позволяет считать экспериментальные данные устойчивыми к вариации значений критерия точности (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Результаты анализа качественных характеристик модели (18)

Этап	Показатели	Выводы
Исследование на устойчивость решения k^* (при $\theta = 0,15$)	Характеристики точности: – предельно допустимая погрешность аппроксимации $\xi^* = 0,01840$, долей ед.; – средняя ошибка аппроксимации $\bar{A} = 2,42\%$	Решение k^* устойчиво к вариации точности
	Характеристики неопределенности: – интервал по константе скорости $k \in [0,03097, 0,03146]$; – вариация относительных ошибок $[-8,02, 10,95]$, %	
Исследование на устойчивость исходных данных (при $\lambda = 0,85$)	Характеристики точности: – абсолютная ошибка аппроксимации $\xi^* \cdot \lambda = 0,0156$, долей ед.; – средняя ошибка аппроксимации $\bar{A} = 2,85\%$	Исходные данные устойчивы к вариации точности
	Характеристики неопределенности: – максимальное отклонение от фактически измеренных титров $\zeta^* = 0,00105$, долей ед.; – вариация относительных ошибок $[-18,75, 7,99]$, %	

T a b l e 3

Results of the analysis of the model (18) quality characteristics

Stage	Indicators	Findings
Solution sustainability study k^* (at $\theta = 0.15$)	Accuracy characteristics: – maximum permissible approximation error $\xi^* = 0.01840$, share units; – average approximation error $\bar{A} = 2.42\%$	The solution k^* is resistant to accuracy variations
	Uncertainty characteristics: – rate constant interval $k \in [0.03097, 0.03146]$; – relative error variation $[-8.02, 10.95]$, %	
Initial data sustainability study (at $\lambda = 0.85$)	Accuracy characteristics: – absolute approximation error $\xi^* \cdot \lambda = 0.0156$, share units; – average approximation error $\bar{A} = 2.85\%$	Initial data resistant to variation in accuracy
	Uncertainty characteristics: – maximum deviation from actually measured titres $\zeta^* = 0.00105$, share units; – relative error variation $[-18.75, 7.99]$, %	

Обсуждение и заключение

Проведенные расчеты с позиций реализации представленного в статье подхода к параметрической идентификации функциональных зависимостей позволили получить константу скорости рассматриваемой химической реакции $k^* = 0,03122$, которая обеспечивает приемлемые значения введенных качественных характеристик кинетической модели.

Важной отличительной особенностью метода являются возможности, которые предоставляются в части выявления свойств идентифицированной зависимости и планирования экспериментов.

Так, в рассмотренной выше задаче идентификации кинетической модели было установлено следующее. Если предположить, что погрешности в измерении каждого экспериментального значения концентрации вырастут не более чем на 15 %, то границы соответствующего интервала значений константы скорости будут отличаться от оптимальной величины k^* не более чем на 0,8 %. Таким образом, зная или предполагая предельный порог в расхождении между экспериментальными и расчетными значениями эндогенной переменной, исследователь может оценить соответствующие изменения диапазонов вариации искомых параметров. Если малым изменениям значений абсолютной точности будут соответствовать приемлемые, с точки зрения исследователя, изменения в параметрах, то полученное решение можно считать устойчивым к вариации точности.

С использованием представленного метода идентификации могут быть определены и диапазоны вариации исходных данных, обеспечивающие лучшие значения точности соответствия расчетных и фактических значений моделируемой переменной. Так, в рассмотренной задаче идентификации кинетической модели абсолютная точность может быть улучшена на 15 % за счет изменения значений титров не более чем на $\pm 0,105$ % от их фактических уровней. Данная оценка вариации погрешности титров находится в допустимых границах для этого типа экспериментальных данных, что позволяет характеризовать их качество как приемлемое.

Анализ вариации абсолютной точности в разрезе каждого экспериментального значения экзогенной переменной может составить основу для проведения экспериментов, целью которых будет являться уточнение имеющихся данных, в большей степени влияющих на значение достигнутого уровня точности. Так, применительно к рассмотренной задаче анализ расчетных данных (табл. 2) показал, что при изменении исходных данных в соответствии с оптимальным решением задачи (17) в момент времени $t = 90$ минут существенно возрастает погрешность для значений концентрации. Поэтому для повышения точности воспроизведения экспериментальных данных модели целесообразным является проведение таких опытов, которые будут аналогичны осуществленным в данный момент времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Орлов А. И. Некоторые нерешенные вопросы в области математических методов исследования // Заводская лаборатория. 2002. Т. 68, № 3. С. 52–56.
2. Ионов П. А., Сенин П. В., Столяров А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния в ресурсолимитирующем соединении объемного гидропривода // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 537–551. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.537-551>

3. **Коржавина А. С., Князьков В. С.** Метод умножения с масштабированием результата для высокоточных модулярно-позиционных интервально-логарифмических вычислений // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 187–204. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.187-204>
4. **Жбанова Н. Ю., Блюмин С. Л.** Параметрическая идентификация кусочно-линейных и кусочно-нелинейных многоэтапных нечетких процессов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 11. С. 84–93. DOI: <http://www.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-84-93>
5. **Канторович Л. В.** О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сибирский математический журнал. 1962. Т. 3, № 5. С. 701–709.
6. **Alefeld G., Mayer G.** Interval Analysis: Theory and Applications // Journal of Computational Applied Mathematics. 2000. Vol. 121, Issue 1–2. Pp. 421–464. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(00\)00342-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00342-3)
7. Стандартизация обозначений в интервальном анализе / Б. Кирфотт [и др.] // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, № 1. С. 7–13. URL: <http://www.ict.nsc.ru/jct/annotation/1345> (дата обращения: 20.10.2019).
8. **Moore R. E.** Interval Analysis // Journal of the Franklin Institute. 1967. Vol. 284, Issue 2. Pp. 148–149. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(67\)90590-X](https://doi.org/10.1016/0016-0032(67)90590-X)
9. **Кумков С. И.** Обработка экспериментальных данных ионной проводимости расплавленного электролита методами интервального анализа // Расплавы. 2010. № 3. С. 79–89.
10. **Оскорбин Н. М., Жилин С. И., Суханов С. И.** Интервальный подход к оценке согласованности и точности геоанализа // Геодезия и картография. 2011. № 11. С. 12–16. URL: <https://geocartography.ru/archive/2011-november> (дата обращения: 20.10.2019).
11. **Суханов В. А.** Исследование эмпирических зависимостей: нестатистический подход: сборник научных статей / под ред. Н. А. Оскорбина, П. И. Кузьмина. Барнаул: Алт. ун-т, 2007. С. 115–127.
12. Chemometrics in Analytical Chemistry – Part I: History, Experimental Design and Data Analysis Tools / R. G. Brereton [et al.] // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2017. Vol. 409, Issue 25. Pp. 5891–5899. DOI: <http://www.doi.org/10.1007/s00216-017-0517-1>
13. Chemometrics in Analytical Chemistry – Part II: Modeling, Validation, and Applications / R. G. Brereton [et al.] // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2018. Vol. 410, Issue 26. Pp. 6691–6704. DOI: <http://www.doi.org/10.1007/s00216-018-1283-4>
14. **Кантор О. Г., Спивак С. И., Талипова Р. Р.** Параметрическая идентификация математических моделей химической кинетики // Системы и средства информатики. 2017. Т. 27, № 3. С. 145–154. DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527170312>
15. **Спивак С. И., Тимошенко В. И., Слинько М. Г.** Методы построения кинетических моделей стационарных реакций // Химическая промышленность сегодня. 1979. № 3. С. 33–36.
16. **Яблонский Г. С., Спивак С. И.** Математические модели химической кинетики. М.: Знание, 1977. 64 с.
17. **Pomerantsev A. L., Kutsenova A. V., Rodionova O. Ye.** Kinetic Analysis of Non-Isothermal Solid-State Reactions: Multi-Stage Modeling Without Assumptions in the Reaction Mechanism // Physical Chemistry Chemical Physics. 2017. Vol. 19, Issue 5. Pp. 3606–3615. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6cp07529k>
18. **Спивак С. И., Исмагилова А. С., Кантор О. Г.** Области неопределенности в математической теории анализа измерений // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 58, № 4. С. 17–21. URL: <http://www.sbook.ru/suit/CONTENTS/140400.pdf> (дата обращения: 20.10.2019).
19. **Кантор О. Г., Спивак С. И.** Оценка качества моделей химической кинетики // Известия Уфимского научного центра РАН. 2017. № 2. С. 11–17. URL: <http://sciencerb.ru/#> (дата обращения: 20.10.2019).

Поступила 06.05.2019; принята к публикации 06.06.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Кантор Ольга Геннадиевна, доцент кафедры корпоративных финансов и учетных технологий ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (450062, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1), кандидат физико-математических наук, ResearcherID: O-5136-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3186-3285>, ScopusID: 26767794600, o_kantor@mail.ru

Спивак Семен Израилевич, заведующий кафедрой математического моделирования ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» (450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID: B-9334-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0911-7446>, ScopusID: 16465463600, semen.spivak@mail.ru

Морозкин Николай Данилович, ректор ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» (450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID: D-2570-2019, ScopusID: 6603118906, rector@bsunet.ru

Заявленный вклад соавторов:

О. Г. Кантор – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; С. И. Спивак – научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; Н. Д. Морозкин – корректировка литературного анализа, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Orlov A.I. Some Unresolved Issues in the Field of Mathematical Methods of Research. *Zavodskaya laboratoriya* = Industrial Laboratory. 2002; 68(3):52-56. (In Russ.)
2. Ionov P.A., Senin P.V., Stolyarov A.V. Modeling of Stress-Strain State in Connection Resource Defines of Volumetric Hydraulic Drive. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):537-551. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.537-551>
3. Korzhavina A.S., Knyazkov V.S. The Multiplication Method with Scaling the Result for High-Precision Residue Positional Interval Logarithmic Computations. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):187-204. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.187-204>
4. Zhibanova N. Yu., Blyumin S.L. Parametric Identification of Piecewise Linear and Piecewise Non-Linear Multistage Fuzzy Processes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Irkutsk State Technical University Bulletin. 2016; 20(11):84-93. (In Russ.) DOI: <http://www.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-84-93>
5. Kantorovich L.V. Some New Approaches to Computational Methods and Processing of Observations. *Sibirskiy matematicheskiy zhurnal* = Siberian Mathematical Journal. 1962; 3(5):701-709. (In Russ.)
6. Alefeld G., Mayer G. Interval Analysis: Theory and Applications. *Journal of Computational Applied Mathematics*. 2000; 121(1-2):421-464. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(00\)00342-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00342-3)
7. Kearfott B., Nakao M., Neumaier A., et al. Standardized Notation in Interval Analysis. *Iychnislitelnye tekhnologii* = Computational Technologies. 2010; 15(1):7-13. Available at: <http://www.ict.nsc.ru/jct/annotation/1345> (accessed 20.10.2019). (In Eng.)
8. Moore R.E. Interval Analysis. *Journal of the Franklin Institute*. 1967; 284(2):148-149. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(67\)90590-X](https://doi.org/10.1016/0016-0032(67)90590-X)
9. Kumkov S.I. Processing of Experimental Data on the Ionic Conductivity of the Expanded Electrolyte by Interval Analysis Methods. *Rasplavy* = Melts. 2010; (3):79-89. (In Russ.)
10. Oskorbin N.M., Zhilin S.I., Sukhanov S.I. Interval Approach to Assessment of Geodata Consistency Andaccuracy. *Geodeziya i kartografiya* = Geodesy and Cartography. 2011; (11):12-16. Available at: <https://geocartography.ru/archive/2011-november> (accessed 20.10.2019). (In Russ.)

11. Sukhanov V.A. Empirical Dependence Research: A Non-Statistical Approach. In: Collection of Scientific Articles. Oskorbin N.A., Kuzmin P.I. (Eds.). Barnaul: Altai University Publ.; 2007. p. 115-127. (In Russ.)
12. Brereton R.G., Jansen J., Lopes J., et al. Chemometrics in Analytical Chemistry – Part I: History, Experimental Design and Data Analysis Tools. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2017; 409(25):5891-5899. (In Eng.) DOI: <http://www.doi.org/10.1007/s00216-017-0517-1>
13. Brereton R.G., Jansen J., Lopes J., et al. Chemometrics in Analytical Chemistry – Part II: Modeling, Validation, and Applications. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2018; 410(26):6691-6704. (In Eng.) DOI: <http://www.doi.org/10.1007/s00216-018-1283-4>
14. Kantor O.G., Spivak S.I., Talipova R.R. Parametric Identification of Mathematical Models of Chemical Kinetics. *Sistemy i sredstva informatiki* = Informatics Systems and Tools. 2017; 27(3):145-154. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527170312>
15. Spivak S.I., Timoshenko V.I., Slinko M.G. Methods of Construction of Kinetic Models of Stationary Reactions. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya* = Chemical Industry Today. 1979; (3):33-36. (In Russ.)
16. Yablonskiy G.S., Spivak S.I. Mathematical Models of Chemical Kinetics. Moscow: Znanie Publ.; 1977. 64 p.(In Russ.)
17. Pomerantsev A.L., Kutsenova A.V., Rodionova O.Ye. Kinetic Analysis of Non-Isothermal Solid-State Reactions: Multi-Stage Modeling Without Assumptions in the Reaction Mechanism. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2017; 19(5):3606-3615. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1039/c6cp07529k>
18. Spivak S.I., Ismagilova A.S., Kantor O.G. Areas of Uncertainty in the Mathematical Theory of Measurement Analysis. *Sistemy upravleniya i informatsionnyie tehnologii* = Control Systems and Information Technologies. 2014; 58(4):17-21. Available at: <http://www.sbook.ru/suit/CONTENTS/140400.pdf> (accessed 20.10.2019). (In Russ.)
19. Kantor I.G., Spivak S.I. Quality Estimation of the Chemical Kinetic Models. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN* = Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre. 2017; (2):11-17. Available at: <http://sciencerb.ru/#> (accessed 20.10.2019). (In Russ.)

Received 06.05.2019; revised 06.06.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Olga G. Kantor, Associate Professor of the Chair of Corporate Finance and Accounting Technologies, Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., Ufa 450062, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), ResearcherID: O-5136-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3186-3285>, ScopusID: 26767794600, o_kantor@mail.ru

Semen I. Spivak, Head of Chair of Mathematical Modeling, Bashkir State University (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, ResearcherID: B-9334-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0911-7446>, ScopusID: 16465463600, semen.spivak@mail.ru

Nikolay D. Morozkin, Rector of Bashkir State University (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, ResearcherID: D-2570-2019, ScopusID: 6603118906, rector@bsunet.ru

Contribution of the authors:

O. G. Kantor – formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, drawing conclusions; S. I. Spivak – scientific guidance, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions; N. D. Morozkin – correction of the literary analysis, revision of the text, correction of the conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.



Математическое моделирование основных классов стохастических продуктивных систем

А. А. Бутов*, М. А. Волков, В. Н. Голованов,
А. А. Коваленко, Б. М. Костишко, Л. М. Самойлов
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»
(г. Ульяновск, Россия)

*butov.a.a@gmail.com

Введение. В статье рассматриваются математические модели двух основных классов процессов в стохастических продуктивных системах. Для многостадийной системы определены условия принадлежности классу «точно в срок» или классу с бесконечным носителем функции распределения времени выполнения продуктивных операций.

Материалы и методы. Описания и исследования моделей осуществляются траекторными (мартингальными) методами. Для систем «точно в срок» и многостадийных стохастических продуктивных систем используются термины и методы процессов случайного блуждания в случайной среде и процессов размножения и гибели. Результаты сформулированы в описаниях характеристик интенсивностей компенсаторов точечных считающих процессов.

Результаты исследования. Приведены и доказаны две теоремы, обосновывающие предложенную классификацию математических моделей продуктивных систем. Даны критерии принадлежности стохастической продуктивной системы классу «точно в срок». Доказана теорема о несовместности групп систем «точно в срок» и систем с бесконечным носителем распределения времени выполнения операций.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты показывают целесообразность анализа стохастических продуктивных систем мартингальными методами. Описания в терминах интенсивностей компенсаторов продуктивных процессов допускают обобщения.

Ключевые слова: математическое моделирование, стохастическая продуктивная система, выполнение операций, система «точно в срок», мартингал, интенсивность, компенсатор

Для цитирования: Математическое моделирование основных классов стохастических продуктивных систем / А. А. Бутов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 496–509. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.496-509>



Mathematical Modeling of Main Classes of Stochastic Productive Systems

A. A. Butov*, M. A. Volkov, V. N. Golovanov, A. A. Kovalenko,
B. M. Kostishko, L. M. Samoilov

Ulyanovsk State University (Ulyanovsk, Russia)

*butov.a.a@gmail.com

Introduction. The article deals with mathematical models of two main classes of processes in stochastic productive systems. For a multistage system, conditions of belonging to a “just-in-time” class or a class with infinite support of the time distribution function for productive operations are determined.

Materials and Methods. Descriptions and investigations of models are carried out by trajectory (martingale) methods. For “just-in-time” systems and multistage stochastic productive systems, terms and methods of random walks in a random environment and birth and death processes are used. The results are formulated as descriptions of intensity characteristics of equalizers of point counting processes.

Results. Two theorems are given and proved; they justify the proposed classification of the mathematical models of productive systems. The criteria of the belonging of the stochastic productive system to the class “just-in-time” are given. A theorem on the incompatibility of groups of “just-in-time” systems and systems infinite support of the time distribution for operations is proved.

Discussion and Conclusion. The results show the feasibility of analyzing stochastic productive systems by martingale methods. The descriptions of terms of intensities of the equalizers time of productive processes admit generalization.

Keywords: mathematical modeling, stochastic productive system, performing operations, system “just-in-time”, martingale, intensity, compensator

For citation: Butov A.A., Volkov M.A., Golovanov V.N., et al. Mathematical Modeling of Main Classes of Stochastic Productive Systems. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):496-509. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.496-509>

Введение

В настоящей работе предлагается метод описания стохастических продуктивных систем и соответствующих процессов выполнения операций в достаточно общих случаях. В современном промышленном производстве, как и при высокотехнологичной организации сельскохозяйственного производства, наблюдается определенная общность подходов и методов организации продуктивных процессов, обусловленная возможностями планирования. Методами построения формальных математических моделей обосновывается простая классификация стохастических продуктивных систем и соответствующих процессов выполнения операций в достаточно общих случаях.

В работе решается проблема построения и исследования математической модели стохастической (то есть подверженной случайным возмущениям) продуктивной системы. Важнейшим частным случаем таких объектов является система выполнения операций «точно в срок». Возникший первоначально для задач промышленного производства, этот метод организации жизненного цикла распространился в последнее десятилетие на методы программирования, обучения и тренировок, лечения и многое другое. При этом остаются неразработанными и неисследованными математические модели, отвечающие задачам оптимального управления, планирования оценивания параметров и уровней ри-

сков. В задачах практической реализации таких систем ряд авторов создавал описания, сводящиеся к задачам логистики. Однако случайные возмущения (например, возврат «забракованных» операций разработки конструкторской документации на переработку, изменения в урожайностях или в скорости роста деревьев в лесоводстве, отклонения в интенсивностях выполнения операций и многое другое) авторы до настоящего времени пытались свести к простым аддитивным добавкам, как правило, с гауссовским законом распределения.

Темой исследования является построение в общих траекторных терминах такого математического описания, которое могло бы соответствовать принципу «точно в срок» и отклонениям от него. Также описание должно позволять разброс в интенсивности («скорости») выполнения операций с известными номерами и таким образом использовать метод случайной среды, которая и является набором этих интенсивностей. Описания, следовательно, должны опираться на разработанные авторами траекторные (известные также как мартингалные) методы построения моделей. Наряду с целью формирования модели, в работе необходимо решить следующие принципиальные задачи: определить условия, при которых система может являться «точно в срок» и решить задачу о возможности «совмещения» такого описания с моделью, не имеющей финитного носителя (когда с положительной вероятностью операции могут быть не выполнены за большое время). Эта последняя задача не является такой уж абстрактной, ведь, по существу, это иная формулировка проблемы о совместимости большинства теорий старения с теорией запрограммированной смерти.

Методы при построении и исследовании моделей использовались траекторные (мартингалные) в терминах точечных считающих процессов.

Обзор литературы

Аналізу продуктивних систем посвящено велике количество работ. В последние годы возрастает роль моделирования и различных описаний систем, подвергающихся случайным возмущениям, то есть стохастическим системам, которым и посвящена настоящая работа. Необходимо это, прежде всего, для задач управления, прогнозирования и оценивания параметров таких систем.

Прежде всего необходимо отметить, что используемый здесь термин «продуктивная система» не является устоявшимся в русскоязычной научной литературе, посвященной вопросам моделирования. Это объясняется тем, что он восходит к широко используемому в англоязычных источниках двум близким терминам: *production system* и *productive system*. Первый из них – *production system* – используется преимущественно для рассмотрения систем производства (систем мануфактуры), конструирования, технологических процессов, инженерных систем. Следует отметить (в качестве примеров стохастического описания моделей) работы, которые выполнили С. Пань и Ш. Ли [1], а также А. Фазлирад и Т. Фрайхайд [2]. При этом термин *production system*, как правило, сочетается со словами *inventory* или *manufacturing*. Второй англоязычный термин – *productive system* – имеет более широкое применение. Так, он, включая перечисленные объекты моделирования, используется еще и при анализе вопросов эффективности, сельскохозяйственных систем, в лесоводстве, при анализе критических состояний систем. Ц. Чжэнь [3] и С. Гупта [4] провели исследования, которые стали примерами стохастических описаний соответствующих систем. Стоит заметить, что все сказанное выше так же относится и к популярному современному объекту научных исследований «точно в срок», прообразом кото-

рог служит англоязычный термин *just in time* (*just-in-time*).

Перед тем как обсудить методы выполнения операций в продуктивных системах, организованных по принципу «точно в срок», укажем, что приведенные здесь (а также в иных моделях) случайные возмущения (стохастичность) рассматриваются как простые аддитивные (и, как правило, гауссовские) «добавки» к стандартным детерминистским описаниям. Такого рода описания доминируют, как хорошо известно, в анализе логистических задач (например, в транспортных задачах). Однако возмущения, присущие даже системам производства, не сводятся к логистическим проблемам. Продуктивные системы подвержены ограничениям на интенсивности выполнения операций, случайным явлениям возвращения на переработку и доработку, случайным отказам, стохастическим процедурам восстановления и многому другому. Также оказывается заведомо стохастическим описание прохождения многостадийных фаз жизненного цикла биологических объектов. Еще один подход, реализованный в упомянутых работах, сводится к описанию продуктивной системы как простой марковской цепи, что также далеко не всегда соответствует реальным объектам (и в силу отсутствия марковского свойства, и ввиду непрерывности времени выполнения операций).

Для того чтобы преодолеть указанные трудности моделирования, разрабатывались модели в траекторных терминах (называемых также мартингалными), в терминах точечных или считающих процессов. Необходимо отметить работу, выполненную А. А. Бутовым и А. А. Коваленко [5]. Эта работа построена на принципах, развитых А. А. Бутовым [6]. Упомянутые модели прохождения многостадийного жизненного цикла биологическими объектами разрабатывались А. А. Бутовым в соавторстве с рядом ученых [7; 8].

Описание и математическое моделирование систем «точно в срок», являющихся важнейшим классом продуктивных систем, восходят к основополагающим (но не «математизированным» и не вероятностным) работам Й. Сугимори и других [9], а также М. Йаявуза и Э. Ачкали [10]. Наряду с инженерными, производственными и технологическими системами, организованными по принципу «точно в срок», в последние годы возникли системы обучения «точно в срок», представленные в работе С. Килли, Э. Моррисона [11], в сфере программирования – в работе Т. Папе, К. Ф. Больца, Р. Хиршфельда [12].

Отметим, что представленные в настоящей работе описания позволяют математически формализовать известную проблему – существует ли в системе биологических объектов программируемое прохождение стадий жизненного цикла в форме программируемого старения и программируемой смерти. Работы на эту тему, как правило, носят описательный характер и плохо поддаются математическому моделированию. Укажем лишь отдельные из них, посвященные рассуждениям о программируемой смерти – Б. Т. Вайнерт и П. С. Тимирас [13], Дж. Миттельдорф [14; 15], М. В. Благодосклонный [16], А. Ковальд, Т. Б. Л. Кирквуд [17], Дж. Ван Раамсдонк [18]. При этом существенной особенностью рассматриваемых на основе терминологии процессов выполнения операций в продуктивной системе является многостадийность процессов, модели которой разработаны А. А. Бутовым и соавторами [19; 20]. Настоящая работа исходит из возможности описания многостадийных процессов выполнения операций в терминах случайных блужданий и процессов размножения и гибели, описанных в работах А. А. Бутова [6; 21], Л. С. Т. Хо [22] и П. Янга [23].

Материалы и методы

Рассмотрим модели продуктивных систем следующих двух типов:

(а) аperiodического производства за ограниченное время;

(б) аperiodического производства за время с неограниченным носителем функции распределения.

При этом как система (а), так и (б) могут допускать (I) циклическое производство, (II) непрерывное производство. Целью данной работы является обоснование выделения двух непересекающихся классов моделей: (а) и (б).

Математическим обоснованием данной классификации служат приведенные ниже теоремы. Представим формальное математическое описание стохастической модели выполнения операций. Работа выполнена в мартигальных терминах, траекторными методами.

Рассмотрим стохастический базис $\mathcal{B} = (\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{F} = (\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}, P)$ (то есть вероятностное пространство (Ω, \mathcal{F}, P) , снабженное неубывающим непрерывным справа потоком σ -алгебр $\mathcal{F} = (\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$, пополненным по мере P [5; 6; 21; 24]). На \mathcal{B} определим продуктивный процесс $X = (X_t)_{t \geq 0}$, заключающийся в выполнении конечного положительного и целого числа K операций. Траектории процесса X предполагаются регулярными (то есть непрерывными справа при $t \geq 0$ и имеющими предел слева при $t > 0$). В качестве процесса выполнения рассмотрим невозрастающий процесс случайного блуждания в случайной среде $\mathcal{E} = \{(\lambda_t(1))_{t \geq 0}, \dots, (\lambda_t(K-1))_{t \geq 0}\}$, где

неотрицательные случайные функции $\lambda_t(i)$ являются \mathcal{F}_0 -измеримыми при всех $i \geq 1$ и $t \geq 0$ [6]. Пусть случайная величина $X_t = X_t(\omega)$, $\omega \in \Omega$, является числом еще не выполненных операций продуктивного процесса $\forall t \geq 0$. Тогда для процесса случайного блуждания (рассматриваемого в качестве модели выполнения K операций) справедливы соотношения: $X_t \in \{0, 1, \dots, K\}$ при $t \geq 0$, $X_0 = K \in \{1, 2, \dots\}$ и $\Delta X_t = X_t - X_{t-} \in$

$\{-1, 0\}$ при $t > 0$ (где $X_{t-} = \lim_{s \rightarrow t-0} X_s$).

Процесс выполнения может быть представлен в виде:

$$X_t = K - A_t, \quad (1)$$

где $A_0 = 0$ и неубывающий процесс $A = (A_t)_{t \geq 0}$ равен $A_t = \sum_{0 < s \leq t} I\{\Delta X_s = -1\}$, где $I\{\cdot\}$ – индикаторная функция, то есть $I\{true\} = 1$, $I\{false\} = 0$. При последовательном выполнении процесс A является точечным считающим процессом и, следовательно, скачкообразным неубывающим субмартигалом со скачками $\Delta A_t \in \{0, I(1 \leq X_{t-})\}$. Следовательно, в разложении Дуба – Мейера для компенсатора \tilde{A} [6; 24] справедливо равенство:

$$\tilde{A}_t = \int_0^t a_s \cdot I\{1 \leq X_s\} ds, \quad (2)$$

где интенсивность скачков $a_t \geq 0$ определяется случайной средой \mathcal{E} :

$$a_t = \sum_{i=1}^K \lambda_t(i) \cdot I\{X_t = i\}. \quad (3)$$

На базисе \mathcal{B} для каждого последовательного номера $i \in \{K, K-1, \dots, 1\}$ марковский момент $\tau(i)$ является временем начала выполнения i -й операции: $\tau(K) = 0$ и для $i \in \{K-1, \dots, 1\}$:

$$\tau(i) = \inf\{t > \tau(i+1) : X_t = i\}. \quad (4)$$

Момент завершения всего продуктивного процесса $\tau(0)$ (несоответствующий началу выполнения операции) определяется аналогично:

$$\tau(0) = \inf\{t > \tau(1) : X_t = 0\}. \quad (5)$$

Для момента $\tau(0)$ также имеет место равенство $\tau(0) = \inf\{t > 0 : X_t = 0\}$.

Для марковских моментов $\tau(i)$ P – почти наверное (то есть с единичной вероятностью) справедливы неравенства:

$$\tau(K) < \tau(K-1) < \dots < \tau(1) < \tau(0). \quad (6)$$

Если $P\{\tau(0) < \infty\} = 1$, то процесс выполнения конечен. Тогда $\tau(i)$ – моменты остановки на \mathcal{B} . В этом случае при всех $x \in (-\infty, \infty)$ определена функция распределения $F_{\tau(0)}(x) = P\{\tau(0) \leq x\}$ и для всех $i \in \{K, \dots, 1\}$ – условные функции распределения $F_{\tau(i-1)}^{(i)}(x) = P\{\tau(i-1) \leq x | \mathcal{F}_{\tau(i)}\}$. Из (6) следует, что P – почти наверное для всех $i \in \{K, \dots, 1\}$ выполняются равенства:

$$F_{\tau(0)}(0) = F_{\tau(i-1)}^{(i)}(\tau(i)) = 0. \quad (7)$$

Заметим, что в случае $K > 1$, $F_{\tau(0)}(x)$ не совпадает со случайной функцией $F_{\tau(0)}^{(1)}(x)$, поскольку $F_{\tau(0)}^{(1)}(x) = 0$ при $x \leq \tau(1)$.

Определение

Конечный процесс выполнения $X = (X_t)_{t \geq 0}$ называется «точно в срок» (или процесс «точно в срок T »), если существует такое число $T \in (0, \infty)$, что:

$$P\{\tau(0) \leq T\} = 1 \text{ и } P\{\tau(0) > T - \varepsilon\} > 0 \quad \forall \varepsilon > 0. \quad (8)$$

В модели мы предполагаем, что распределение процесса X определяется случайной средой \mathcal{E} . Следовательно, случайные функции и $F_{\tau(i-1)}^{(i)}(x)$ при всех $i \in \{K, \dots, 1\}$ и функция распределения $F_{\tau(0)}(x)$ абсолютно непрерывны, то есть существуют плотности распределения моментов. Наряду с процессом X в модели рассмотрим вспомогательный процесс одного скачка $N = (N_t)_{t \geq 0}$ с $N_t = I\{X_t \geq 1\} = I\{t < \tau(0)\}$. Разложения Дуба – Мейера для N на стохастическом базисе $\mathcal{B}^N = (\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{F}^N = (\mathcal{F}_t^N)_{t \geq 0}, P)$ (с $\mathcal{F}_t^N = \sigma(N_s; s \leq t)$) по теореме Деллашери [24] имеют вид:

$$N_t = 1 - \int_0^t N_s \cdot \mu_s ds + m_t^N, \quad (9)$$

где

$$\mu_t = \frac{dF_{\tau(0)}(t)/dt}{(1 - F_{\tau(0)}(t))}, \quad (10)$$

а $(m_t^N)_{t \geq 0}$ – квадратично интегрируемый мартингал.

Результаты исследования

Предложение

Условие (8) «точно в срок T » для процесса X эквивалентно (11):

$$\int_0^t \mu_s ds < \infty \text{ при } t < T, \text{ и } \int_0^T \mu_s ds = \infty. \quad (11)$$

Доказательство

Как следует из (7) и (10),

$$\int_0^t \mu_s ds = \log(1 - F_{\tau(0)}(t)), \text{ что и доказы-}$$

вает (8).

Предложение доказано

$$\text{Обозначим } \varphi_t(i) = \int_0^t \lambda_s(i) ds \text{ и } \Phi(t) = \min_{1 \leq i \leq K} \{\varphi_t(i)\} \text{ при } \Phi(t) = \min_{1 \leq i \leq K} \{\varphi_t(i)\}.$$

Модель с финитным носителем процессов выполнения операций в случайной среде

Теорема 1 (критерий «точно в срок»)

Процесс X в случайной среде \mathcal{E} является «точно в срок T » тогда и только тогда, когда P – почти наверное выполняются условия (12) и (13):

$$\Phi(t) < \infty \text{ при } t < T, \quad (12)$$

$$\Phi(T) = \infty. \quad (13)$$

Доказательство

Аналогично $N = (N_t)_{t \geq 0}$ рассмотрим для всех номеров $i \in \{K, \dots, 1\}$ вспомогательные процессы $N(i) =$

$= (N_t(i))_{t \geq 0}$ с $N_t(i) = I\{X_t \geq i\} = I\{t < \tau(i-1)\}$
 на стохастических базисах $\bar{\mathcal{B}}^{(i)} =$
 $= (\Omega, \mathcal{F}, \bar{F}^{(i)} = (\bar{F}_t^{(i)})_{t \geq 0}, P)$ с $\bar{F}_t^{(i)} =$
 $= \sigma\{\tau(i), (N_s(i); s \leq t)\}$. Разложения Дуба –
 Мейера процессов $N(i)$ на $\bar{\mathcal{B}}^{(i)}$ имеют
 вид:

$$N_t(i) = 1 - \int_0^t N_s(i) \cdot \bar{\mu}_s(i) ds + m_t^{N(i)}, \quad (14)$$

где при всех $i \in \{K, \dots, 1\}$:

$$\bar{\mu}_t(i) = \frac{dF_{\tau(i-1)}^{(i)}(t)/dt}{(1 - F_{\tau(i-1)}^{(i)}(t))},$$

а $(m_t^{N(i)})_{t \geq 0}$ – соответствующие ква-
 дратично интегрируемые мартингалы.
 Отметим, что в случае $K > 1$, $\mathcal{B}^N \uparrow \bar{\mathcal{B}}^{(1)}$,
 поскольку $\mathcal{F}_t^N \uparrow \bar{\mathcal{F}}_t^{(1)}$. Поэтому $\mu_t \neq \bar{\mu}_t(1)$.
 Из (1), (2), (3) и (12) получаем, что при
 всех $i \in \{K, \dots, 1\}$:

$$\bar{\mu}_t(i) = \lambda_t(i) \cdot I\{X_t = i\}. \quad (15)$$

Покажем достаточность условий
 теоремы. Из (6) и (13) следует, что для
 каждого номера $i \in \{K, \dots, 1\}$ P – почти
 наверное выполняется соотношение

$$\lim_{t \rightarrow T} \{\varphi_t(i) - \varphi_{\tau(i)}(i)\} = \infty. \quad (16)$$

Пусть $v_t(i) = E\{N_t(i) | \mathcal{F}_{\tau(i)}\}$ – услов-
 ное математическое ожидание $N_t(i)$.
 Тогда из (14) и (15) следует, что при
 $t \leq \tau(i)$ $v_t(i) = 1$ и при $t \in (\tau(i), T)$:

$$v_t(i) = 1 - \int_{\tau(i)}^t v_s(i) \cdot \lambda_s(i) ds. \quad (17)$$

Решением (17) является случайный
 процесс:

$$v_t(i) = I\{t > \tau(i)\} \cdot \exp\{-(\varphi_t(i) - \varphi_{\tau(i)}(i))\}. \quad (18)$$

Из чего следует, что $v_T(i) =$
 $= \lim_{t \rightarrow T} \exp\{-(\varphi_t(i) - \varphi_{\tau(i)}(i))\} P$ – по-
 чти наверное. Из (16) получаем, что
 для всех $i \in \{K, \dots, 1\}$ $v_T(i) = 0$ P – по-
 чти наверное, откуда и получаем, что
 $P\{X_T \geq 1\} = P\{N_T \geq 1\} = N_T = E\{N_T(1)\} = 0$.
 Из (6), (12) и (18) также получаем, что
 $N_t > 0$ при любых $t < T$. Достаточность
 доказана. Покажем необходимость ус-
 ловий теоремы. Условие (12) очеви-
 дно необходимо (в противном случае
 из (18) следовало бы, что $P\{X_u = 0\} =$
 $I\{true\} = 1$ при каком-то значении $u < T$).
 Доказательство необходимости (13)
 проводится от противного. Опреде-
 лим для каждого номера $i \in \{K, \dots, 1\}$
 и для каждого числа $n \geq 1$ множество

$$\Gamma^n(i) = \left\{ \omega \in \Omega : \int_0^T \lambda_s(i) ds \leq n \right\}. \quad \text{Заметим,}$$

что $\Gamma^n(i) \in \mathcal{F}_0$. Если (13) не выполнено,
 то существуют такой номер $i \in \{K, \dots, 1\}$
 и конечное число n , что $P\{\Gamma^n(i)\} > 0$.
 Рассмотрим процесс $\bar{X} = (\bar{X}_t)_{t \geq 0}$
 с $\bar{X}_t = X_t \cdot I\{\Gamma^n(i)\}$, а также $x_t = E\{X_t | \mathcal{F}_{\tau(i)}\}$.
 Из (18) получаем, что $x_T(i) =$
 $= i \cdot I\{\Gamma^n(i)\} \cdot \lim_{t \rightarrow T} \exp\{-(\varphi_t(i) - \varphi_{\tau(i)}(i))\} \geq$
 $\geq I\{\Gamma^n(i)\} \cdot \exp\{-n\} > 0$, что противоре-
 чит (8), поскольку на множестве $\Gamma^n(i)$
 значения X_T и \bar{X}_T совпадают. *Теорема*
доказана.

Несовместность моделей

Рассмотрим семейство моделей
 с процессами выполнения операций
 $X(T) = (X_t(T))_{t \geq 0}$ «точно в срок T ».
 Пусть время $T = T(\omega)$, $\omega \in \Omega$, является
 строго положительной \mathcal{F}_0 -измеримой
 случайной величиной. Возникает во-
 прос, существует ли такое распределе-
 ние моментов времени T , с некоторой
 плотностью $\rho(t) = \rho_T(t)$, $t \geq 0$, что ре-
 зультующая модель соответствует

процессу с плотностью вероятности моментов завершения выполнения операций, обладающей бесконечным носителем (а не финитным, как в случае с «точно в срок»)? Например, могут ли моменты смерти в гипотезе программируемой смерти быть так распределены, чтобы результирующая кривая дожития соответствовала схеме Гомпертца или ее аналогам? В рассмотрении мы предполагаем, что определяемая в (10) функция $\mu_t = \mu_t(T)$ отвечает «точно в срок T ». Не ограничивая общности мы предполагаем, что переходная функция – плотность вероятности $\rho(t)$ – является гладкой функцией. Заметим, что результирующему процессу $X(T)$ соответствуют момент завершения $\zeta(0) = \inf\{t > 0 : X_t(T) = 0\}$ аналогично $\tau(0)$ в схеме (4) – (5). Для него определим процесс одного скачка $N(T) = (N_t(T))_{t \geq 0}$ с $N_t = I\{X_t(T) \geq 1\} = I\{t < \zeta(0)\}$. Разложения Дуба – Мейера для $N(T)$ на стохастическом базисе $\mathcal{B}^{N(T)} = (\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{F}^{N(T)} = (\mathcal{F}_t^{N(T)})_{t \geq 0}, P)$ (с $\mathcal{F}_t^{N(T)} = \sigma(N_s(T); s \leq t)$) аналогично (9) – (10):

$$N_t(T) = 1 - \int_0^t N_s(T) \cdot h_s ds + \bar{m}_t^{N(T)},$$

$$h_t = \frac{dF_{\zeta(0)}(t)/dt}{(1 - F_{\zeta(0)}(t))},$$

а $(\bar{m}_t^{N(T)})_{t \geq 0}$ – квадратично интегрируемый мартингал на $\mathcal{B}^{N(T)}$. Таким образом, задача сводится к вопросу о существовании $\rho(t)$ такой, что конечная функция h_t интегрируема на любом конечном интервале.

Теорема 2 (о несовместности моделей)

Не существует гладкой функции плотности $\rho(t)$ с финитным носителем такой, чтобы функция h_t была интегрируема на любом конечном интервале $[0, u]$ с $0 < u < \infty$.

Доказательство

Покажем справедливость утверждения от противного. Пусть при любом значении $s, s > 0$ момента $T = T(\omega), \omega \in \Omega$, модель отвечает условию (8) «точно в срок s ». Следовательно, выполняются соотношения (11) $\forall s, s > 0$:

$$\int_0^s \mu_t(s) dt = \infty. \tag{19}$$

Из того, что функция плотности распределения $\rho(s)$ гладкая, следует, что существуют числа r и u такие, что $0 \leq r < u < \infty$ и для некоторого $\varepsilon > 0$ выполняется $\rho(s) \geq \varepsilon$ при всех $s \in [r, u]$. Тогда:

$$h_t = \int_0^\infty \rho(s) \cdot \mu_t(s) ds \geq \varepsilon \cdot \int_r^u \mu_t(s) \cdot I\{t < s\} ds. \tag{20}$$

Из (20) следует, что при любом $u > 0$,

$$\int_0^u h_t dt \geq \int_0^u \left(\int_r^u \varepsilon \cdot \mu_t(s) \cdot I\{t < s\} ds \right) dt =$$

$$= \int_0^u \int_0^u \varepsilon \cdot I\{r < s\} \cdot \mu_t(s) \cdot I\{t < s\} ds dt.$$

Меняем порядок интегрирования и получаем из (19) неравенство:

$$\int_0^u h_t dt \geq \varepsilon \cdot \int_r^u \left(\int_0^u I\{t < s\} \cdot \mu_t(s) dt \right) ds =$$

$$= \varepsilon \cdot \int_r^u \left(\int_0^s \mu_t(s) dt \right) ds = \infty,$$

что противоречит предположению об интегрируемости h_t на $[0, u]$.

Теорема доказана

Обсуждение и заключение

В работе дано общее определение систем «точно в срок» общего вида. В *Предложении* и *Теореме 1* сформулированы условия принадлежности продуктивных систем классу «точно в срок». Как показано в *Теореме 2*, модели таких систем оказываются в определенном смысле несовместными с моделями систем с бесконечными носителями распределения моментов завершения процессов выполнения операций. В частности, модели для процессов с заведомо сезонным режимом выполнения (например, в зерноводстве) несовместимы с моделями с потенциально сколько угодно долго живущими объектами (например, в лесоводстве). Заметим, что также несовместны модели программируемого старения в геронтологии с моделями износа (например, Гомпертца – Мейкхама).

Предлагаемый метод математического описания и исследования достаточно легко может быть распространен на общий случай процессов случайного блуждания в случайной среде (в том числе для процессов размножения и гибели).

В ряде случаев также целесообразно рассматривать $X = (X_t)_{t \geq 0}$ как процесс размножения и гибели в детерминированной среде [21–23]. Для процесса выполнения значения $X_t \in \{0, 1, 2, \dots\}$ при $t \geq 0$, $X_0 = K \in \{1, 2, \dots\}$ и $\Delta X_t = X_t - X_{t-} \in \{-1, 0, 1\}$ при $t > 0$. Тогда, вместо (1) имеем:

$$X_t = K - A_t + B_t, \quad (21)$$

где $A_0 = B_0 = 0$ и неубывающие процессы $A = (A_t)_{t \geq 0}$ и $B = (B_t)_{t \geq 0}$ равны $A_t = \sum_{0 < s \leq t} I\{\Delta X_s = -1\} \cdot I\{X_{s-} \geq 1\}$ и $B_t = \sum_{0 < s \leq t} I\{\Delta X_s = 1\}$. Компенсаторы

субмартингалов A и B , аналогично (2), представим как:

$$\tilde{A}_t = \int_0^t a_s \cdot I\{1 \leq X_s\} ds, \quad \tilde{B}_t = \int_0^t b_s \cdot I\{1 \leq X_s\} ds. \quad (22)$$

Интенсивности скачков $a_t \geq 0$ и $b_t \geq 0$ для процессов размножения и гибели в общем детерминированном случае определяются равенствами (27):

$$a_s = \alpha(s) \cdot X_s + \eta(s) \cdot I\{1 \leq X_s\}, \quad (23)$$

$$b_s = \beta(s) \cdot X_s + \gamma(s) \cdot I\{1 \leq X_s\}. \quad (24)$$

Тогда выполнение (8) в требовании «точно в срок T » определяется решением уравнения (29) для математического ожидания $R_t(i) = E\{X_t\}$:

$$R_t = K + \int_0^t (\beta_s - \alpha_s) \cdot R_s ds + \int_0^t (\gamma_s - \eta_s) \cdot P\{1 \leq X_s\} ds. \quad (25)$$

При этом, как следует из *Предложения* и *Теоремы 1*, даже в скалярном случае функция α_s (а также в отдельных случаях β_s) не интегрируема. Для (21), (22), (23) и (24), как и для уравнения (25), естественно, актуальны многомерные обобщения, что представимо в форме линейного операторного уравнения (см. [25]). Определение условий существования и единственности неотрицательного решения линейного интегрального уравнения в настоящее время остается актуальной задачей, поскольку представления условий в терминах собственных значений операторов в соответствующих Банаховых пространствах [25] даже в простых (в том числе скалярных) случаях харак-

теризуют траекторное поведение функций $\alpha_s, \beta_s, \gamma_s$ и η_s опосредованно.

Полезными и интересными представляются дальнейшие исследования

и для управляемых продуктивных систем, в том числе для управляемых процессов случайного блуждания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Pan X., Li Sh.** Optimal Control of a Stochastic Production–Inventory System under Deteriorating Items and Environmental Constraints // International Journal of Production Research. 2015. Vol. 53, Issue 2. Pp. 607–628. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.961201>
2. **Fazlirad A., Freiheit T.** Application of Model Predictive Control to Control Transient Behavior in Stochastic Manufacturing System Models // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2016. Vol. 138, Issue 8. Article 081007. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4031497>
3. Stochastic Frontier Analysis of Productive Efficiency in China's Forestry Industry / J. Chen [et al.] // Journal of Forest Economics. 2017. Vol. 28, Issue 1. Pp. 87–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.05.005>
4. **Gupta S.** Stochastic Modelling and Availability Analysis of a Critical Engineering System // International Journal of Quality & Reliability Management. 2019. Vol. 36, Issue 5. Pp. 782–796. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2018-0167>
5. **Butov A. A., Kovalenko A. A.** Stochastic Models of Simple Controlled Systems Just-in-Time // Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences. 2018. Vol. 22, no. 3. Pp. 518–531. DOI: <http://doi.org/10.14498/vsgtu1633>
6. **Butov A. A.** Random Walks in Random Environments of a General Type // Stochastics and Stochastics Reports. 1994. Vol. 48, Issue 3–4. Pp. 145–160. DOI: <https://doi.org/10.1080/17442509408833904>
7. **Бутов А. А., Шабалин А. С., Коваленко А. А.** Математическая модель многостадийного старения адаптивных систем // Фундаментальные исследования. 2015. № 9. С. 219–222. URL: <http://www.fundamental-research.ru/pdf/2015/9-2/39077.pdf> (дата обращения: 06.11.2019).
8. **Бутов А. А., Шабалин А. С., Чибрикова Т. С.** Математическая модель многостадийного старения с восстановлением // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2018. № 1. С. 34–37. URL: https://www.ulsu.ru/media/uploads/anako09%40mail.ru/2018/06/13/ButovAA_Shabalinas_ChibrikovaTS.pdf (дата обращения: 06.11.2019).
9. **Sugimori Y., Kusunoki K., Cho F., Uchikawa S.** Toyota Production System and Kanban System Materialization of Just-in-Time and Respect-for-Human System // International Journal of Production Research. 1977. Vol. 15, Issue 6. Pp. 553–564. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207547708943149>
10. **Yavuz M., Akcali E.** Production Smoothing in Just-in-Time Manufacturing Systems: A Review of the Models and Solution Approaches // International Journal of Production Research. 2007. Vol. 45, Issue 16. Pp. 3579–3597. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540701223410>
11. **Killi S., Morrison A.** Just-in-time Teaching, Just-in-Need Learning: Designing towards Optimized Pedagogical Outcomes // Universal Journal of Educational Research. 2015. Vol. 3, Issue 10. Pp. 742–750. DOI: <https://doi.org/10.13189/ujer.2015.031013>
12. **Pape T., Bolz C. F., Hirschfeld R.** Adaptive Just-in-Time Value Class Optimization for Lowering Memory Consumption and Improving Execution Time Performance // Science of Computer Programming. 2017. Vol. 140. Pp. 17–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scico.2016.08.003>
13. **Weinert B. T., Timiras P. S.** Invited Review: Theories of Aging // Journal of Applied Physiology. 2003. Vol. 95, Issue 4. Pp. 1706–1716. DOI: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00288.2003>
14. **Mitteldorf J.** Programmed and Non-Programmed Theories of Aging // Russian Journal of General Chemistry. 2010. Vol. 80, no. 7. Pp. 1465–1475. DOI: <https://doi.org/10.1134/S107036321007042X>
15. **Mitteldorf J.** Can Aging Be Programmed? // Biochemistry (Moscow). 2018. Vol. 83, no. 12. Pp. 1524–1533. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006297918120106>

16. **Blagosklonny M. V.** Aging Is not Programmed Genetic Pseudo-Program Is a Shadow of Developmental Growth // Cell Cycle. 2013. Vol. 12, Issue 24. Pp. 3736–3742. DOI: <https://doi.org/10.4161/cc.27188>
17. **Kowald A., Kirkwood T. B. L.** Can Aging Be Programmed? A Critical Literature Review // Aging Cell. 2016. Vol. 15, Issue 6. Pp. 986–998. DOI: <https://doi.org/10.1111/acel.12510>
18. **Van Raamsdonk J. M.** Mechanisms Underlying Longevity: A Genetic Switch Model of Aging // Experimental Gerontology. 2018. Vol. 107. Pp. 136–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exger.2017.08.005>
19. **Butov A. A., Shabalin A. S.** Stochastic Simulation Model for Matching the Ages of Laboratory Animals (Mammals) and Humans // Advances in Gerontology. 2016. Vol. 6, Issue 2. Pp. 88–90. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079057016020028>
20. **Бутов А. А., Коваленко А. А., Шабалин А. С.** Математическая модель изменений в компенсации износа при старении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 4. С. 14–17. URL: <https://applied-research.ru/pdf/2018/4/12175.pdf> (дата обращения: 06.11.2019)
21. **Butov A. A.** On the Problem of Optimal Instant Observations of the Linear Birth and Death Process // Statistics and Probability Letters. 2015. Vol. 101. Pp. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spl.2015.02.021>
22. Birth/Birth-Death Processes and Their Computable Transition Probabilities with Biological Applications / L. S. T. Ho [et al.] // Journal of Mathematical Biology. 2018. Vol. 76, Issue 4. Pp. 911–944. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00285-017-1160-3>
23. A Birth and Death Process Model with Blocking Growth and Its Numerical Simulation Research / P. Yang [et al.] // Advances in Intelligent Systems Research (AISR). Proceedings of 3rd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2018). 2018. Vol. 160. Pp. 16–19. DOI: <https://doi.org/10.2991/msam-18.2018.4>
24. **Dellacherie C.** Capacites et Processus Stochastiques. Berlin, Heidelberg: Springer, 1972. 155 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59107-9>
25. **Jang R.-J., Victory Jr H. D.** On Nonnegative Solvability of Linear Integral Equations // Linear Algebra and its Applications. 1992. Vol. 165. Pp. 197–228. DOI: [https://doi.org/10.1016/0024-3795\(92\)90238-6](https://doi.org/10.1016/0024-3795(92)90238-6)

Поступила 01.08.2019; принята к публикации 15.10.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Бутов Александр Александрович, заведующий кафедрой прикладной математики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID: E-4654-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8322-9892>, butov.a.a@gmail.com

Волков Максим Анатольевич, декан факультета математики, информационных и авиационных технологий ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42), кандидат физико-математических наук, доцент, ResearcherID: A-9869-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5780-5155>, volkovmax1977@gmail.com

Голованов Виктор Николаевич, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42), доктор физико-математических наук, профессор, PublonsID: <https://publons.com/researcher/2927643/viktor-golovanov/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5023-4727>, golovanov_vn@mail.ru

Коваленко Анатолий Александрович, аспирант кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42), ResearcherID: N-5877-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3820-9785>, anako09@mail.ru

Костишко Борис Михайлович, ректор ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID: J-8125-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0041-2753>, kost@ulsu.ru

Самойлов Леонид Михайлович, профессор кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42), доктор физико-математических наук, доцент, ResearcherID: N-6040-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8464-4628>, samoilov_l@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Бутов – математическое описание моделей, формулирование выводов; М. А. Волков – анализ научных источников по теме исследования, анализ и доработка текста; В. Н. Голованов – формулирование задач, анализ методов исследования; А. А. Коваленко – проведение математических исследований, доработка и верстка текста; Б. М. Костишко – формулирование основной концепции исследования, обсуждение результатов; Л. М. Самойлов – анализ детерминистских алгебраических методов исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Pan X., Li Sh. Optimal Control of a Stochastic Production–Inventory System under Deteriorating Items and Environmental Constraints. *International Journal of Production Research*. 2015; 53(2):607-628. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.961201>
2. Fazlirad A., Freiheit T. Application of Model Predictive Control to Control Transient Behavior in Stochastic Manufacturing System Models. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2016; 138(8):081007. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4031497>
3. Chen J., Wu Y., Song M., et al. Stochastic Frontier Analysis of Productive Efficiency in China's Forestry Industry. *Journal of Forest Economics*. 2017; 28(1):87-95. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.05.005>
4. Gupta S. Stochastic Modelling and Availability Analysis of a Critical Engineering System. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2019; 36(5):782-796. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2018-0167>
5. Butov A.A., Kovalenko A.A. Stochastic Models of Simple Controlled Systems Just-in-Time. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Fiziko-matematicheskie nauki"* = Journal of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences. 2018; 22(3):518-531. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.14498/vsgtu1633>
6. Butov A.A. Random Walks in Random Environments of a General Type. *Stochastics and Stochastics Reports*. 1994; 48(3-4):145-160. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/17442509408833904>
7. Butov A.A., Shabalin A.S., Kovalenko A.A. Mathematical Model of Multistage Aging in Adaptive Systems. *Fundamentalnyie issledovaniya* = Fundamental Research. 2015; (9):219-222. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/pdf/2015/9-2/39077.pdf> (accessed 06.11.2019). (In Russ.)
8. Butov A.A., Shabalin A.S., Chibrikova T.S. The Mathematical Model of Multi-Stage Aging with Recovery. *Uchenyie zapiski UIGU. Ser. Matematika i informatsionnyie tehnologii*. UIGU = Scientists Notes of the Ulyanovsk State University. Series: Mathematics and Information Technologies. 2018; (1):34-37. Available at: https://www.ulsu.ru/media/uploads/anako09%40mail.ru/2018/06/13/ButovAA_ShabalinAS_ChibrikovaTS.pdf (accessed 06.11.2019). (In Russ.)
9. Sugimori Y., Kusunoki K., Cho F., Uchikawa S. Toyota Production System and Kanban System Materialization of Just-in-Time and Respect-for-Human System. *International Journal of Production Research*. 1977; 15(6):553-564. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00207547708943149>
10. Yavuz M., Akcali E. Production Smoothing in Just-in-Time Manufacturing Systems: A Review of the Models and Solution Approaches. *International Journal of Production Research*. 2007; 45(16):3579-3597. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540701223410>
11. Killi S., Morrison A. Just-in-Time Teaching, Just-in-Need Learning: Designing towards Optimized Pedagogical Outcomes. *Universal Journal of Educational Research*. 2015; 3(10):742-750. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13189/ujer.2015.031013>
12. Pape T., Bolz C.F., Hirschfeld R. Adaptive Just-in-Time Value Class Optimization for Lowering Memory Consumption and Improving Execution Time Performance. *Science of Computer Programming*. 2017; 140:17-29. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scico.2016.08.003>

13. Weinert B.T., Timiras P.S. Invited Review: Theories of Aging. *Journal of Applied Physiology*. 2003; 95(4):1706-1716. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00288.2003>
14. Mitteldorf J. Programmed and Non-Programmed Theories of Aging. *Russian Journal of General Chemistry*. 2010; 80(7):1465-1475. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S107036321007042X>
15. Mitteldorf J. Can Aging Be Programmed? *Biochemistry (Moscow)*. 2018; 83(12):1524-1533. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006297918120106>
16. Blagosklonny M.V. Aging Is not Programmed Genetic Pseudo-Program Is a Shadow of Developmental Growth. *Cell Cycle*. 2013; 12(24):3736-3742. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4161/cc.27188>
17. Kowald A., Kirkwood T.B.L. Can Aging Be Programmed? A Critical Literature Review. *Aging Cell*. 2016; 15(6):986-998. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/accel.12510>
18. Van Raamsdonk J.M. Mechanisms Underlying Longevity: A Genetic Switch Model of Aging. *Experimental Gerontology*. 2018; 107:136-139. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exger.2017.08.005>
19. Butov A.A., Shabalin A.S. Stochastic Simulation Model for Matching the Ages of Laboratory Animals (Mammals) and Humans. *Advances in Gerontology*. 2016; 6(2):88-90. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079057016020028>
20. Butov A.A., Kovalenko A.A., Shabalin A.S. Mathematical Model of Changes in the Wear of Aging. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018; (4):14-17. Available at: <https://applied-research.ru/pdf/2018/4/12175.pdf> (accessed 06.11.2019). (In Russ.)
21. Butov A.A. On the Problem of Optimal Instant Observations of the Linear Birth and Death Processes. *Statistics and Probability Letters*. 2015; 101:49-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spl.2015.02.021>
22. Ho L.S.T., Xu J., Crawford F.W., et al. Birth/Birth-Death Processes and Their Computable Transition Probabilities with Biological Applications. *Journal of Mathematical Biology*. 2018; 76(4):911-944. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00285-017-1160-3>
23. Yang P., Liu H., W. Yumei, et al. A Birth and Death Process Model with Blocking Growth and Its Numerical Simulation Research. *Advances in Intelligent Systems Research (AISR)*. Proceedings of 3rd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2018). 2018; 160:16-19. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/msam-18.2018.4>
24. Dellacherie C. *Capacites et Processus Stochastiques*. Berlin, Heidelberg: Springer; 1972. 155 p. (In Fr.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59107-9>
25. Jang R.-J., Victory Jr H.D. On Nonnegative Solvability of Linear Integral Equations. *Linear Algebra and its Applications*. 1992; 165:197-228. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0024-3795\(92\)90238-6](https://doi.org/10.1016/0024-3795(92)90238-6)

Received 01.08.2019; revised 15.10.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Alexander A. Butov, Head of Chair of Applied Mathematics, Ulyanovsk State University (42 Lev Tolstoy St., Ulyanovsk 432017, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, ResearcherID: E-4654-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8322-9892>, butov.a.a@gmail.com

Maxim A. Volkov, Dean of Faculty of Mathematics, Information and Aviation Technology, Ulyanovsk State University (42 Lev Tolstoy St., Ulyanovsk 432017, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ResearcherID: A-9869-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5780-5155>, volkovmax1977@gmail.com

Viktor N. Golovanov, Vice Rector for Research, Ulyanovsk State University (42 Lev Tolstoy St., Ulyanovsk 432017, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, PublonsID: <https://publons.com/researcher/2927643/viktor-golovanov/>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5023-4727>, golovanov_vn@mail.ru

Anatoly A. Kovalenko, Postgraduate Student of Chair of Applied Mathematics, Ulyanovsk State University (42 Lev Tolstoy St., Ulyanovsk 432017, Russia), ResearcherID: N-5877-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3820-9785>, anako09@mail.ru

Boris M. Kostishko, Rector of Ulyanovsk State University (42 Lev Tolstoy St., Ulyanovsk 432017, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, ResearcherID: J-8125-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0041-2753>, kost@ulsu.ru

Leonid M. Samoilov, Professor of Chair of Applied Mathematics, Ulyanovsk State University (42 Lev Tolstoy St., Ulyanovsk 432017, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ResearcherID: N-6040-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8464-4628>, samoilov_l@rambler.ru

Contribution of the authors:

A. A. Butov – mathematical descriptions of the models, drawing the conclusions; M. A. Volkov – reviewing the relevant literature, analyzing and finalizing the text; V. N. Golovanov – formulation of the problems, analysis of research methodology; A. A. Kovalenko – mathematical investigations, word processing, editing the text; B. M. Kostishko – formulation of the basic concept of investigations, discussion of the results; L. M. Samoilov – analysis of algebraic deterministic methods of investigations.

All authors have read and approved the final manuscript.



Прогнозная оценка численности докторов и кандидатов наук в России

В. А. Гуртов¹, Л. В. Щеголева^{1*}, С. И. Пахомов²

¹ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (г. Петрозаводск, Россия)

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва, Россия)

*schegoleva@petrsu.ru

Введение. Кадры высшей научной квалификации являются основой в кадровом обеспечении для конкурентоспособного развития всех отраслей национальной экономики Российской Федерации. В то же время в стране отсутствует достоверная статистическая информация как об общем числе кандидатов и докторов наук, так и об их возрастной структуре. В научных публикациях не представлены подходы к построению оценок численности лиц с учеными степенями.

Материалы и методы. В статье предлагается модель для повозрастного расчета количества кандидатов и докторов наук на основе ежегодных статистических данных о числе защит кандидатских и докторских диссертаций и коэффициентов дожития. Так как детализированные данные представлены только для периода с 2008 года, а агрегированные данные известны не для всех лет, то для восстановления отсутствующих данных предложены соответствующие методы интерполяции. По предложенным моделям выполнены расчеты оценок численности кандидатов и докторов наук, построены аппроксимирующие функции. Результаты расчетов были верифицированы на основе данных статистики о количестве исследователей со степенью кандидата и доктора наук в разных секторах экономики и количестве кандидатов и докторов наук в числе профессорско-преподавательского состава вузов.

Результаты исследования. Результатами исследования стали 6 моделей для повозрастного расчета количества кандидатов и докторов наук, аппроксимирующая функция мультипликативного коэффициента дожития для лиц с учеными степенями, аппроксимирующие функции долевого распределения возрастов защитившихся кандидатов и докторов наук, аппроксимирующие функции повозрастного и кумулятивного распределения количества кандидатов и докторов наук, а также количественные оценки численности кандидатов и докторов наук на 2019 год.

Обсуждение и заключение. Предложенные модели показали свою адекватность. Были получены оценки численности кандидатов наук в возрастных категориях 20–80 лет – 468 тыс. человек; докторов наук в возрастных категориях 30–90 лет – 72 тыс. человек. Построенные аппроксимирующие функции позволяют получить число кандидатов и докторов наук в любом возрастном диапазоне. Поскольку система кадров высшей научной квалификации достаточно инертная, то полученная возрастная структура кадров высшей научной квалификации сохранит свой характер еще на протяжении как минимум 10 лет. Полученные оценки численности лиц с учеными степенями позволяют охарактеризовать кадровый потенциал для принятия решений в сфере управления высокотехнологичными секторами экономики. Построенные модели могут быть использованы для решения задач прогнозирования в сфере развития наукоемких технологий и в сфере высшего образования для подготовки высококвалифицированных кадров и пополнения научного сообщества.

© Гуртов В. А., Щеголева Л. В., Пахомов С. 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: ученая степень, кандидат наук, динамическая модель, возрастная структура, аппроксимирующая функция, статистические данные, кадры высшей научной квалификации, защита диссертации

Для цитирования: Гуртов В. А., Щеголева Л. В., Пахомов С. И. Прогнозная оценка численности докторов и кандидатов наук в России // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 510–528. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.510-528>

Forecast of the Number of Doctorate Holders in Russia

V. A. Gurtov^a, L. V. Shchegoleva^{a*}, S. I. Pakhomov^b

^a*Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russia)*

^b*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)(Moscow, Russia)*

**schegoleva@petsu.ru*

Introduction. Personnel of the highest scientific qualification are the basis of staffing the competitive development all sectors of the national economy of the Russian Federation. At the same time, there is no reliable statistical information about the total number of Candidates and Doctors of Sciences and their age structure. Scientific publications do not present approaches to carry out the estimate of the number of persons with scientific degrees.

Materials and Methods. The article proposes a model for calculating the age-specific number of Candidates and Doctors of Sciences on the basis of annual statistical data on the number of defenses of candidate and doctoral theses and survival rates. Since the detailed data are presented only for the period starting from 2008, and the aggregated data are not known for all years, the corresponding interpolation methods are proposed to restore the missing data. According to the proposed models, calculations of estimates of the number of Candidates and Doctors of Sciences are made, approximation functions are constructed. The results of the calculations were verified on the basis of statistical data on the number of researchers with a degree of Candidate and Doctor of Sciences in different sectors of the economy and the number of Candidates and Doctors of Sciences among the teaching staff of universities.

Results. The results of the study are 6 models for calculating the number of Candidates and Doctors of Sciences, approximation function of the multiplicative survival coefficient for persons with scientific degrees, approximation functions of the age distribution of the applicants of degrees of Candidate and Doctor of Science, approximation functions of age-related and cumulative distribution of the number of Candidates and Doctors of Sciences, quantitative estimates of the number of Candidates and Doctors of Sciences in 2019.

Discussion and Conclusion. The proposed models have shown their adequacy. As a result of the calculations, it was found that the number of Candidates of Sciences in the age category of 20–80 years is 468,000 people, and the number of Doctors of Sciences in the age category of 30–90 years is 72,000 people. According to the obtained numerical values, approximating functions were constructed to get the number of Candidates and Doctors of Sciences in any age range. Since the system of personnel of the highest scientific qualification is sufficiently inert, the data obtained of age structure of the personnel of the highest scientific qualification will retain its character for at least another 10 years. The obtained estimates of the number of persons with scientific degrees allow us to characterize the personnel potential for decision-making in the management of high-tech sectors of the economy. The constructed models can be used to solve the problems of forecasting in the field of development of science-intensive technologies and in higher education for the training of highly qualified scientific personnel and replenishment of the scientific community.

Keywords: academic degree, Candidate of Sciences, dynamic model, age structure, approximating function, statistical data, highly qualified staff, thesis defense

For citation: Gurtov V.A., Shchegoleva L.V., Pakhomov S.I. Forecast of the Number of Doctorate Holders in Russia. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):510-528. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.510-528>

Введение

Кадры высшей научной квалификации (ВНК) являются основой в кадровом обеспечении для конкурентоспособного развития всех отраслей национальной экономики Российской Федерации [1]. В то же время в стране отсутствует достоверная статистическая информация как об общем числе кандидатов и докторов наук, так и об их возрастном статусе. Существуют лишь отдельные, иногда пересекающиеся срезы количественных характеристик научного сообщества. Среди них статистические данные о количестве кандидатов и докторов наук в составе исследователей¹, в числе профессорско-преподавательского состава (ППС)², о количестве соискателей ученых степеней, защитивших кандидатские и докторские диссертации³, о количестве лиц, обучающихся в аспирантуре⁴. При этом оценка общей численности кандидатов и докторов наук и их возрастного статуса необходима для прогнозирования и управления не только в области образования и науки, но и в сфере инновационного развития экономики государства, технологического прорыва и достойного ответа на современные вызовы человеческого общества.

Обзор литературы

В научной литературе количественные характеристики кадров ВНК

представлены фрагментарно как в советском, так и в постсоветском периоде. Наибольшая детализация выполнена для кадров ВНК, работавших в сфере науки. В 1973 году вышла книга под редакцией Д. М. Гвишиани⁵, посвященная исследованию структуры, динамики и мобильности научных кадров за двадцатилетний ретроспективный период. Предметом исследования выступали профессиональная, квалификационная, демографическая структура научных кадров, а также распределение научных работников по типам учреждений и регионам. Продолжением этих исследований стала вышедшая в 1991 году книга под редакцией В. Ж. Келле и С. А. Кугеля⁶, где использовался аналогичный подход к анализу структуры и динамики научных кадров в более поздний период. Продолжение этих исследований представлено в статье [2]. Количественные данные о составе научных кадров организаций Академии наук СССР представлены в работе А. Б. Петровского [3]. Достаточно детальный анализ процессов эволюции научных кадров на протяжении шестидесятилетнего периода представлен в монографии А. Г. Аллаhverдяна [4]. Приведены статистические данные об изменении общей численности и структуры научных кадров в период с 1950 по 2010 год. Динамика научных

¹ Индикаторы науки: 2019: статистический сборник / Л. М. Гохберг [и др.]. М.: НИУ ВШЭ, 2019. 328 с. URL: <https://www.hse.ru/data/2019/05/07/1502498137/in2019.pdf> (дата обращения: 17.10.2019).

² Индикаторы образования: 2018: статистический сборник / Н. В. Бондаренко [и др.]. М.: НИУ ВШЭ, 2018. 400 с. URL: <https://www.hse.ru/primarydata/in2018> (дата обращения: 17.10.2019).

³ Обзор деятельности сети диссертационных советов в 2017 году: аналитический доклад / под ред. С. И. Пахомова. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2018. 92 с. URL: <http://openbudgetrf.ru/wp-content/themes/bmc/i/books/obzor-deyatelnosti-seti-dissovetov-2017.pdf> (дата обращения: 17.10.2019).

⁴ Индикаторы образования: 2018: статистический сборник.

⁵ Научно-техническая революция и изменение структуры научных кадров СССР / под ред. Д. М. Гвишиани, С. Р. Микулинского, С. А. Кугеля. М.: Наука, 1973. 200 с.

⁶ Научные кадры СССР: динамика и структура / под ред. В. Ж. Келле, С. А. Кугеля. М.: Мысль, 1991. 287 с.

кадров в отдельные периоды истории представлена в статьях [5; 6].

Одной из последних работ в этой области исследования является монография Л. Э. Миндели⁷, вышедшая в 2016 г. Она посвящена анализу численности и структуры персонала, занятого исследованиями и разработками, сопоставлению кадрового научного потенциала в России и странах Организации экономического сотрудничества и развития.

Анализу карьерных траекторий, востребованности, мобильности лиц с учеными степенями посвящен сборник статей под редакцией Л. Гохберга, Н. Шматко, Л. Ауриол [1; 7].

Исследованиям в области количественного и качественного анализа в сфере подготовки кадров ВНК посвящены работы [8–11].

Отметим, что научные публикации с информацией об общем числе кандидатов и докторов наук, их возрастном статусе отсутствуют.

Единственным источником более полной информации о количестве лиц с учеными степенями кандидата и доктора наук является Всероссийская перепись населения. Результаты Всероссийской переписи населения в 2010 г. показали, что при численности населения 143 млн 436 тыс. человек 596 тыс. из них являются кандидатами наук, а 124 тыс. человек – докторами наук⁸. К этим данным стоит относиться с некоторой степенью осторожности, как к любой документально не подтвержденной информации, поскольку про-

верки документов о наличии ученой степени (дипломов кандидата и доктора наук) во время переписи не проводилось.

За прошедшие после переписи годы российское общество пополнилось новыми кадрами высшей научной квалификации, а часть из них выбыла по естественно-возрастным причинам. При этом надежного механизма учета динамики численности кандидатов и докторов наук не появилось. Поэтому задача численной оценки размера научного сообщества остается актуальной, ее решению и посвящено настоящее исследование.

В других странах в сфере образования и научных исследований и разработок ведется примерно аналогичный ежегодный статистический учет выпускников образовательных учреждений, закончивших программы подготовки докторов наук и получивших степень Ph.D., количества лиц, занятых исследованиями и разработками⁹ [12]. Формирование массива данных о карьерных траекториях лиц с ученой степенью Ph.D. было инициировано EUROSTAT, OECD и UNESCO с целью анализа их места и вклада в развитие экономики¹⁰. В разных странах задаются вопросом о необходимом количестве научных работников и дальнейшем развитии системы подготовки кадров высшей научной квалификации [13]: в Германии [14], в Австрии [15], в Португалии [16], в Испании [17; 18], в Швеции [19], в Финляндии [20] и др.

В исследованиях оценивается вклад лиц, получивших степень Ph.D.,

⁷ Миндели Л. Э., Чистякова В. Е. Структура и динамика кадрового потенциала российской науки. М.: ИПРАН РАН, 2016. 34 с. URL: <http://www.issras.ru/publication/docs/str2016.pdf> (дата обращения: 17.10.2019).

⁸ Итоги Всероссийской переписи населения 2010 года: В 11 т. Федеральная служба гос. статистики. М.: ИИЦ «Статистика России», 2012. Т. 3: Образование. 1291 с.

⁹ OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2016. Paris: OECD Publishing, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1787/25186167>; National Science Foundation of the United States: Doctorate Recipients from U.S. Universities: 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://ncses.nsf.gov/pubs/nsf19301/data> (дата обращения: 17.10.2019).

¹⁰ Meri T. Doctorate Holders. The Beginning of Their Career // Science and Technology. 2007. Vol. 131. 8 p. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3433488/5288557/KS-SF-07-131-EN.PDF/7d909a0e-c079-41c8-b967-3bf34f40c588?version=1.0> (дата обращения: 17.10.2019).

в экономику страны, их значимость на рынке труда, карьера в академическом сообществе [21]. Ученые отмечают центральную роль докторов наук Ph.D. в инновационном развитии экономики страны [15; 17; 20]. В этих публикациях рассматриваются карьерные траектории докторов наук, их преимущества на рынке труда. Также обсуждается вопрос о совместной подготовке докторов наук образовательными организациями и промышленными предприятиями [22].

Во многих публикациях приводятся числа по разным странам, характеризующие ежегодный приток докторов наук. При этом отсутствует информация о возрастной структуре этих исследователей и о продолжительности их работы, что не позволяет оценить общее количество лиц с учеными степенями и строить прогноз их количества в ближайшей перспективе.

Материалы и методы

Построение моделей для расчета числа кандидатов и докторов наук

Для численной оценки размера научного сообщества предлагается подход, основанный на информации о количестве успешно защитившихся соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук. Для этого рассмотрим общую динамическую модель возрастного движения кандидатов и докторов наук по аналогии с моделями движения населения и трудовых ресурсов¹¹.

Количество кандидатов наук в возрасте n в год t $K_t(n)$ равно количеству кандидатов наук в предыдущем году в возрасте на один год младше $K_{t-1}(n-1)$ плюс количество защитившихся кандидатов наук в этом году в возрасте n $A_t(n)$ минус количество защитившихся в этом году докторов наук в возрасте n $B_t(n)$. Кроме выбытия кандидатов наук

в связи с переходом их в статус докторов необходимо учесть естественно-возрастное выбытие. Для этого введем коэффициент дожития $\beta_t(n)$ (доля населения в возрасте n в год t от количества населения в возрасте $(n-1)$ в год $(t-1)$) для каждого возраста и каждого года. Тогда значение числа кандидатов наук в год t в возрасте n (возрастное распределение) можно представить в следующем виде:

$$K_t(n) = K_{t-1}(n-1) \cdot \beta_{t-1}(n-1) + A_t(n) - B_t(n). \quad (1)$$

Аналогично запишем динамическое уравнение для количества докторов наук в год t в возрасте n ($D_t(n)$):

$$D_t(n) = D_{t-1}(n-1) \cdot \beta_{t-1}(n-1) + B_t(n). \quad (2)$$

Коэффициент дожития $\beta_t(n)$ для каждого года определяется на основе ежегодной возрастной структуры населения страны и может быть представлен как табличными значениями, так и в виде аналитической функции.

Определим функцию мультипликативного коэффициента дожития $\gamma_t(n)$ как долю людей доживших до возраста n при условии, что они дожили до возраста 20 лет:

$$\gamma_t(n) = \prod_{k=1}^n \beta_t(k).$$

Диапазон изменения функции мультипликативного коэффициента дожития находится в пределах от 0 до 1, а временной ряд от 20 до 100 лет.

В дальнейшем для анализа кумулятивных динамических рядов будем использовать логистическую функцию, ограниченную двумя горизонтальными асимптотами и часто используемую

¹¹ **Коровкин А. Г., Единак Е. А., Королев И. Б.** Прогнозирование численности и структуры населения на базе балансового подхода // Демографический потенциал стран ЕАЭС: сборник статей VIII Уральского демографического форума. Екатеринбург: Институт экономики Уральского отделения РАН, 2017. С. 297–303.

в экономико-математических моделях [23; 24] вида:

$$f(x) = \frac{C}{1 + e^{-\frac{x-x_0}{\tau}}}, \quad (3)$$

где коэффициент C характеризует максимальное значение функции $f(x)$, коэффициент x_0 определяет точку перегиба кривой (медиану), левее и правее которой находится половина значений. Коэффициент τ характеризует скорость роста кривой, диапазон значений $(x_0 \pm 2\tau)$ покрывает более 76 % изменений значений логистической функции.

Производная от логистической функции имеет колоколообразную форму с максимумом в точке x_0 и выражается соотношением:

$$f'(x) = \frac{C e^{-\frac{x-x_0}{\tau}}}{\left(1 + e^{-\frac{x-x_0}{\tau}}\right)^2} = \frac{1}{\tau} f(x) \left[1 - \frac{1}{C} f(x)\right]. \quad (4)$$

Значение производной логистической функции в точке x_0 составляет значение $f'(x_0) = \frac{C}{4\tau}$.

Используя для мультипликативно-коэффициента дожития $\gamma_t(n)$ аппроксимирующую логистическую функцию типа (3) и считая коэффициент дожития до возраста n стабильным на рассматриваемом периоде времени, можно записать уравнение для расчета численности кандидатов наук в возрасте n в год t в следующем виде:

$$K_t(n) = \sum_{j=20}^n (A_{t-n+j}(j) - B_{t-n+j}(j)) \frac{\gamma(n)}{\gamma(j)}. \quad (5)$$

Аналогично численность докторов наук в возрасте n в год t будет:

$$D_t(n) = \sum_{j=20}^n B_{t-n+j}(j) \frac{\gamma(n)}{\gamma(j)}. \quad (6)$$

Суммирование возрастных категорий позволяет рассчитать кумулятивное (общее) количество кандидатов $K_t^E(n)$ и докторов наук $D_t^E(n)$ в возрасте от 20 лет до возраста n :

$$K_t^E(n) = \sum_{i=1}^n K_t(i), \quad (7)$$

$$D_t^E(n) = \sum_{i=1}^n D_t(i). \quad (8)$$

Таким образом, соотношения (5)–(6) позволяют рассчитать распределение общего числа кандидатов и докторов наук по возрастам в диапазоне от 20 до 100 лет, а соотношения (7)–(8) – кумулятивное число кандидатов и докторов наук в возрасте от 20 лет до заданного возраста.

Данные для расчета числа кандидатов и докторов наук

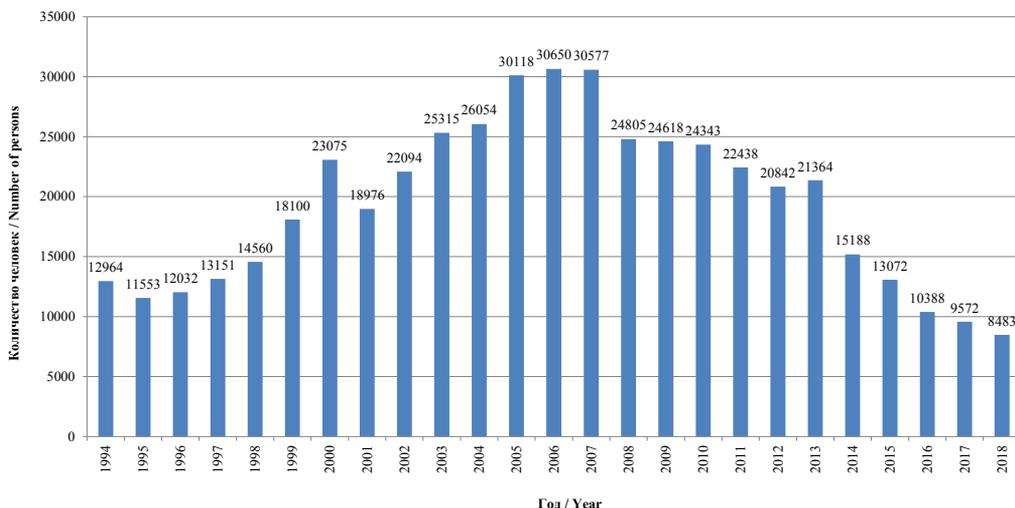
Горизонты ретроспективных данных по числу защит кандидатских и докторских диссертаций и возрастной структуре соискателей ученой степени должны покрывать временной интервал не менее чем период работы для лиц с учеными степенями. Этот период в среднем составляет 35 лет для кандидатов наук и 20 лет для докторов наук¹². Поэтому в качестве отправной точки для расчетов на 2018 год можно использовать 1983 год. Однако с учетом всего периода жизни кандидатов и докторов наук, например, в диапазоне от 20 до 80 лет в качестве начала расчетов необходимы данные начиная с 1959 года.

Данные о количестве защитившихся кандидатов и докторов наук с детализированной возрастной структурой существуют начиная с 2008 года, когда деятельность диссертационных

¹² Подготовка и аттестация кадров высшей научной квалификации в вузах Минобрнауки России. 2-е изд. / под ред. С. И. Пахомова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 134 с.

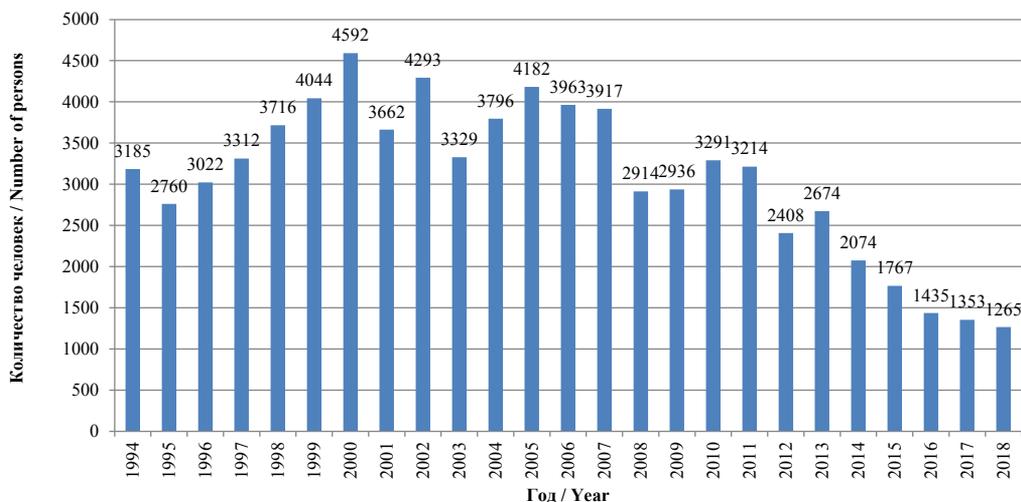
советов начала сопровождаться электронным документооборотом сначала в виде электронных форм годовых отчетов диссертационных советов, затем на основе Федеральной информационной системы государственной научной аттестации [25].

С 1994 до 2015 года известны интегральные значения показателя о числе лиц, утвержденных Высшей Аттестационной Комиссией (ВАК) в ученой степени кандидата или доктора наук¹³. Эти показатели представлены на рисунках 1, 2.



Р и с. 1. Количество лиц, утвержденных ВАК в ученой степени кандидата наук¹⁴

F i g. 1. Number of persons awarded degree of Candidate of Sciences



Р и с. 2. Количество лиц, утвержденных ВАК в ученой степени доктора наук¹⁵

F i g. 2. Number of persons awarded degree of Doctor of Sciences

¹³ Кадры высшей научной квалификации [Электронный ресурс]. URL: <http://science-expert.ru> (дата обращения: 17.10.2019).

¹⁴ Там же.

¹⁵ Там же.

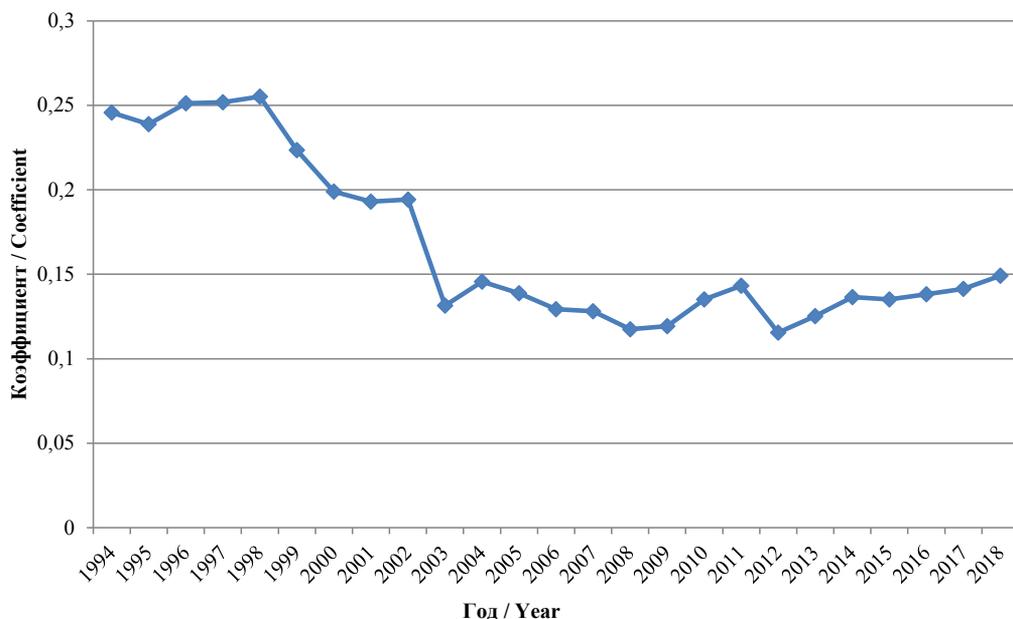
Из представленных данных видно, что с 1995 по 2000 год наблюдался рост числа защит как кандидатских, так и докторских диссертаций. Рост числа кандидатских защит продолжался вплоть до 2008 года, после чего стал снижаться вплоть до 2018 года, когда составил 70 % от уровня 1994 года. Число докторских защит начало снижаться уже после 2000 года и к 2018 году достигло 40 % от уровня 1994 года.

В период ранее 1994 года данные о возрастном составе защитившихся кандидатов и докторов наук отсутствуют, а интегральные данные представлены фрагментарно.

В 1989 году в организациях, находящихся на территории РСФСР, было защищено 18 тыс. кандидатских диссертаций, в 1990 году – 14 тыс. кандидатских диссертаций. За пери-

од 1986–1988 гг. защищено 14,4 тыс.; 1981–1985 гг. – 23,7 тыс.; 1976–1980 гг. – 16,3 тыс. кандидатских диссертаций¹⁶. Таким образом, для расчетов за период 1976–1980 гг. было взято ежегодное суммарное значение защит 3,3 тыс., за период 1981–1988 гг. – 4,8 тыс.

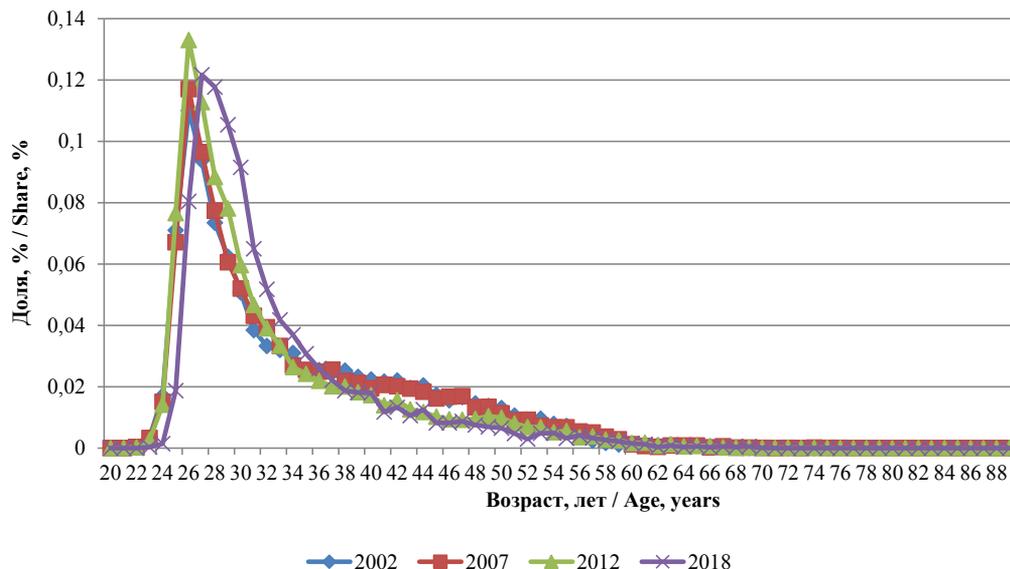
Суммарное количество докторов наук, защитившихся в период с 1976 по 1993 год, было аппроксимировано исходя из предположения о сохранении соотношения числа защит кандидатов и докторов наук. На рисунке 3 представлены значения отношения количества защитившихся докторов наук к количеству кандидатов наук в 1994–2018 гг. Можно увидеть, что в 1994–1998 гг. этот коэффициент в среднем составлял 0,25, а в последующие годы он понизился до 0,12. Поэтому для расчета количества защитившихся докторов наук за период



Р и с. 3. Отношение количества защитившихся докторов наук к количеству защитившихся кандидатов наук в 1994–2018 гг.

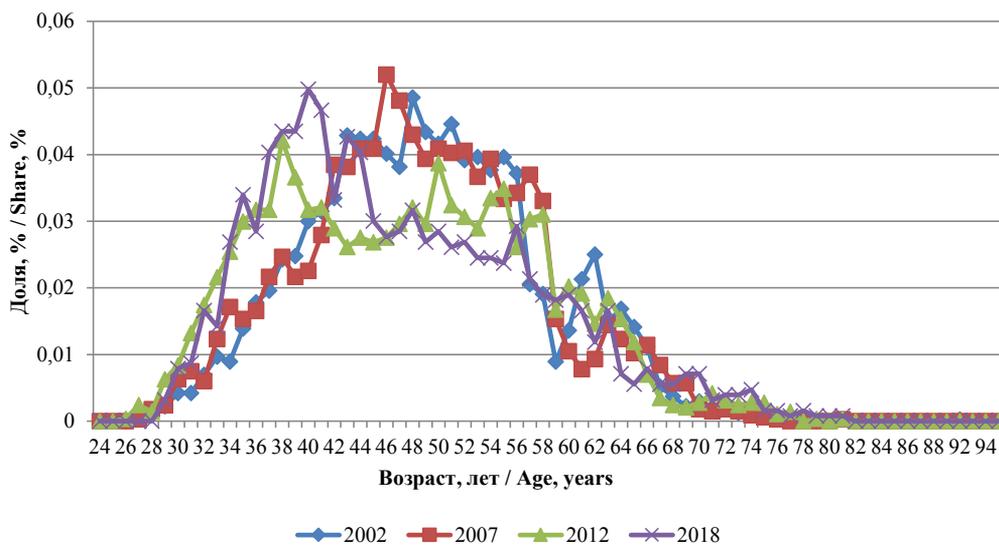
Fig. 3. The ratio of the number of persons awarded degree of Doctor of Sciences to the number of persons awarded degree of Candidate of Sciences in 1994–2018

¹⁶ Народное хозяйство СССР в 1990 г. (Статистический ежегодник). М.: «Финансы и Статистика», 1991 г.; Народное хозяйство РСФСР в 1990 году (Статистический ежегодник). М.: Республиканский информационно-издательский центр, 1991.



Р и с. 4. Долевое распределение защитившихся кандидатов наук по возрастам в 2002, 2007, 2012 и 2018 годах

F i g. 4. Percentage of persons awarded degree of Candidate of Sciences by age in 2002, 2007, 2012 and 2018



Р и с. 5. Долевое распределение защитившихся докторов наук по возрастам в 2002, 2007, 2012 и 2018 годах

F i g. 5. Percentage of persons awarded degree of Doctor of Sciences by age in 2002, 2007, 2012 and 2018

с 1976 по 1993 год был использован коэффициент 0,25.

Для периода 2001–2018 гг. известны точные значения числа защитившихся кандидатов ($A_i(n)$) и докторов наук ($B_i(n)$) в возрастном разрезе. На рисунках 4, 5 представлено распределение защитившихся кандидатов и докторов наук по возрастам в долях от общего количества защитившихся за четыре разных года в диапазоне 2001–2018 гг.

Для кандидатов наук наблюдается соответствие возрастных долей в числе защитившихся. Небольшое смещение в последний год, скорее всего, вызвано увеличением срока обучения в аспирантуре, введенное с 2014 года. Для докторов наук также наблюдается достаточная схожесть распределения долей. В последние годы произошел небольшой сдвиг в сторону омоложения новоиспеченных докторов наук.

Аппроксимация долевого возрастного распределения защитившихся кандидатов ($\alpha_{2001}(n)$) и докторов наук ($\delta_{2001}(n)$) с помощью функций вида (4) выглядит следующим образом:

$$\alpha_{2001}(n) = \frac{0,37 \cdot e^{-\frac{n-27}{0,99}}}{\left(1 + e^{-\frac{n-27}{0,99}}\right)^2} + \frac{0,13 \cdot e^{-\frac{n-35}{5,3}}}{\left(1 + e^{-\frac{n-35}{5,3}}\right)^2},$$

$$\delta_{2001}(n) = \frac{0,18 \cdot e^{-\frac{n-47}{4,63}}}{\left(1 + e^{-\frac{n-47}{4,63}}\right)^2} + \frac{0,05 \cdot e^{-\frac{n-59}{3,38}}}{\left(1 + e^{-\frac{n-59}{3,38}}\right)^2}.$$

Максимальное количество кандидатских защит происходит в возрасте 26–27 лет, докторских – в возрасте 46–48 лет.

Таким образом, на основе выявленной «стабильности» распределения долей защитившихся можно предположить, что аналогичное распределение было характерно и для раннего ретроспективного периода 1976–2000 гг.

Тогда, зная суммарное количество защитившихся, можно рассчитать оценки количества защит в каждом возрасте кандидатов ($A_i(n)$) и докторов наук ($B_i(n)$) за эти периоды. Оценки количества защитившихся кандидатов и докторов наук по возрастам для 1976–2000 гг. были рассчитаны по долям за 2002 год.

Результаты исследования

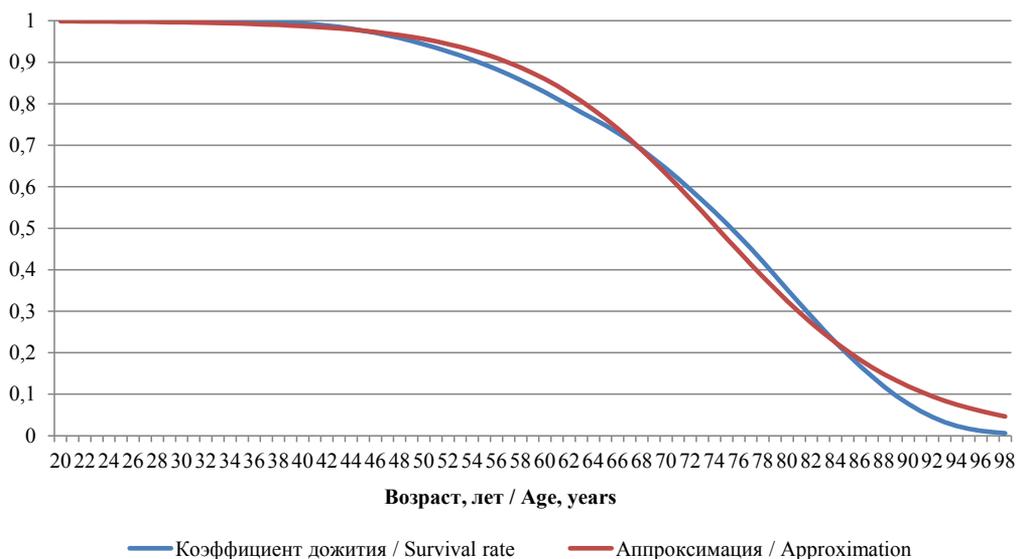
Результаты расчетов и аппроксимации

Коэффициенты дожития $\beta_{t-1}(n-1)$ были рассчитаны по данным официальной статистики о ежегодной возрастной структуре населения России за период 1994–2018 гг. для каждого года рассматриваемого периода как отношение численности населения России в возрасте n в год t к численности населения России в год $(t-1)$ в возрасте $(n-1)$. Значения коэффициента дожития отличаются для разных стартовых лет, особенно в период с 1994 по 2005 год, когда было сильное социальное расслоение населения. Поскольку в социальной группе, куда входят кандидаты и доктора наук, возрастные категории и вероятность дожития в среднем были выше среднестатистических значений, то для расчетов были использованы коэффициенты дожития, соответствующие 2014 году. С учетом этого были рассчитаны значения мультипликативного коэффициента дожития $\gamma_i(n)$, представленные на рисунке 6.

При аппроксимации мультипликативного коэффициента дожития $\gamma_i(n)$ логистической функцией (3) значения коэффициента $x_0 = 74$, значение коэффициента $\tau = 7,87$. С учетом этого аналитическое выражение для мультипликативного коэффициента дожития $\gamma(n)$ имеет вид:

$$\gamma(n) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{n-74}{7,87}}}.$$

По уравнениям (5) и (6) было рассчитано количество кандидатов и докторов наук на конец 2018 года для



Р и с. 6. Коэффициент дожития 2014 года и его аппроксимация

F i g. 6. Survival rate of 2014 and its approximation

каждого возраста, данные приведены на графиках в виде столбчатых диаграмм (рис. 7, 8).

Графики распределения числа кандидатов и докторов наук по возрастам оказались двумодальными. Для кандидатов наук наблюдаются два пика, приходящиеся на 38 лет и 53 года. Для докторов наук пики наблюдаются в 40 лет и в 64 года.

Пик в возрасте 53 лет для кандидатов наук обусловлен естественно-возрастными причинами. Пик в возрасте 38 лет связан с пиком защит в 2005–2007 гг., когда преобладающим возрастом защиты были 25–26 лет, через 13 лет эти кандидаты наук достигли возраста 38–39 лет.

Пик в возрасте 64 лет для докторов наук объясняется также естественно-возрастными причинами. Пик в возрасте 40 лет связан с тем, что в 2011–2013 гг. наблюдался рост защит докторских диссертаций в возрасте 33–37 лет и к 2018 году эти доктора наук достигли возраста 40 лет.

Для аппроксимации возрастного распределения использовалась сумма

двух функций вида (4) с разными параметрами:

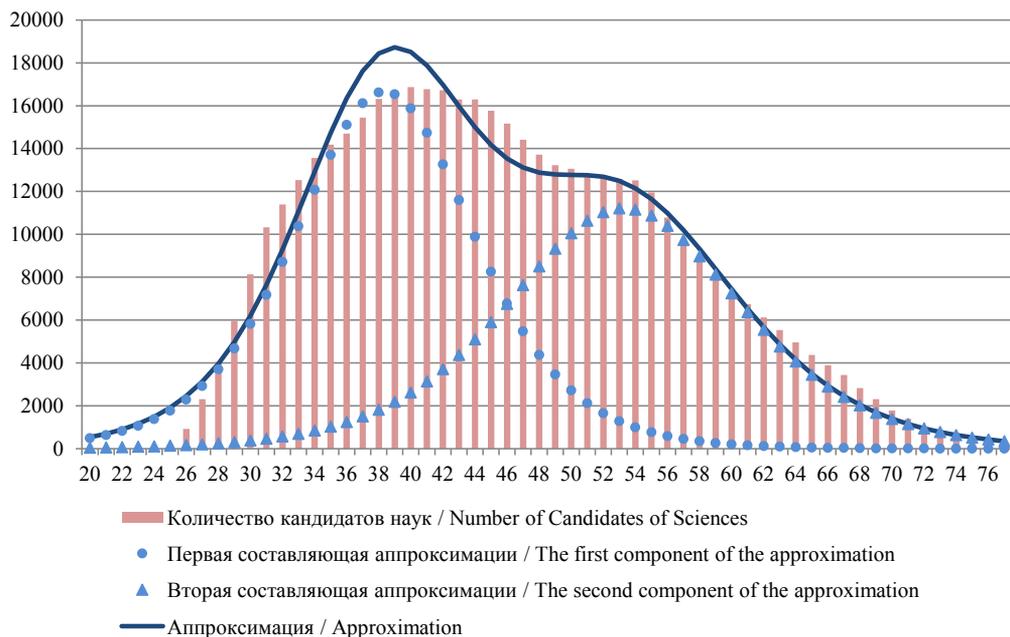
$$K_{2018}(n) = \frac{66615,9 \cdot e^{-\frac{n-38}{3,74}}}{\left(1 + e^{-\frac{n-38}{3,74}}\right)^2} + \frac{44873,9 \cdot e^{-\frac{n-53}{4,9}}}{\left(1 + e^{-\frac{n-53}{4,9}}\right)^2}, \quad (9)$$

$$D_{2018}(n) = \frac{1484,4 \cdot e^{-\frac{n-40}{2,06}}}{\left(1 + e^{-\frac{n-40}{2,06}}\right)^2} + \frac{9742,4 \cdot e^{-\frac{n-64}{7,5}}}{\left(1 + e^{-\frac{n-64}{7,5}}\right)^2}. \quad (10)$$

На рисунках 7, 8 также представлены графики аппроксимирующих функций (9)–(10) и их составляющих – слагаемых.

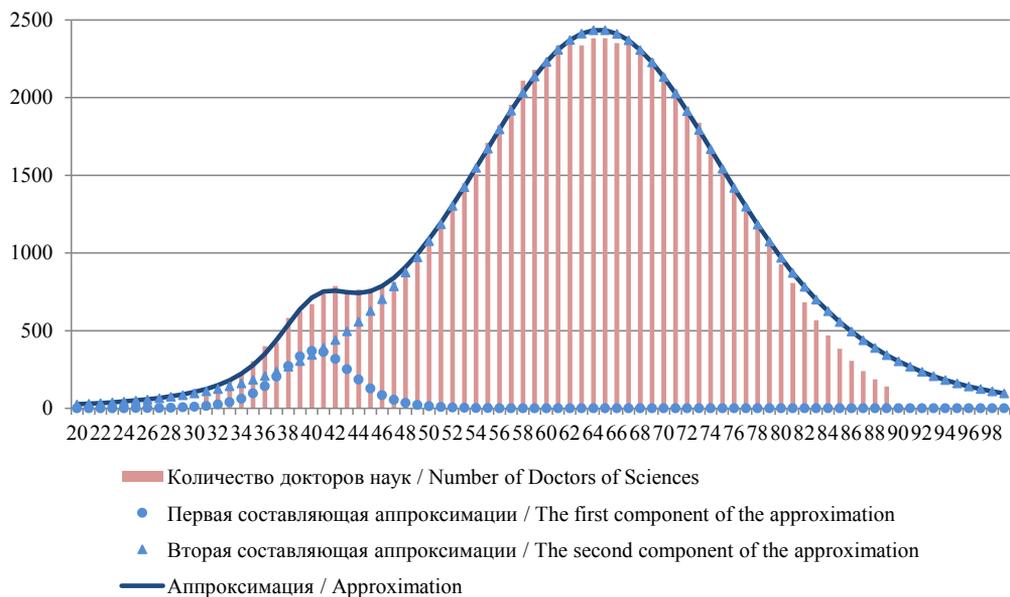
Для расчета кумулятивного значения численности кандидатов и докторов наук использовались уравнения (7) и (8). На рисунках 9 и 10 представлены эти значения в возрастном диапазоне от 20 до 80 лет для кандидатов наук и до 90 лет для докторов наук.

Аппроксимация кумулятивных функций также осуществлена с помощью



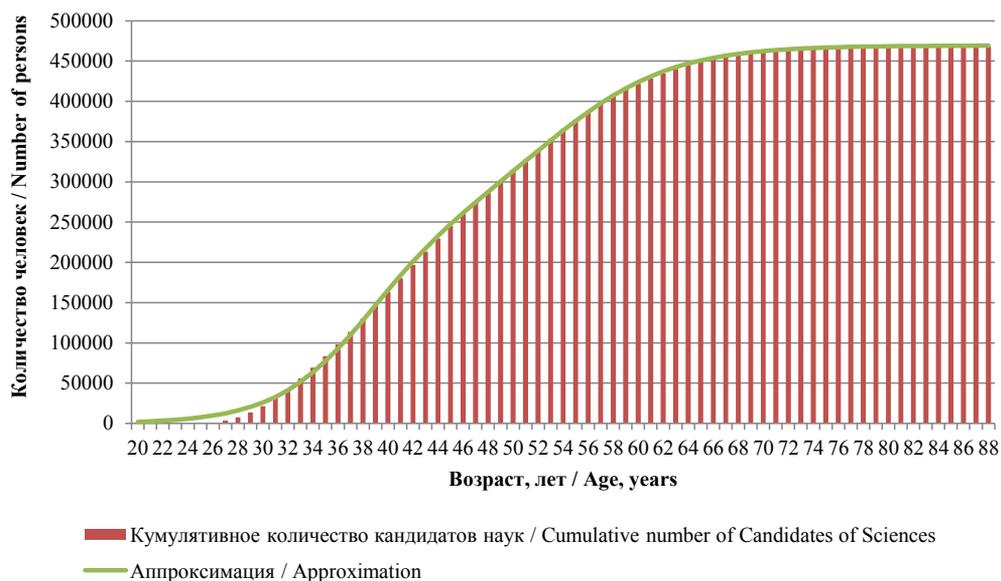
Р и с. 7. Возрастное распределение количества кандидатов наук на конец 2018 года, защитившихся в 1976–2018 гг.

F i g. 7. Age distribution of the number of Candidates of Sciences at the end of 2018, defended in 1976–2018



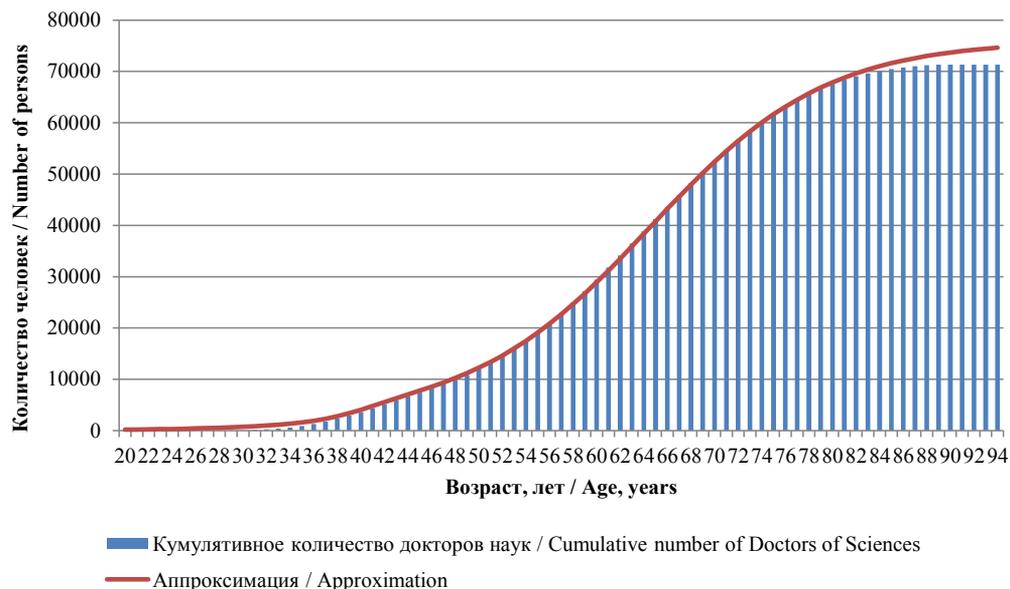
Р и с. 8. Возрастное распределение количества докторов наук на конец 2018 года, защитившихся в 1976–2018 гг.

F i g. 8. Age distribution of the number of Doctors of Sciences at the end of 2018, defended in 1976–2018
Computer science, computer engineering and management



Р и с. 9. Кумулятивное количество кандидатов наук на конец 2018 года, защитившихся в 1976–2018 гг.

Fig. 9. Cumulative number of Candidates of Sciences at the end of 2018, defended in 1976–2018



Р и с. 10. Кумулятивное количество докторов наук на конец 2018 года, защитившихся в 1976–2018 гг.

Fig. 10. Cumulative number of Doctors of Sciences at the end of 2018, defended in 1976–2018

суммы двух логистических функций вида (3) с теми же параметрами, что использовались при аппроксимации возрастной структуры. Функции кумулятивных показателей имеют следующий вид:

$$K_{2018}^f(n) = \frac{249377}{1 + e^{-\frac{n-38}{3,74}}} + \frac{220000}{1 + e^{-\frac{n-53}{4,9}}}, \quad (11)$$

$$D_{2018}^f(n) = \frac{3052}{1 + e^{-\frac{n-40}{2,06}}} + \frac{72988}{1 + e^{-\frac{n-64}{7,5}}}. \quad (12)$$

В итоге, на конец 2018 года значение численности кандидатов наук в возрастных категориях 20–80 лет составляет 468 тыс. человек, докторов наук в возрастных категориях 30–90 лет, составляет 72 тыс. человек.

Верификация моделей

Верификацию результатов моделирования численности кандидатов и докторов наук можно проводить по имеющимся данным Всероссийской переписи населения и федеральной статистики о количестве кандидатов и докторов наук в числе исследователей и профессорско-преподавательского состава вузов.

По результатам переписи населения в 2010 году 596 тыс. человек являются кандидатами наук. На 2017 год по данным статистики количество исследователей со степенью кандидата наук в разных секторах экономики, включая НИИ и вузы, составило 77 тыс. человек¹⁷, количество кандидатов наук в числе ППС вузов составило 140,5 тыс. человек¹⁸. На рисунке 11 показана отраслевая структура распределения кандидатов наук в динамике с 2004–2017 гг. Суммарное количество кандидатов наук в числе исследовате-

лей и ППС вузов составило в 2017 году около 218 тыс. человек.

Отметим, что численность кандидатов наук, занятых в сфере государственного управления, здравоохранения, высокотехнологических секторов экономики не отражается в статистике. Таким образом, реальное количество кандидатов наук должно быть в пределах от 218 до 596 тыс. Расчеты дали значение в 468 тыс., что попадает в указанный интервал, но почти в два раза превышает статистические данные о количестве кандидатов наук в составе исследователей и ППС. Это расхождение можно объяснить тем, что получение ученой степени кандидата наук не является гарантией дальнейшей профессиональной деятельности, связанной с исследованиями и работой в высших учебных заведениях. По ранее проведенным исследованиям, только 30 % защитившихся кандидатов наук продолжают публикационную активность, что говорит об уходе остальных кандидатов наук из сферы науки и образования [26].

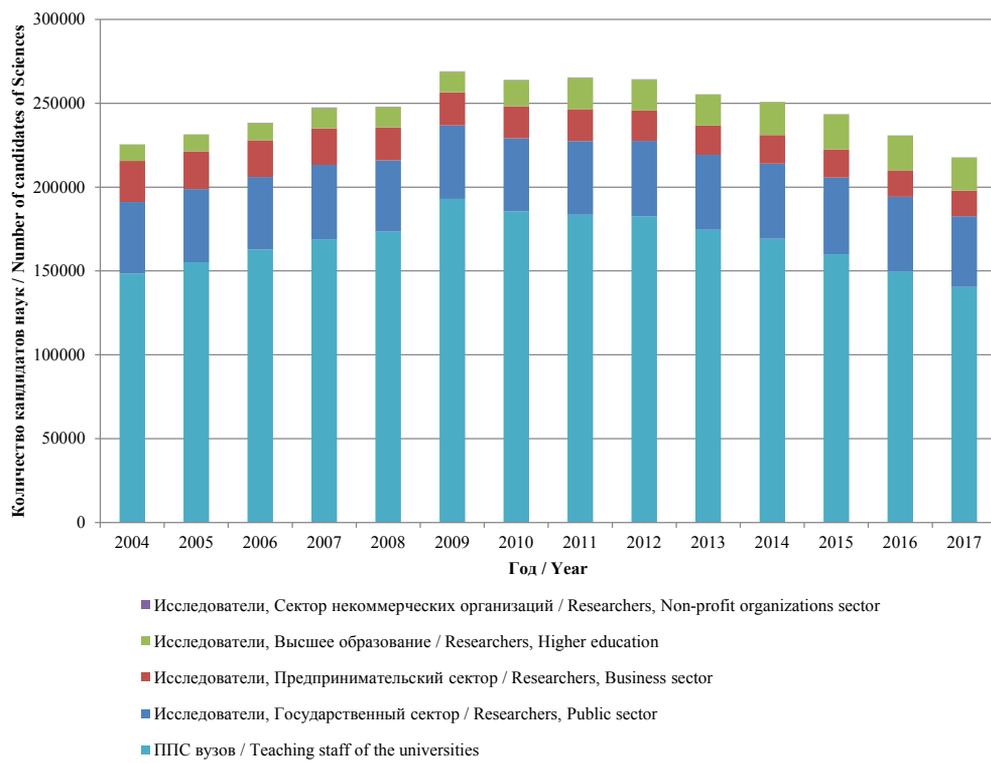
Так как в расчетах были использованы данные о защитах диссертаций за период с 1976 года, то количество кандидатов наук, начиная с возраста 65 лет, может быть немного выше, чем расчетное. Более точное значение можно получить либо, используя данные о защитах, начиная с 1959 года, либо, используя возрастное распределение кандидатов наук в 1975 году.

По докторам наук суммарные показатели численности докторов в составе исследователей и ППС составляют 64 тыс. человек¹⁹. Всероссийская перепись населения в 2010 году сообщила о 124 тыс. докторов наук. В результате расчетов была получена цифра

¹⁷ Форма № 2-наука: Сведения о выполнении научных исследований и разработок, 2017 г.

¹⁸ Форма ВПО-1: Сведения об образовательном учреждении, реализующем программы высшего профессионального образования [Электронный ресурс]. URL: <https://strategy.hse.ru/vpo-1> (дата обращения: 17.10.2019).

¹⁹ Там же.



Р и с. 11. Динамика количества кандидатов наук в числе исследователей и профессорско-преподавательского состава вузов

Fig. 11. Dynamics of the number of Candidates of Sciences among researchers and teaching staff of universities

в 72 тыс., которая также попадает в диапазон возможных значений. В целом расчетное количество докторов наук должно быть более близко к статистическим показателям для исследователей и ППС по сравнению с кандидатами наук, так как доктора наук в большем количестве работают в сфере образования и науки, чем кандидаты наук и должны почти полностью попадать в статистику по исследователям и ППС.

Обсуждение и заключение

Предложенные экономико-математические модели (1) – (2), (5) – (6) и (7) – (8) описывают численность кандидатов и докторов наук в различных возрастных категориях и опираются на данные государственной статистики. Это позволяет использовать их при решении

задач управления в сфере высокотехнологичных секторов экономики и подготовки кадров для экономики страны как на уровне высшего образования, так и на уровне научного сообщества.

Полученные аппроксимирующие уравнения (9) – (12) и количественные оценки числа кандидатов и докторов наук на 2019 год позволяют проанализировать текущее состояние научного сообщества и перспективы его динамики на ближайшие 10 лет. Эти оценки важны для принятия решений по развитию экономики и высшего образования.

И модели, и количественные оценки являются фундаментальной базой для среднесрочного прогнозирования потребностей наукоемких секторов экономики в кадрах ВНК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Gokhberg L., Shmatko N., Auriol L.** Rethinking the Doctoral Degrees in the Changing Labor Market Context // *The Science and Technology Labor Force*. 2016. Pp. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27210-8_1
2. **Кугель С. А., Васильев Ю. С.** Структура научных кадров и смена поколений в современной российской науке // *Проблемы деятельности ученого и научных коллективов*. 2009. № 25. С. 192–197.
3. **Петровский А. Б., Семенов Л. К., Малов В. С.** Кадры Академии: состав, структура, динамика // *Вестник АН СССР*. 1990. № 11. С. 37–49. URL: <http://old.ihst.ru/projects/sohist/papers/vtan/1990/11/37-49.pdf> (дата обращения: 17.10.2019).
4. **Аллахвердян А. Г.** Динамика научных кадров в советской и российской науке: сравнительно-историческое исследование. М.: Изд-во «КогитоЦентр», 2014. 263 с. URL: <http://old.ihst.ru/files/pdfs/aga-dynsc-research.pdf> (дата обращения: 17.10.2019).
5. **Аллахвердян А. Г., Агамова Н. С.** Динамика кадров в научной и инновационной деятельности (1990–2005) // *Проблемы деятельности ученого и научных коллективов*. 2008. № 24. С. 133–138.
6. **Аллахвердян А. Г.** Динамика научных кадров в советской и постсоветской России: сравнительно-научковедческий анализ // *Наука та наукознавство*. 2015. № 2. С. 58–65. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/132200> (дата обращения: 17.10.2019).
7. **Meissner D., Gokhberg L., Shmatko N.** The Meaning of Doctorate Holders for Human Capital Development of Nations // *The Science and Technology Labor Force*. 2016. Pp. 343–350. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27210-8_15
8. **Gokhberg L., Meissner D., Shmatko N.** Myths and Realities of Highly Qualified Labor and What It Means for PhDs // *Journal of the Knowledge Economy*. 2017. Vol. 8, Issue 2. Pp. 758–767. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-016-0403-7>
9. **Гуртов В. А., Щеголева Л. В.** Соискатель ученой степени доктора наук: публикационная активность // *Университетское управление: практика и анализ*. 2015. № 2. С. 47–56. URL: <https://www.umj.ru/jour/article/view/266> (дата обращения: 17.10.2019).
10. **Гуртов В. А., Щеголева Л. В.** Нужны ли публикации кандидату наук? // *Высшее образование в России*. 2015. № 4. С. 25–33. URL: <http://vovr.ru/upload/4-15.pdf> (дата обращения: 17.10.2019).
11. **Gurtov V. A., Shchegoleva L. V.** Forecasting the Economic Need for Personnel with Higher Scientific Qualifications // *Studies on Russian Economic Development*. 2018. Vol. 29, Issue 4. Pp. 415–422. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1075700718040081>
12. The World is Producing More PhDs than Ever Before. Is It Time to Stop? / D. Cyranoski [et al.] // *Nature*. 2011. Vol. 472. Pp. 276–279. DOI: <https://doi.org/10.1038/472276a>
13. The PhD in Europe: Developing a System of Doctoral Training That Will Increase the Internationalisation of Universities / C. O’Carroll [et al.] // *European Higher Education at the Crossroads*. 2012. Pp. 461–484. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-3937-6_26
14. **Mertens A., Robken H.** Does a Doctoral Degree Pay Off? An Empirical Analysis of Rates of Return of German Doctorate Holders // *Higher Education*. 2013. Vol. 66, Issue. 2. Pp. 217–231. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10734-012-9600-x>
15. **Schwabe M.** The Career Paths of Doctoral Graduates in Austria // *European Journal of Education*. 2011. Vol. 46, Issue 1. Pp. 153–168. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1465-3435.2010.01465.x>
16. **Santos J. M., Horta H., Heitor M.** Too Many PhDs? An Invalid Argument for Countries Developing Their Scientific and Academic Systems: The Case of Portugal // *Technological Forecasting and Social Change*. 2016. Vol. 113. Pp. 352–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.12.013>
17. **Canal-Dominguez J. F., Wall A.** Factors Determining the Career Success of Doctorate Holders: Evidence from the Spanish Case // *Studies in Higher Education*. 2014. Vol. 39, Issue 10. Pp. 1750–1773. DOI: <https://doi.org/10.1080/03075079.2013.806464>
18. **Herrera L., Nieto M.** The Determinants of Firms' PhD Recruitment to Undertake R&D Activities // *European Management Journal*. 2015. Vol. 33, Issue 2. Pp. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.emj.2014.10.003>

19. **Assbring L., Nuur C.** What's in It for Industry? A Case Study on Collaborative Doctoral Education in Sweden // Industry and Higher Education. 2017. Vol. 31, Issue 3. Pp. 184–194. DOI: <https://doi.org/10.1177/0950422217705245>
20. **Haapakorpi A.** Doctorate Holders outside the Academy in Finland: Academic Engagement and Industry-Specific Competence // Journal of Education and Work. 2017. Vol. 30, Issue 1. Pp. 53–68. DOI: <https://doi.org/10.1080/13639080.2015.1119257>
21. **Cruz-Castro L., Sanz-Menendez L.** The Employment of PhDs in Firms: Trajectories, Mobility and Innovation // Research Evaluation. 2005. Vol. 14, Issue 1. Pp. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.3152/147154405781776292>
22. **Germain-Alamartine E.** Doctoral Education and Employment in the Regions: the Case of Catalonia // Regional Studies, Regional Science. 2019. Vol. 6, Issue 1. Pp. 299–318. DOI: <https://doi.org/10.1080/21681376.2019.1584049>
23. **Kucharavy D., De Guio R.** Application of S-shaped Curves // Procedia Engineering. 2011. Vol. 9. Pp. 559–572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.142>
24. **Kucharavy D., De Guio R.** Logistic Substitution Model and Technological Forecasting // Procedia Engineering. 2011. Vol. 9. Pp. 402–416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.129>
25. **Виноградов В. Н., Чернова Я. Г., Кубряк О. В.** Единая государственная информационная система мониторинга аттестации научных и научно-педагогических кадров высшей квалификации (ЕГИСМ) в диссертационных советах – обсуждение первых впечатлений // Информатизация образования и науки. 2014. № 2. С. 12–22.
26. **Gurtov V., Shchegoleva L.** Comparative Analysis of PhDs' Publication Activity in Russia and Other Countries // In: Proceedings of the 7th International Conference on Education and New Learning Technologies. Barcelona, Spain, 2015. Pp. 985–989. URL: <http://library.iated.org/view/GURTOV2015COM> (дата обращения: 17.10.2019).

Поступила 04.07.2019; принята к публикации 15.08.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Гуртов Валерий Алексеевич, директор Центра бюджетного мониторинга ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (185910, Россия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID: D-5286-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2442-7389>, vgurt@petsru.ru

Щеголева Людмила Владимировна, начальник отдела Центра бюджетного мониторинга ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (185910, Россия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33), доктор технических наук, доцент, ResearcherID: F-4064-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5539-9176>, schegoleva@petsru.ru

Пахомов Сергей Иванович, профессор кафедры химической физики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., д. 31), доктор химических наук, ResearcherID: AAE-3841-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7855-5394>, ScopusID: 57196116928, pakhomovsi@minobrnauki.gov.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Гуртов – исследование, анализ, интерпретация, обработка данных; Л. В. Щеголева – разработка концепции исследования, участие в планировании; С. И. Пахомов – участие в руководстве, разработка концепции исследования.

Благодарности: Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра бюджетного мониторинга ПетрГУ за помощь в обработке статистических данных. Статья подготовлена при выполнении работы «Научно-методическое обеспечение» на 2019 год для Министерства науки и высшего образования РФ, реестровый № 730000Ф.99.1.БВ16АА01000.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Gokhberg L., Shmatko N., Auriol L. Rethinking the Doctoral Degrees in the Changing Labor Market Context. *The Science and Technology Labor Force*. 2016; 1-7. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27210-8_1
2. Kugel S.A., Vasilev Yu.S. Structure of Scientific Personnel and Change of Generations in Modern Russian Science. *Problemyi deyatelnosti uchenogo i nauchnykh kollektivov* = Problems in the Activities of Scientists and Research Teams. 2009; (25):192-197. (In Russ.)
3. Petrovskiy A.B., Semenov L.K., Malov V.S. Academy Staff: Composition, Structure, Dynamics. *Vestnik AN SSSR* = Bulletin of the USSR Academy of Sciences. 1990; (11):37-49. Available at: <http://old.ihst.ru/projects/sohist/papers/vran/1990/11/37-49.pdf> (accessed 17.10.2019). (In Russ.)
4. Allahverdyan A.G. Dynamics of Scientific Personnel in Soviet and Russian Science: Comparative Historical Research. Moscow: KogitoTsentr; 2014. 263 p. Available at: <http://old.ihst.ru/files/pdfs/aga-dynsc-research.pdf> (accessed 17.10.2019). (In Russ.)
5. Allahverdyan A.G., Agamova N.S. Dynamics of Personnel in Scientific and Innovation Activities (1990–2005). *Problemyi deyatelnosti uchenogo i nauchnykh kollektivov* = Problems in the Activities of Scientists and Research Teams. 2008; (24):133-138. (In Russ.)
6. Allahverdyan A.G. Dynamics of Research Personnel in Soviet and Post-Soviet Russia: A Comparative Statistical Analysis. *Nauka ta naukoznavstvo* = Science and Science Studies. 2015; (2):58-65. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/132200> (accessed 17.10.2019). (In Russ.)
7. Meissner D., Gokhberg L., Shmatko N. The Meaning of Doctorate Holders for Human Capital Development of Nations. *The Science and Technology Labor Force*. 2016; 343-350. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27210-8_15
8. Gokhberg L., Meissner D., Shmatko N. Myths and Realities of Highly Qualified Labor and What it Means for PhDs. *Journal of the Knowledge Economy*. 2017; 8(2):758-767. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-016-0403-7>
9. Gurtov V.A., Shchegoleva L.V. Seeker of Doctor of Sciences (D.Sc.): Publication Activities. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz* = University Management: Practice and Analysis. 2015; (2):47-56. Available at: <https://www.umj.ru/jour/article/view/266> (accessed 17.10.2019). (In Russ.)
10. Gurtov V.A., Shchegoleva L.V. Does Candidate of Sciences Need to Publish Articles? *Vyisshee obrazovanie v Rossii* = Higher Education in Russia. 2015; (4):25-33. Available at: <http://vovv.ru/upload/4-15.pdf> (accessed 17.10.2019). (In Russ.)
11. Gurtov V.A., Shchegoleva L.V. Forecasting the Economic Need for Personnel with Higher Scientific Qualifications. *Studies on Russian Economic Development*. 2018; 29(4):415-422. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1075700718040081>
12. Cyranoski D., Gilbert N., Ledford H., et al. The World is Producing More PhDs than Ever Before. Is It Time to Stop? *Nature*. 2011; 472:276-279. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/472276a>
13. O'Carroll C., Purser L., Wislocka M., et al. The PhD in Europe: Developing a System of Doctoral Training That Will Increase the Internationalisation of Universities. *European Higher Education at the Crossroads*. 2012; 461-484. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-3937-6_26
14. Mertens A., Robken H. Does a Doctoral Degree Pay Off? An Empirical Analysis of Rates of Return of German Doctorate Holders. *Higher Education*. 2013; 66(2):217-231. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10734-012-9600-x>
15. Schwabe M. The Career Paths of Doctoral Graduates in Austria. *European Journal of Education*. 2011; 46(1):153-168. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1465-3435.2010.01465.x>
16. Santos J.M., Horta H., Heitor M. Too Many PhDs? An Invalid Argument for Countries Developing Their Scientific and Academic Systems: The Case of Portugal. *Technological Forecasting and Social Change*. 2016; 113:352-362. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.12.013>
17. Canal-Dominguez J.F., Wall A. Factors Determining the Career Success of Doctorate Holders: Evidence from the Spanish Case. *Studies in Higher Education*. 2014; 39(10):1750-1773. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/03075079.2013.806464>

18. Herrera L., Nieto M. The Determinants of Firms' PhD Recruitment to Undertake R&D Activities. *European Management Journal*. 2015; 33(2):132-142. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.emj.2014.10.003>
19. Assbring L., Nuur C. What's in It for Industry? A Case Study on Collaborative Doctoral Education in Sweden. *Industry and Higher Education*. 2017; 31(3):184-194. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0950422217705245>
20. Haapakorpi A. Doctorate Holders outside the Academy in Finland: Academic Engagement and Industry-Specific Competence. *Journal of Education and Work*. 2017; 30(1):53-68. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/13639080.2015.1119257>
21. Cruz-Castro L., Sanz-Menendez L. The Employment of PhDs in Firms: Trajectories, Mobility and Innovation. *Research Evaluation*. 2005; 14(1):57-69 (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3152/147154405781776292>
22. Germain-Alamartine E. Doctoral Education and Employment in the Regions: The Case of Catalonia. *Regional Studies, Regional Science*. 2019; 6(1):299-318. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/21681376.2019.1584049>
23. Kucharavy D., De Guio R. Application of S-shaped Curves. *Procedia Engineering*. 2011; 9:559-572. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.142>
24. Kucharavy D., De Guio R. Logistic Substitution Model and Technological Forecasting. *Procedia Engineering*. 2011; 9:402-416. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.129>
25. Vinogradov V.N., Chernova Ya.G., Kubryak O.V. Unified State Information System of Attestation of Scientific and Scientific-Pedagogical Staff of the Highest Qualification in Dissertation Council – the Discussion of First Impressions. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki = Informatization of Education and Science*. 2014; (2):12-22. (In Russ.)
26. Gurtov V.A., Shchegoleva L.V. Comparative Analysis of PhDs' Publication Activity in Russia and Other Countries. In: Proceedings of the 7th International Conference on Education and New Learning Technologies. Barcelona, Spain; 2015. p. 985-989. Available at: <http://library.iated.org/view/GURTOV2015COM> (accessed 17.10.2019). (In Eng.)

Received 04.07.2019; revised 15.08.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Valery A. Gurtov, Director of Budget Monitoring Center, Petrozavodsk State University (33 Prospekt Lenina, Petrozavodsk 185910, Russia), D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, ResearcherID: D-5286-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2442-7389>, vgurt@petsu.ru

Liudmila V. Shchegoleva, Head of Department of Budget Monitoring Center, Petrozavodsk State University (33 Prospekt Lenina, Petrozavodsk 185910, Russia), D.Sc. (Engineering), Associated Professor, ResearcherID: F-4064-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5539-9176>, schegoleva@petsu.ru

Sergey I. Pakhomov, Professor of Chemical Physics Chair, National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute) (31 Kashirskoe Shosse, Moscow 115409, Russia), D.Sc. (Chemistry), ResearcherID: AAE-3841-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7855-5394>, ScopusID: 57196116928, pakhomovsi@minobrnauki.gov.ru

Contribution of the authors:

V. A. Gurtov – study, processing, analysis, interpretation of data; L. V. Shchegoleva – study conception, planning and supervising of the study; S. I. Pakhomov – supervision, study conception, involvement in planning.

Acknowledgements: Authors express their gratitude to colleagues from Budget Monitoring Center of PetrSU for their assistance in data processing. The article was prepared in the course of the research work “Scientific and Methodical Support” of 2019 for the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: Register No. 730000F.99.1.BV16AA01000.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.083:62-82

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201904.529-545



Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством

П. А. Ионов, П. В. Сенин, С. В. Пьянзов, А. В. Столяров*,
А. М. Земсков

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

*cabto@mail.ru

Введение. Статья посвящена разработке устройства для оценки технического состояния объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров.

Материалы и методы. В работе использованы положения теоретической механики, теории гидрогазодинамики и основные принципы создания механизмов и машин. Для оценки технического состояния объемных гидроприводов применен метод гидравлического нагружения гидромотора. Достоверность результатов подтверждена экспериментальной реализацией стенда с гидравлическим нагружающим устройством.

Результаты исследования. Разработана и готовится к реализации новая конструкция стенда с гидравлическим нагружающим устройством для оценки технического состояния широкой номенклатуры объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров. Отличительной особенностью разработанного стенда является использование метода гидравлического нагружения, при котором крутящий (тормозной) момент на валу испытуемого гидромотора создается при помощи гидромашин. Стенд состоит из блоков обработки и измерения данных. В основе блока обработки данных лежит многофункциональная плата сбора данных, соединенная с персональным компьютером. В структуру блока измерения данных входят частотный преобразователь, соединенный с электродвигателем, приводной вал для подключения к нему вала испытуемого гидронасоса, гидравлическая система, имеющая гидробак, линии всасывания, управления, слива, дренажа, нагнетания и реверсивные дроссели-расходомеры, установленные в линиях нагнетания и соединенные с гидронасосом и гидромотором, нагружающее устройство с реверсивным гидронасосом, приводной вал которого муфтой соединен с валом испытуемого гидромотора. Дополнительно реверсивные дроссель-расходомеры через специальные порты и электрические линии соединены с платой сбора данных. Разработанный стенд позволяет оценить техническое состояние наиболее распространенных моделей объемных гидроприводов, используемых в современной сельскохозяйственной и дорожно-строительной технике. Стенд характеризуют энергоэффективность, простота конструкции и низкая стоимость при лучших технических характеристиках, что обеспечивает его высокую конкурентоспособность.

© Ионов П. А., Сенин П. В., Пьянзов С. В., Столяров А. В., Земсков А. М., 2019



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

Обсуждение и заключение. Разработанная конструкция стенда с гидравлическим нагружающим устройством позволяет реализовать методику динамических испытаний предприятий-изготовителей и с высокой точностью оценить техническое состояние объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров. Дальнейшее усовершенствование эффективности оценки технического состояния объемных гидроприводов видится в разработке специализированного программного обеспечения для обработки и анализа результатов испытаний в режиме реального времени.

Ключевые слова: стенд, гидравлическое нагружающее устройство, динамическая методика испытаний, объемный гидропривод, техническое состояние, коэффициент полезного действия, крутящий момент, ремонтное предприятие, сервисный центр

Для цитирования: Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством / П. А. Ионов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 529–545. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>

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».

Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device

P. A. Ionov, P. V. Senin, S. V. Pyanzov, A. V. Stolyarov*,
A. M. Zemskov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)
*cabto@mail.ru

Introduction. The article deals with the development of a device for evaluating technical condition of volumetric hydraulic drives made in Russia and abroad at repair and service centres.

Materials and Methods. The study uses the statements of theoretical mechanics and hydrodynamics, the basic principles of mechanisms and machines production. For technical condition evaluating of volumetric hydraulic drives, the method of hydraulic loading of hydraulic motor was applied. Reliability of results was confirmed during experimental settings of the hydraulic loading device stand.

Results. A stand design with the hydraulic loading device was developed and put into practice for new technical condition evaluating of volumetric hydraulic drives, made in Russia and abroad, at repair and service centres. A property of the stand is the use of the hydraulic loading method when the torque (braking) moment on the shaft of the tested hydraulic rotor is created using a hydraulic machine. The stand consists of data processing and measurement units. The data processing unit is based on a multifunctional data acquisition board connected with a personal computer. The structure of the data measurement unit includes a frequency converter connected to an electric motor, a drive shaft for connecting the shaft of the tested hydraulic pump; hydraulic system having a hydraulic tank; suction, control, drain, and discharge lines and reversible flow chokes installed in discharge lines and connected with the hydraulic pump and hydraulic rotor; loading device with the reversible hydraulic pump, drive shaft joined with the shaft of the tested hydraulic motor. Additionally, reversible throttle flow meters are connected via special ports and electric lines to the data acquisition board. The developed stand allows evaluating the technical condition of most widespread models of volumetric hydraulic drives used in

modern agricultural and road construction equipment. The stand is characterized by good energy efficiency, simplicity of design, low costs, good technical characteristics that make it competitive.

Discussion and Conclusion. The new stand design with the hydraulic loading device allows implementing of the dynamic testing methodology and guarantees high accuracy of evaluating the technical condition of the most widespread Russian and foreign volumetric hydraulic drives at repair and service centres. Further improvement of the evaluating the technical condition of volumetric hydraulic drives is related to the development of specialized software for processing and analysing test results in real-time.

Keywords: stand, hydraulic loading device, dynamic test, volumetric hydraulic drive, technical condition, efficiency, torque, repair centre, service centre

For citation: Ionov P.A., Senin P.V., Pyanzov S.V., et al. Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):529-545. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>

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.

Введение

Современная сельскохозяйственная, строительно-дорожная, карьерная, горнодобывающая, лесозаготовительная, коммунальная, военная, путевая, речная и морская техника отечественного и зарубежного производства в свое конструктивное исполнение включает сложные и дорогостоящие гидроагрегаты, в том числе аксиально-поршневые гидронасосы и гидромоторы, которые образуют единую систему – объемный гидропривод. Данная система отвечает за работу исполнительных механизмов и обеспечивает перемещение техники с заданной скоростью, поэтому от технического состояния объемного гидропривода во многом зависят надежность и эксплуатационные показатели техники.

Оценка технического состояния объемного гидропривода на предприятиях-изготовителях проводится с помощью методики динамических ис-

пытаний на специализированных промышленных стендах преимущественно зарубежного производства [1–3].

Согласно данным изготовителей (Sauer-Danfoss, Linde, Bosch Rexroth, Германия; Eaton, США; PSM-Hydraulics, Россия; ЗАО «Гидросила ГРУП», Украина), оценку технического состояния объемного гидропривода проводят по наиболее важным параметрам диагностирования агрегатов: подача (расход) рабочей жидкости, рабочее давление, крутящий момент, температура рабочей жидкости и коэффициенты полезного действия (КПД) – полный, объемный и гидромеханический. При этом критерием предельного состояния гидропривода принято считать падение объемного КПД на 20 % от нормативного (паспортного) значения¹.

В настоящее время на ремонтных предприятиях и в сервисных центрах практически отсутствуют средства для

¹ Каталог гидравлического оборудования ОАО «Пневмостроймашина» [Электронный ресурс]. URL: https://www.psm-hydraulics.ru/gallery/docs/doc_150.pdf (дата обращения: 28.10.2019); Technical Information Series 90 Axial Piston Pumps [Электронный ресурс]. URL: https://hmc.com.br/pdf/sauer_bomba_S90.pdf (дата обращения: 28.10.2019); Axial Piston Fixed Motor A2FM Series 6. Bosch Rexroth Group [Электронный ресурс]. URL: http://i-hydro.ru/images/rexroth/motor_a2fm.pdf (дата обращения: 28.10.2019); Variable Pumps for Closed Circuit Operation Hpv-02 [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/JguXu> (дата обращения: 28.10.2019).

реализации методики предприятий-изготовителей. Основная проблема заключается в создании на вращающемся валу испытуемого гидромотора переменной нагрузки. В основном используются методики, не позволяющие дать достоверное заключение о работоспособности бывших в эксплуатации и отремонтированных гидроприводов, что затрудняет проведение ремонтных работ [1]. Большинство ремонтных предприятий и сервисных центров вынуждены испытывать гидромоторы объемных гидроприводов в режиме гидронасоса, что дает косвенную оценку технического состояния, а конструкция отдельных гидроагрегатов (имеющих плунжеры с гидростатической разгрузкой опор) вообще не позволяет реализовать данный метод испытаний. Поэтому актуальной задачей является разработка нового стенда для оценки технического состояния объемного гидропривода, способного реализовать методику динамических испытаний в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров.

Обзор литературы

В настоящее время для оценки технического состояния объемного гидропривода используются отечественные и зарубежные испытательные стенды, в состав которых входят различные типы нагружающих устройств. Среди серийно выпускаемых можно выделить следующие стенды: КИ-28097-03М производства ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва [4]; СГН/110м-БИМ производст-

ва ООО «Стендовое оборудование», г. Санкт-Петербург²; инерционный испытательный стенд Маслова Н. А., г. Новосибирск [5]; Hydraulic Test Center Model 850 производства США³; комбинированный испытательный стенд серии YST500W китайской компании High Land Hydraulic Pump⁴.

По способу создания и измерения крутящего момента на валу испытуемого гидромотора известные модели можно классифицировать на стенды, реализующие статический и динамический методы. Статический метод заключается в определении крутящего момента при невращающемся валу испытуемого гидромотора, а динамический предусматривает вращение вала гидромотора с переменной нагрузкой [6]. В качестве нагружающего устройства при реализации статического метода измерения крутящего момента используется специализированная приставка, жестко фиксирующая вал испытуемого гидромотора и регистрирующая деформацию упругого элемента, расположенного в цепи передачи крутящего момента. При реализации динамического метода используются фрикционные, инерционные, пневматические и электрические нагружающие устройства, позволяющие создавать переменную нагрузку на валу испытуемого гидромотора.

Ярким примером реализации статического метода стал стенд КИ-28097-03М. Достоинствами стенда являются: простота конструктивного исполнения, низкая стоимость комплекующих и узлов стенда⁵. Однако

² Производственное Объединение ООО «Стендовое оборудование» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dta-stend.ru> (дата обращения: 28.10.2019).

³ AIDCO Test Systems Model 850 Hydraulic Test Center [Электронный ресурс]. URL: <https://powertestdyno.com/product/transmission-and-hydraulic-test-850-series/> (дата обращения: 28.10.2019).

⁴ High Land Hydraulic Pump [Электронный ресурс]. URL: <https://hydraulicliu.en.china.cn/> (дата обращения: 28.10.2019).

⁵ Петрищев Н. А., Данков А. А., Ивлева И. Б. К вопросу оснащения сервисной службы дилеров предприятий сельхозмашиностроения // Проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 15–16 ноября 2017 г.) / Под общ. ред. Н. И. Бухтоярова, В. И. Оробинского. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2017. С. 41–47.

в работе [7] отмечены недостатки данного стенда. Среди них автор выделяет малую мощность приводного электродвигателя (45 кВт), ограниченный диапазон частоты вращения приводного вала гидронасоса (до 1470 об/мин) и рабочего давления в гидросистеме стенда (до 35 МПа), невозможность определения основных технических характеристик, рекомендованных предприятиями-изготовителями объемных гидроприводов: подача гидронасоса, расход гидромотора, частота вращения гидромотора, КПД объемного гидропривода, развиваемого крутящего момента.

Среди стендов, использующих фрикционное нагружающее устройство на территории Российской Федерации, наибольшее распространение получил стенд СГН/110м-БИМ. В качестве достоинств стенда в одной из исследовательских работ⁶ отмечается простота конструктивного исполнения, бесступенчатое нагружение испытуемого гидромотора (в диапазоне от 0 до 600 Н·м). Однако авторами другой статьи [8] в качестве недостатков стенда отмечаются: быстрый износ тормозных фрикционов; неустойчивость создания нагружения в процессе испытаний и, как следствие, снижение точности определения крутящего момента; большая стоимость как самого стенда, так и нагружающего устройства.

На базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» Н. А. Масловым был разработан экспериментальный стенд с инерционным нагружающим устройством [9]. Данный прибор выполнен в виде маховика (маховой массы), соединенного с валом испытуемого гидромотора. Крутящий момент на валу гидромотора определяется по продолжительности разгона маховой массы до номинальной скорости, величина

момента равна произведению момента инерции маховой массы на ее угловое ускорение. В работе [8] в качестве достоинств стенда отмечаются простота конструктивного исполнения, низкая стоимость комплектующих и материалов, а в качестве недостатков – ограниченная номенклатура испытуемых гидроагрегатов и необходимость наличия маховиков с различными моментами инерции, что позволяет проводить диагностирование гидроагрегатов только по косвенным показателям.

Компания AIDCO Test Systems (США) серийно выпускает промышленный стенд Hydraulic Test Center Model 850, используемый для оценки технического состояния объемного гидропривода, реализующий электрический метод нагружения испытуемого гидромотора. Этот метод нагружения заключается в измерении емкости или разницы фаз между двумя магнитными кодировочными устройствами, установленными тангенциально на оси вала испытуемого гидроагрегата, что обеспечивает рассеивание кинетической энергии в виде тепла за счет генерации возникающих в процессе испытаний вихревых токов (токов Фуко). Анализ данных, приведенных в источниках⁷ [10; 11], позволяет выделить главное достоинство стенда – это электрическое нагружающее устройство, которое позволяет бесступенчато создавать нагрузку на валу испытуемого гидромотора в диапазонах от 0 до 712 Н·м (это позволяет проводить испытания широкой номенклатуры гидроагрегатов). Однако в одной из работ Н. А. Маслова в качестве недостатков стенда с электрическим нагружающим устройством отмечаются наличие в конструкции стенда сложных и дорогостоящих узлов, большие энергетические затраты при проведении испытаний, что за-

⁶ Земсков А. М., Ионов П. А., Столяров А. В. Методики и средства оценки технического состояния объемных гидроприводов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузовский сборник научных трудов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. С. 349–356.

⁷ AIDCO Test Systems Model 850 Hydraulic Test Center.

трудняет их использование в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров [12].

Китайская компания High Land Hydraulic Pump для проверки объемных гидроприводов предлагает комбинированный испытательный стенд YST500W. В стенде реализуется гидравлический метод нагружения, позволяющий создавать нагрузку на валу испытуемого гидромотора⁸. Нагружение осуществляется за счет дросселирования рабочей жидкости в линии нагнетания нагружающего гидромотора. Анализ работы Хайганг Динга позволил выделить следующие достоинства стенда: бесступенчатое нагружение испытуемого гидромотора в диапазонах 0...10000 Н·м; простота конструктивного исполнения; большой срок эксплуатации нагружающего гидромотора [13]. В то же время из недостатков следует отметить следующее: стенд позволяет проводить испытания только низкоскоростных гидромоторов с частотой вращения не более 1000 об/мин; не учитывается КПД нагружающего устройства и всего объемного гидропривода в целом; оценка крутящего момента производится по косвенному параметру; большая стоимость оборудования и запасных частей.

Таким образом, проведенный анализ научно-технической литературы и патентных исследований, выпускаемых и используемых в настоящее время стендов, показал, что наиболее полную оценку технического состояния объемных гидроприводов с определением всех технических характеристик гидроагрегатов дают специализированные стенды зарубежного производства, представленные отечественные стенды не позволяют достоверно оценивать техническое состояние гидроагрегатов. Это обусловлено, прежде всего, ограниченным диапазоном технических ха-

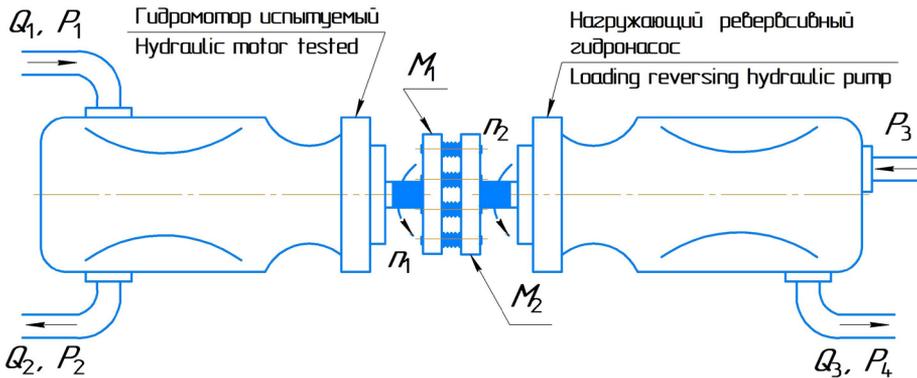
рактеристик (частоты вращения, регистрируемого значения давлений и так далее) и не способностью реализовать методику динамических испытаний предприятий-изготовителей.

Большинство отечественных организаций, занимавшихся проектированием и изготовлением новых стендов или модернизацией уже созданных, приостановило свою деятельность, а те модели, которые создаются, зачастую не соответствуют возросшим техническим требованиям. В то же время зарубежные стенды ввиду высокой стоимости в основном используются в промышленном производстве. Их внедрение в ремонтное производство экономически нецелесообразно. Поэтому на кафедре технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» была поставлена задача по разработке стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства с гидравлическим нагружающим устройством, способного реализовать методику динамических испытаний объемного гидропривода в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров.

Материалы и методы

В процессе разработки стенда использованы положения теоретической механики, теории гидрогазодинамики, основные принципы создания механизмов и машин. Для оценки технического состояния гидромотора и всего объемного гидропривода в целом на кафедре технического сервиса машин был использован метод гидравлического нагружения, описанный в одной из научных работ [8]. Метод основан на применении в качестве нагружающего устройства гидромашин. На рисунке 1 представлена схема реализации

⁸ Ярстройрезерв [Электронный ресурс]. URL: <http://www.yarsr.ru/services/gidravlicheskiy-stend/> (дата обращения: 28.10.2019).



Р и с. 1. Схема соединения испытуемого гидромотора и нагружающего реверсивного гидронасоса:
 M_1, M_2 – фактические крутящие моменты испытуемого гидромотора и реверсивного гидронасоса;
 n_1, n_2 – частоты вращения валов испытуемого гидромотора и реверсивного гидронасоса;
 Q_1, Q_2 – подача (расход) рабочей жидкости на входе и выходе испытуемого гидромотора;
 Q_3 – подача рабочей жидкости на выходе реверсивного гидронасоса;
 P_1, P_2 – давление рабочей жидкости на входе и выходе испытуемого гидромотора;
 P_3, P_4 – давление рабочей жидкости на входе и выходе реверсивного гидронасоса

F i g. 1. Connection diagram of the tested hydraulic motor and the loading reversible hydraulic pump:
 M_1, M_2 – actual torques of the tested hydraulic motor and the reversible hydraulic pump;
 n_1, n_2 – frequencies of shaft speeds of the tested hydraulic motor and the reversible hydraulic pump;
 Q_1, Q_2 – supply (flow) of the working fluid at the inlet and outlet of the tested hydraulic motor;
 Q_3 – supply of working fluid at the outlet of the reversing hydraulic pump;
 P_1, P_2 – pressure of the working fluid at the inlet and outlet of the tested hydraulic motor;
 P_3, P_4 – pressure of the working fluid at the inlet and outlet of the reversing hydraulic pump

гидравлического метода нагружения, в которой в качестве нагружающего устройства, обеспечивающего необходимый крутящий (тормозной) момент на валу испытуемого гидромотора, используется реверсивный гидронасос.

Согласно схеме испытания с использованием предлагаемого гидравлического метода нагружения (рис. 1) валы испытуемого гидромотора и нагружающего реверсивного гидронасоса соединены между собой жесткой муфтой. Поэтому частоты их вращения равны $n_1 = n_2$, также равны развиваемый и приводной моменты испытуемого гидромотора и реверсивного гидронасоса, то есть $M_1 = M_2$.

Расчет развиваемого крутящего момента испытуемого гидромотора осуществляется путем пересчета на приводной (потребляемый) крутящий момент нагружающего реверсивного гидронасоса. Тогда фактический крутящий момент M_1 , Н·м, развиваемый

испытуемым гидромотором с учетом параметров гидравлического нагружающего устройства, определяется исходя из следующего выражения [18]:

$$M_1 = M_2 = \frac{Q_3 \cdot 500 \cdot \Delta p}{\pi \cdot n_2 \cdot \eta_2^o \cdot \eta_2^g}, \quad (1)$$

где Q_3 – подача реверсивного гидронасоса, л/мин; $\Delta p = (P_4 - P_3)$ – перепад давлений в гидролиниях реверсивного гидронасоса, МПа; n_2 – частота вращения вала реверсивного гидронасоса, об/мин; η_2^o и η_2^g – объемный и гидромеханический КПД реверсивного гидронасоса (соответствуют значениям нового гидронасоса).

Полученное значение крутящего момента испытуемого гидромотора M_1 , Н·м, позволит определить его гидромеханический КПД по формуле:

$$\eta_1^g = \frac{M_1}{M_1^T}, \quad (2)$$

где M_1^T – теоретическое значение крутящего момента испытуемого гидромотора. Тогда общий КПД испытуемого гидромотора определяется по формуле:

$$\eta^m = \eta_1^o \cdot \eta_1^q, \quad (3)$$

где $\eta_1^o = Q_2 / Q_1$ – объемный КПД гидромотора; Q_1, Q_2 – подача (расход) рабочей жидкости на входе и выходе испытуемого гидромотора при номинальном значении давления P_1 .

Зная значения полного КПД испытуемого гидронасоса, можно дать оценку техническому состоянию всего гидропривода в целом. Описанная методика была положена в основу разрабатываемого стенда.

Результаты исследования

Для решения поставленной задачи авторским коллективом была предложена новая принципиальная схема стенда с гидравлическим нагружающим устройством, способным оценить техническое состояние объемного гидропривода по методике динамических испытаний предприятий-изготовителей в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров (рис. 2).

Стенд содержит частотный преобразователь 1, соединенный с электродвигателем 2, приводной вал, который муфтой 3 соединен с валом испытуемого гидронасоса 4 насосом подпитки 5 и сервораспределителем 6, линию всасывания 7 с вентилем 8, фильтром 9 со встроенным вакуумметром 10. Линия всасывания 7 соединяет гидробак 11 с входом насоса подпитки 5. Гидробак 11 оснащен указателем уровня рабочей жидкости 12, электронным термометром 13 и водяным охладителем 14. Линия управления 15 соединяет выход насоса подпитки 5 с сервораспределителем 6. Линия дренажа 16 связывает дренажные полости испытуемых гидронасоса 4 и гидромотора 17. Сливная линия 18 соединяет сливную полость гидронасоса 4 с гидробаком 11. Обратные 19,

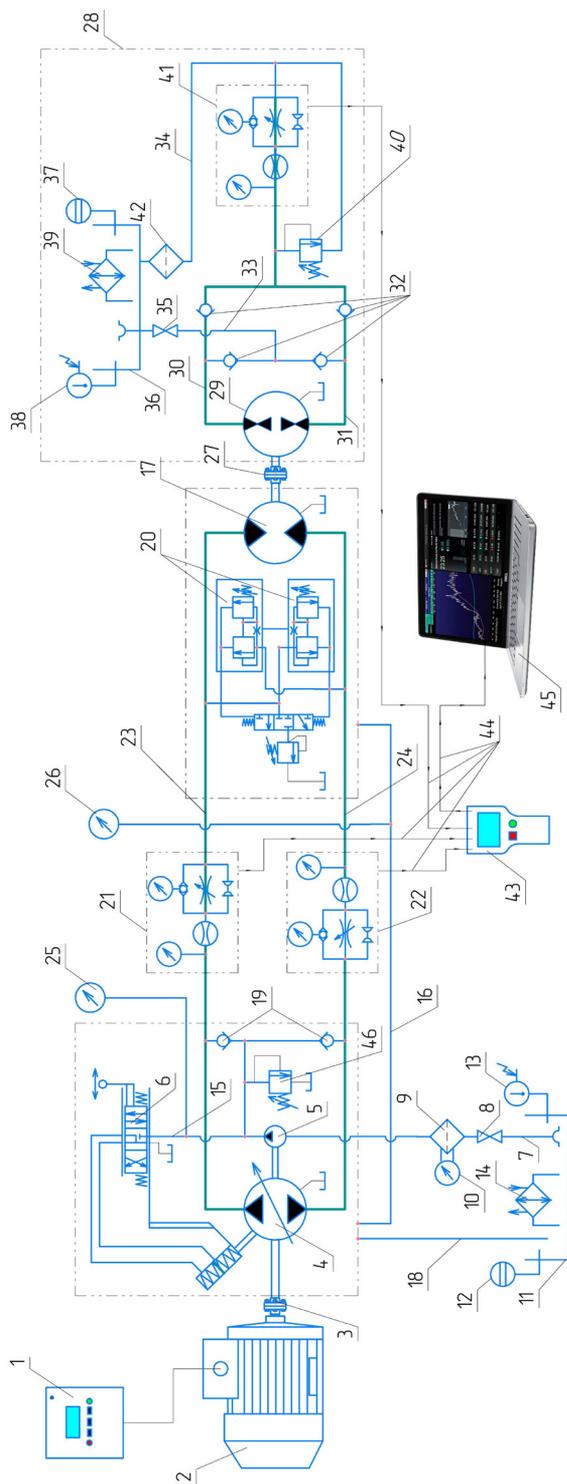
предохранительные 20 клапаны и реверсивные дроссели-расходомеры 21 и 22 установлены в линиях нагнетания 23 и 24. Линии нагнетания 23 и 24 соединяют гидронасос 4 с гидромотором 17. Манометры давления 25, 26 установлены в линиях управления 15 и дренажа 16. Выходной вал испытуемого гидромотора 17 соединен муфтой 27 с валом гидравлического нагружающего устройства 28, который обеспечивает заданный тормозной момент.

Гидравлическое нагружающее устройство 28, используемое в составе стенда, включает в себя нагружающий реверсивный гидронасос 29, приводной вал, который муфтой 27 соединен с валом испытуемого гидромотора 17. Линии нагнетания 30 и 31 через систему обратных клапанов 32 соединены с линией всасывания 33 и линией слива 34. Линия всасывания 33 с вентилем 35 соединяет реверсивный насос-мотор 29 с гидробаком 36, в котором установлены указатель уровня рабочей жидкости 37, электронный термометр 38 и водяной охладитель 39. Линия слива 34 соединяет реверсивный насос-мотор 29 через предохранительный клапан 40, реверсивный дроссель-расходомер 41 и фильтр 42 с гидробаком 36.

Реверсивные дроссель-расходомеры 21, 22 и 41 через специальные порты и электрические линии 43 соединены с платой сбора данных 44, подключенной к персональному компьютеру 45.

Для практической реализации предложенной принципиальной схемы разработана структурно-функциональная схема (рис. 3), включающая наименование и марки промышленного оборудования отдельных систем стенда.

Стенд состоит из двух блоков: обработки и измерения данных. В основе блока обработки данных лежит многофункциональная плата сбора данных National Instrument USB-68, соединенная с персональным компьютером под управлением операционной системы MS Windows 7 x86 (32-bit).



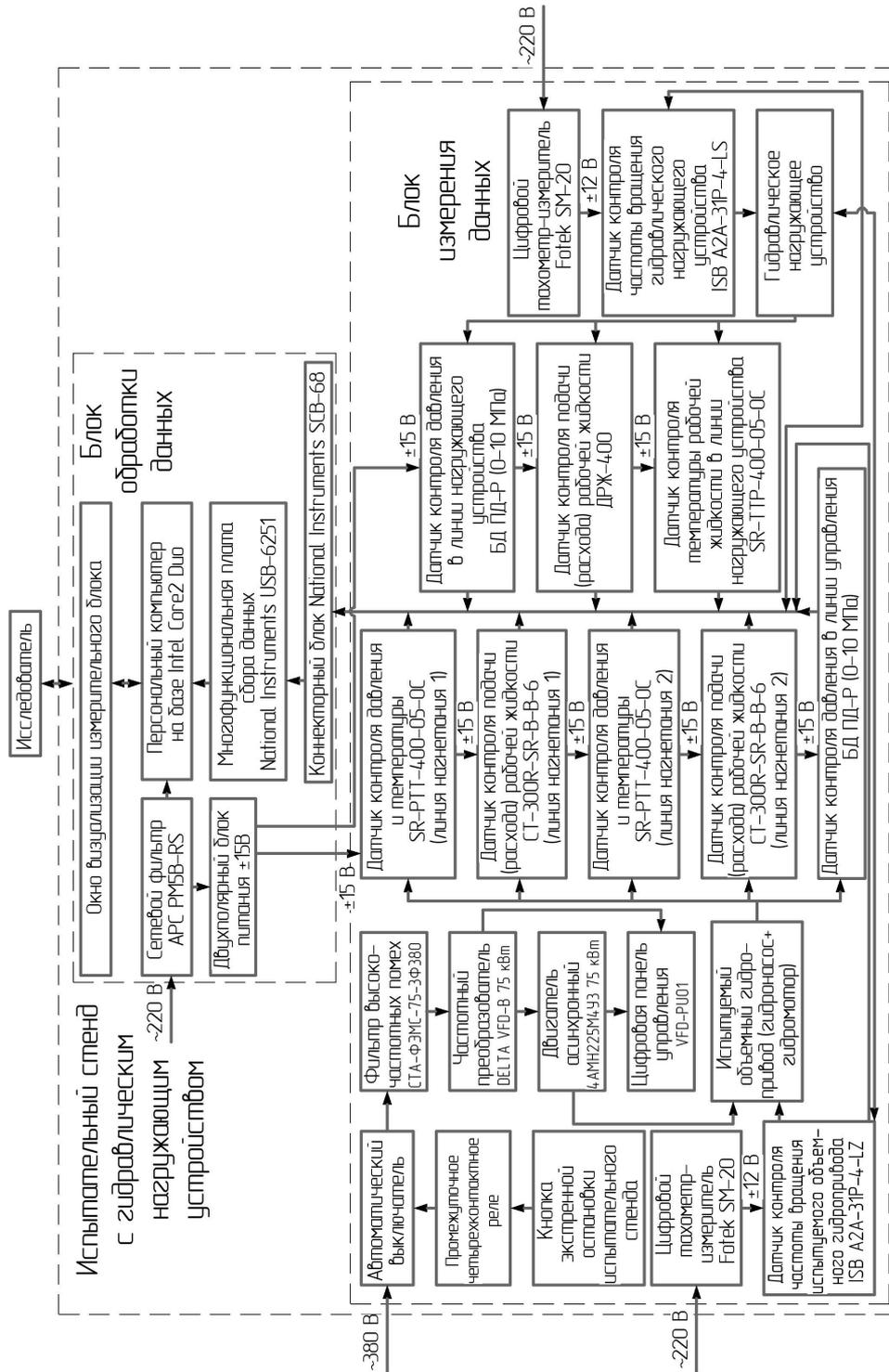
Р и с. 2. Принципиальная схема стенда с гидравлическим нагружающим устройством: 1 – частотный преобразователь; 2 – электродвигатель; 3, 27 – муфты; 4, 17 – испытуемые гидронасос и гидромотор; 5 – насос подпитки; 6 – сервораспределитель; 7, 33 – линии всасывания; 8, 35 – вентили; 9, 42 – фильтры; 10 – вакуумметр; 11, 36 – гидробаки;

12, 37 – указатели уровня рабочей жидкости; 13, 38 – электронные термометры; 14, 39 – водяные охладители;

15, 16 – линии управления и дренажа; 18, 34 – линии слива; 19, 32 – обратные клапаны; 20, 40, 46 – предохранительные клапаны; 21, 22, 41 – реверсивные дроссели-расходомеры; 23, 24, 30, 31 – линии нагнетания; 25, 26 – манометры давления;

28 – гидравлическое нагружающее устройство; 29 – реверсивный нагружающий гидронасос; 43 – электропровода; 44 – плата сбора данных; 45 – персональный компьютер

Fig. 2. Schematic diagram of the stand with a hydraulic loading device: 1 – frequency converter; 2 – electric motor; 3, 27 – couplings; 4, 17 – tested hydraulic pump and hydraulic motor; 5 – feed pump; 6 – servo distributor; 7, 33 – suction lines; 8, 35 – valves; 9, 42 – filters; 10 – vacuum gauge; 11, 36 – hydraulic tanks; 12, 37 – indicators of the working fluid level; 13, 38 – electronic thermometers; 14, 39 – the water coolers; 15, 16 – control and drainage lines; 18, 34 – drain lines; 19, 32 – check valves; 20, 40, 46 – reversible flow chokes; 21, 22, 41 – reversible flow chokes; 23, 24, 30, 31 – the discharge lines; 25, 26 – pressure gauges; 28 – hydraulic loading device; 29 – reverse loading hydraulic pump; 43 – electric wires; 44 – data collection board; 45 – personal computer



Р и с. 3. Структурно-функциональная схема стенда

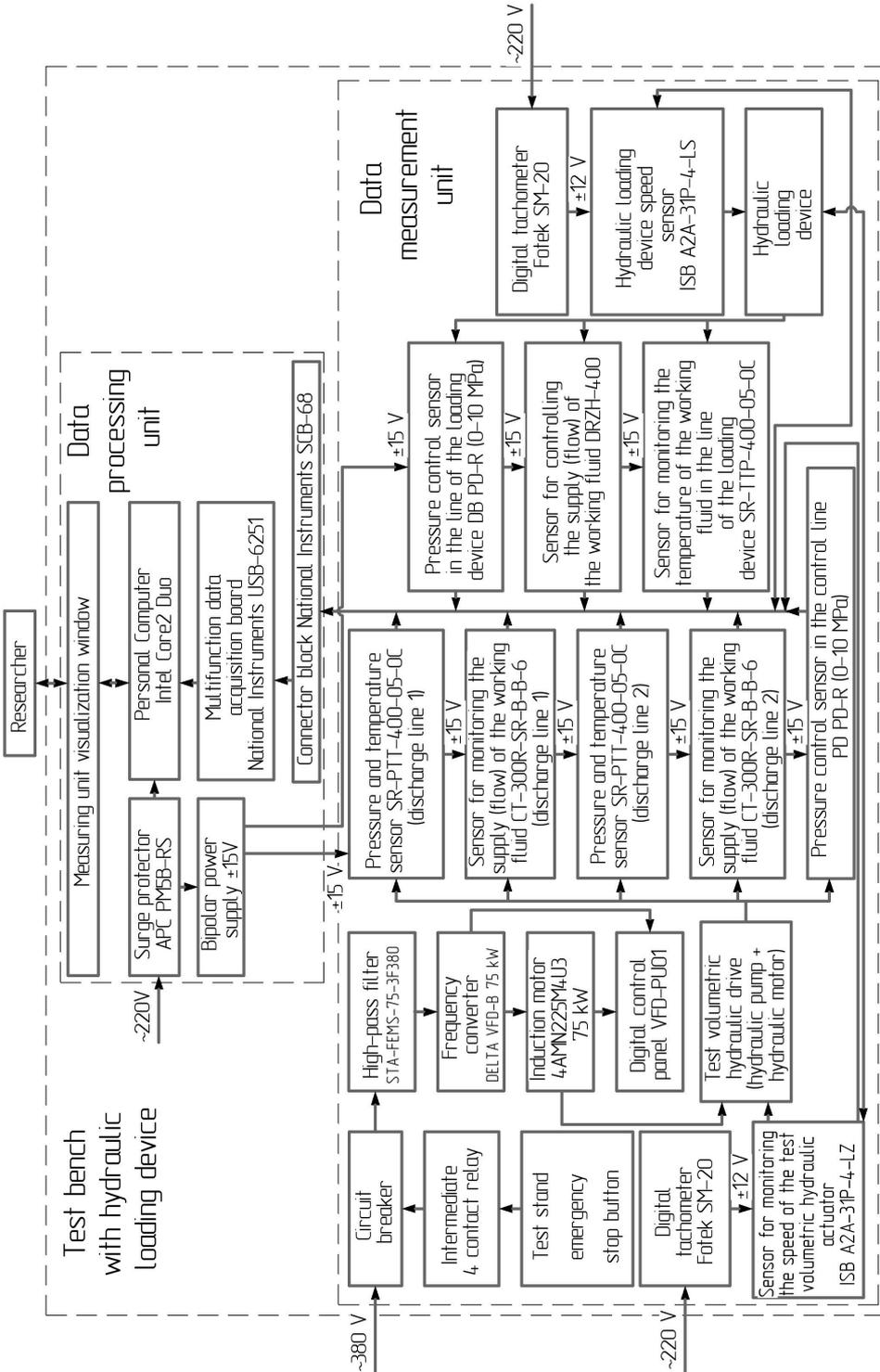
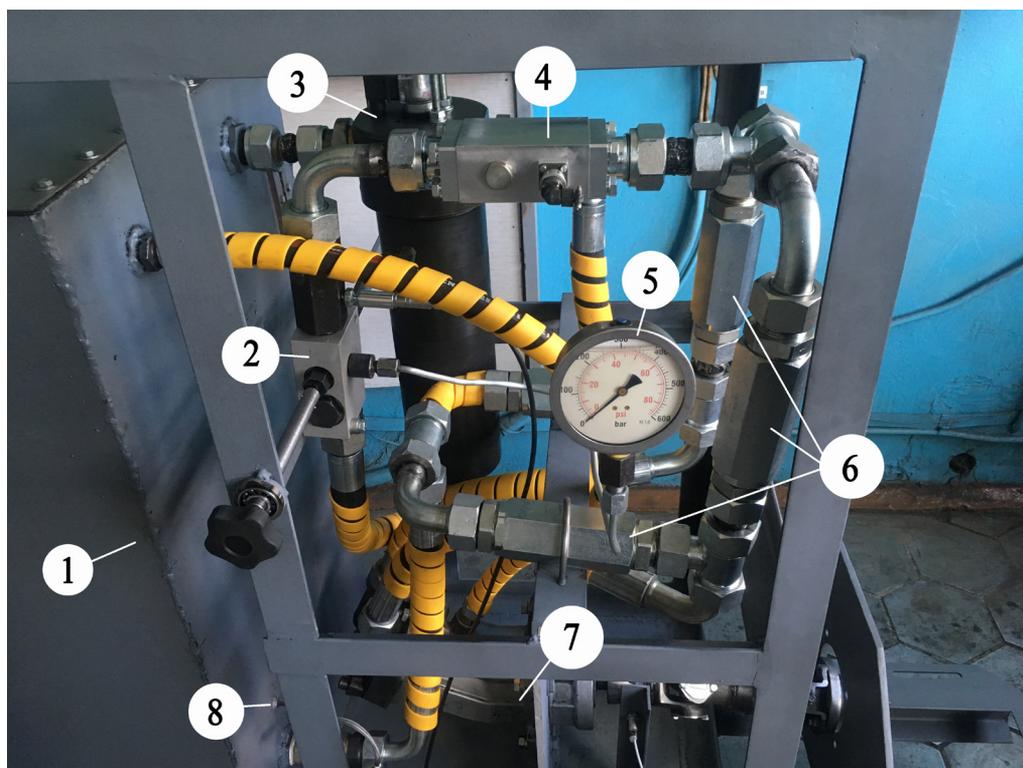


Fig. 3. Structural and functional diagram of the stand

В блоке измерения данных использовалось следующее оборудование: трехфазный асинхронный электродвигатель 4АМН225М4У3 (75 кВт), частотный преобразователь DELTA VFD-B (75 кВт/380 В), реверсивные дроссели-расходомеры СТ-300R-SR-B-B-6 (Webtec), испытуемый гидропривод, реверсивный гидронасос 310.3.112, индуктивные датчики контроля частоты вращения вала гидронасоса, гидромотора и нагружающего устройства ISB A2A-31P-4-LZ, аналоговые датчики давления и температуры SR-PTT-400-05-0C (Webtec),

портативное считывающее устройство НРМ-540-05-0С с комплектом аналоговых кабелей SR-CBL-003-55-ММ (Webtec). Рама стенда с гидравлическим нагружающим устройством и соединительные муфты были изготовлены индивидуально.

На рисунке 4 представлено гидравлическое нагружающее устройство, состоящее из нагружающего аксиально-поршневого нерегулируемого гидронасоса 310.3.112, дросселя ГТ-600М с преобразователем давления БД ПД-Р, преобразователя расхода



Р и с. 4. Гидравлическое нагружающее устройство: 1 – бак; 2 – дроссель ГТ-600М с преобразователем давления БД ПД-Р (0...60 МПа); 3 – фильтр напорный 4ФГМ32; 4 – преобразователь расхода жидкости турбинного типа ДРЖ-400 (0...500 л/мин); 5 – манометр; 6 – обратные клапаны VD7-W1/30 (трубного монтажа); 7 – нагружающий аксиально-поршневой нерегулируемый гидронасос 310.3.112; 8 – датчик температуры SR-TTP-400-05-0C (-25...+125 °C), Webtec (Англия)

F i g. 4. Hydraulic loading device: 1 – tank; 2 – GT-600M throttle with a pressure transducer BD PD-R (0 ... 60 MPa); 3 – 4FGM32 pressure filter; 4 – DRZh-400 turbine type liquid flow converter (0 ... 500 l/min); 5 – pressure gauge; 6 – VD7-W1 check valves / 30 (pipe mounting); 7 – 310.3.112 loading axial piston unregulated hydraulic pump; 8 – SR-TTP-400-05-0C temperature sensor (-25 ... + 125 ° C), Webtec (England)

турбинного типа ДРЖ-400, обратных клапанов VD7-W1/30, соединенных в единую гидросистему замкнутого типа согласно принципиальной схеме стенда (рис. 2).

Стенд работает следующим образом. Испытуемый объемный гидропривод монтируют на стенд. Пультом управления частотного преобразователя задают необходимое направление и частоту вращения приводного вала электродвигателя, который соединен с валом испытуемого гидронасоса. Рычаг управления сервораспределителя перемещают поочередно в крайние положения, при этом испытуемый гидронасос изменяет направление и объем подаваемой рабочей жидкости в линиях нагнетания, идущих к испытуемому гидромотору, вследствие чего выходной вал последнего совершает вращение (в одном из направлений) совместно с приводным валом реверсивного (нагружающего) гидронасоса, так как их валы жестко соединены между собой. Частота вращения испытуемого гидромотора варьируется путем изменения подачи рабочей жидкости (объема) испытуемого гидронасоса и определяется при помощи индуктивного датчика. При достижении рабочей жидкости своей рабочей температуры ($t = 50 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) в линиях нагнетания объемного гидропривода создают номинальное давление, установленное предприятием-изготовителем. Давление в линиях нагнетания создается гидравлическим нагружающим устройством. Торможение осуществляется в динамическом режиме, то есть вал испытуемого гидромотора вращается под заданной нагрузкой тормозного момента, созданного реверсивным (нагружающим) гидронасосом. Нагрузка (тормозной момент) задается путем изменения проходного сечения (повышения давления) при помощи реверсивного дроссель-расходомера. При изменении направления вращения вала испытуе-

мого гидромотора направление потока рабочей жидкости в гидросистеме гидравлического нагружающего устройства изменяется автоматически за счет попарного «открытия» и «закрытия» обратных клапанов. Принцип работы реверсивного гидронасоса в обоих направлениях вращения идентичен.

В процессе испытания реверсивные дроссели-расходомеры определяют подачу испытуемого гидронасоса и реверсивного гидронасоса, расход гидромотора, давление в линиях нагнетания объемного гидропривода и давление в линиях нагнетания гидравлического нагружающего устройства, а также температуру рабочей жидкости. Плата сбора данных обрабатывает информацию и передает на персональный компьютер основные технические характеристики испытуемого объемного гидропривода в заданный момент времени. Крутящий момент на валу испытуемого гидромотора определяется расчетным путем по формуле (1).

Разработанный стенд с гидравлическим нагружающим устройством позволяет расширить возможности оценки технического состояния объемных гидроприводов за счет увеличения диапазонов измеряемых (контролируемых) технических характеристик: частота вращения приводного вала от 0 до 4000 об/мин, рабочее давление в линии нагнетания от 0 до 48 МПа, подача и расход в линии нагнетания от 15 до 600 л/мин, крутящий момент на валу испытуемого гидромотора от 0 до 1000 Н·м. Стенд позволяет оценить техническое состояние наиболее распространенных объемных гидроприводов, используемых в агропромышленном комплексе, таких как: ГСТ-90, ГСТ-112 (ОАО «Пневмостроймашина» и ОАО «Гидросила»); 90R100 и 90M100 (Sauer-Danfoss); 6423-618 и 6433-113 (Eaton); BMV 70R и BMF75 (Linde); HPV105 и HMF105 (Linde); AA4VG90 и A2FM90 (Bosch Rexroth) [25].

Обсуждение и заключение

Разработанная конструкция стенда с гидравлическим нагружающим устройством позволяет в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров реализовывать методику динамических испытаний предприятий-изготовителей и с высокой точностью определять основные технические характеристики объемного гидропривода отечественного и зарубежного производства.

По целому ряду технических характеристик стенд, созданный на кафедре технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»,

превосходит существующие отечественные и зарубежные аналоги при более низкой стоимости. Гидравлическое нагружающее устройство создает, поддерживает и бесступенчато измеряет крутящий (тормозной) момент на валу испытуемого гидромотора до 1000 Н·м. Оценочная стоимость стенда – 1790000 рублей, что составляет 11 % от стоимости зарубежного аналога и 51 % от стоимости отечественного образца. Дальнейшее развитие стенда видится в разработке специализированного программного обеспечения для обработки и анализа результатов испытаний в режиме реального времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Mandal S. K., Singh A. K., Verma Y., Dasgupta K.** Performance Investigation of Hydrostatic Transmission System as a Function of Pump Speed and Load Torque // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. 2012. Vol. 93, Issue 2. Pp. 187–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40032-012-0022-4>
2. **Akkaya A. V.** Effect of Bulk Modulus on Performance of a Hydrostatic Transmission Control System // Sadhana. 2006. Vol. 31, Issue 5. Pp. 543–556. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02715913>
3. **Michelson Sh., Mueller M., Schurman B.** Hydraulic Test Bench Circuit Construction, Testing and Analysis // The Journal of Undergraduate Research. 2012. Vol. 10, Issue 9. Pp. 116–127. URL: <https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1037&context=jur> (дата обращения: 28.10.2019).
4. Стенд для испытания регулируемых аксиально-поршневых гидронасосов и гидромоторов: пат. 2381385 Рос. Федерация. № 2008137350/06; заявл. 19.09.2008; опубл. 10.02.2010. Бюл. № 4. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2381385C1_20100210.pdf (дата обращения: 28.10.2019).
5. Стенд для испытания гидромоторов: пат. 47057 Рос. Федерация. № 2005108014/22; заявл. 21.03.2005; опубл. 10.08.2005. Бюл. № 22. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU47057U1_20050810.pdf (дата обращения: 28.10.2019).
6. **Колчин А. В., Каргиев Б. Ш.** Динамические методы диагностирования гидротрансмиссии сельскохозяйственных комбайнов // Труды ГОСНИТИ. 2006. Т. 98. С. 67–71. URL: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=87482 (дата обращения: 28.10.2019).
7. **Гринчар Н. Г., Кузьмин Д. В.** Определение потребности средств диагностики для парков строительных машин // Механизация строительства. 2009. № 6. С. 16–19. URL: <https://www.rucont.ru/efd/541369> (дата обращения: 28.10.2019).
8. **Пьянзов С. В., Ионов П. А., Величко С. А., Земсков А. М.** Устройство для оценки технического состояния объемного гидропривода // Пермский аграрный вестник. 2018. № 2 (22). С. 15–22. URL: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2018/06/2-2018-15-22.pdf> (дата обращения: 28.10.2019).
9. **Маслов Н. А.** Обоснование принципиальной схемы стенда для испытаний объемных гидромашин // Главный механик. 2013. № 6. С. 56–60.
10. **Elshorbagy K. A., Kandil H., Latif M. R.** Development of a Multi-Functional Hydraulic Test Stand // Journal of Scientific and Engineering Research. 2018. Vol. 5, Issue 1. Pp. 123–132. URL: <http://jsaer.com/download/vol-5-iss-1-2018/JSAER2018-05-01-123-132.pdf> (дата обращения: 28.10.2019).

11. **Tkáč Z., Drabant Š., Majdan R., Cvičela P.** Testing Stands for Laboratory Tests of Hydrostatic Pumps of Agricultural Machinery // Research in Agricultural Engineering. 2008. Vol. 54, no. 4. Pp. 183–191. DOI: <https://doi.org/10.17221/704-RAE>

12. **Маслов Н. А.** Обоснование принципиальной схемы стенда для испытаний объемных гидромашин // Вестник машиностроения. 2014. № 6. С. 3–10. URL: https://www.mashin.ru/files/2014/ve0614_web.pdf (дата обращения: 28.10.2019).

13. **Ding H., Zhao J.** Performance Analysis of Variable Speed Hydraulic Systems with Large Power in Valve-Pump Parallel Variable Structure Control // Journal of Vibroengineering. 2014. Vol. 16, Issue 2. Pp. 1042–1062. URL: <https://jvejournal.com/article/14974> (дата обращения: 28.10.2019).

14. **Ионов П. А., Пьянзов С. В., Земсков А. М.** Обоснование технических параметров стендового оборудования для оценки технического состояния объемного гидропривода // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 128. С. 97–105. URL: http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128_2017.pdf (дата обращения: 28.10.2019).

Поступила 28.09.2019; принята к публикации 07.10.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Ионов Павел Александрович, профессор кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: S-7146-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, resurs-ime@yandex.ru

Сенин Петр Васильевич, заведующий кафедрой технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: H-1219-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, senin53@mail.ru

Пьянзов Сергей Владимирович, аспирант кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ResearcherID: B-1548-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, serega.pyanzov@yandex.ru

Столяров Алексей Владимирович, доцент кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: G-8460-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5898-0150>, cabto@mail.ru

Земсков Александр Михайлович, старший преподаватель кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: S-7748-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, ZAM503@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

П. А. Ионов – разработка метода гидравлического нагружения, принципиальной схемы стенда; П. В. Сенин – научное руководство, анализ и доработка текста; С. В. Пьянзов – подготовка текста с последующей доработкой, анализ литературных данных, разработка метода гидравлического нагружения; А. В. Столяров – подготовка и анализ литературных данных, доработка текста; А. М. Земсков – проработка структурно-функциональной схемы стенда, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mandal S.K., Singh A.K., Verma Y., Dasgupta K. Performance Investigation of Hydrostatic Transmission System as a Function of Pump Speed and Load Torque. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2012; 93(2):187-193. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s40032-012-0022-4>
2. Akkaya A.V. Effect of Bulk Modulus on Performance of a Hydrostatic Transmission Control System. *Sadhana*. 2006; 31(5):543-556. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02715913>
3. Michelson Sh., Mueller M., Schurman B. Hydraulic Test Bench Circuit Construction, Testing and Analysis. *The Journal of Undergraduate Research*. 2012; 10(9):116-127. Available at: <https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1037&context=jur> (accessed 28.10.2019). (In Eng.)
4. Stand for Testing Adjustable Axial-Piston Hydraulic Pumps and Hydraulic Motors: Patent 2381385 Russian Federation. No. 2008137350/06; appl. 19.09.2008; publ. 10.02.2010. Bulletin No. 4. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2381385C1_20100210.pdf (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
5. Hydraulic Motor Test Stand: Patent 47057 Russian Federation. No. 2005108014/22; appl. 21.03.2005; publ. 10.08.2005. Bulletin No. 22. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU47057U1_20050810.pdf (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
6. Kolchin A.V., Kargiev B.Sh. Dynamic Methods for Diagnosing the Hydrotransmission of Agricultural Combines. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2006; 98:67-71. Available at: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=87482 (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
7. Grinchar N.G., Kuzmin D.V. Determining the Need for Diagnostic Tools for Building Machine Fleets. *Mekhanizatsiya stroitelstva = Construction Mechanization*. 2009; (6):16-19. Available at: <https://www.rucont.ru/efd/541369> (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
8. Pyanzov S.V., Ionov P.A., Velichko S.A., Zemskov A.M. The Device for Assessing the Technical Condition of Hydraulic Gear. *Permskiy agrarniy vestnik = Perm Agrarian Journal*. 2018; (2):15-22. Available at: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2018/06/2-2018-15-22.pdf> (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
9. Maslov N.A. Reasoning of the Principle Scheme of a Stand for Tests of Massive Hydro Machines. *Glavnyy mekhanik = Chief Mechanical Engineer*. 2013; (6):56-60. (In Russ.)
10. Elshorbagy K.A., Kandil H., Latif M.R. Development of a Multi-Functional Hydraulic Test Stand. *Journal of Scientific and Engineering Research*. 2018; 5(1):123-132. Available at: <http://jsaer.com/download/vol-5-iss-1-2018/JSAER2018-05-01-123-132.pdf> (accessed 28.10.2019). (In Eng.)
11. Tkáč Z., Drabant Š., Majdan R., Cvičela P. Testing Stands for Laboratory Tests of Hydrostatic Pumps of Agricultural Machinery. *Research in Agricultural Engineering*. 2008; 54(4):183-191. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/704-RAE>
12. Maslov N.A. Substantiation of Principal Scheme of Bench for Tests of Positive-Displacement Hydraulic Machines. 2014; (6):3-10. Available at: https://www.mashin.ru/files/2014/ve0614_web.pdf (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
13. Ding H., Zhao J. Performance Analysis of Variable Speed Hydraulic Systems with Large Power in Valve-Pump Parallel Variable Structure Control. *Journal of Vibroengineering*. 2014; 16(2):1042-1062. Available at: <https://jvejournal.com/article/14974> (accessed 28.10.2019). (In Eng.)
14. Ionov P.A., Pyanzov S.V., Zemskov A.M. Justification of Technical Parameters of the Stand Equipment for Assessment of Technical State Volumetric Hydraulic Drive. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2017; 128:97-105. Available at: http://vims.ru/wp-content/uploads/2019/03/128_2017.pdf (accessed 28.10.2019). (In Russ.)

Received 28.09.2019; revised 07.10.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Pavel A. Ionov, Professor of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-7146-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, resurs-ime@yandex.ru

Petr V. Senin, Head of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: H-1219-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, senin53@mail.ru

Sergey V. Pyanzov, Postgraduate Student of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: B-1548-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, serega.pyanzov@yandex.ru

Aleksey V. Stolyarov, Associate Professor of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-8460-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5898-0150>, cabto@mail.ru

Alexander M. Zemskov, Senior Lecturer of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-7748-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, ZAM503@mail.ru

Contribution of the authors:

P. A. Ionov – development of the method of hydraulic loading and basic scheme of the stand; P. V. Senin – scientific guidance, analysis and improvement of the text; S. V. Pyanzov – drafting the text with further revision, analysis of literary data, development of the hydraulic loading method; A. V. Stolyarov – preparation and analysis of literary data, revision of the text; A. M. Zemskov – development of the structural and functional scheme of the stand, word processing and editing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.



Особенности расчета кинематических параметров и величины шероховатости при абразивной доводке запорных поверхностей корпусов задвижек, соединяющих трубы

В. А. Скрябин

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

(г. Пенза, Россия)

vs_51@list.ru

Введение. В статье сформулированы и обоснованы основные положения особенностей кинематики перемещения притира в процессе доводки запорных элементов задвижек, а также разработаны методики определения режимных параметров и величины шероховатости в процессе абразивной доводки уплотнительных поверхностей деталей трубопроводной арматуры.

Материалы и методы. Разработана кинематическая схема шлифовально-притирочного переносного станка для определения угловых скоростей вращения инструментального диска и притиров. На основании разработанной кинематической схемы получены аналитические зависимости для определения мощностей двигателя привода станка и резания, а также угловых и линейных скоростей вращения инструментального диска и притиров. В статье описаны траектории следов сетки точки притира при его перемещении по обрабатываемой поверхности детали трубопроводной арматуры.

Результаты исследования. Приведены примеры расчета кинематических параметров и шероховатости обработанной уплотнительной поверхности задвижки с диаметром условного прохода DN 100 по созданным аналитическим зависимостям для черновой и чистовой притирки. Рассчитаны координаты точек перемещения инструментов с визуализацией траектории движения точек с помощью специального программного продукта Lazarus. Рассчитаны координаты и построен графический след точки инструмента при его перемещении в процессе обработки. Определено расчетным путем удельное межуплотнительное пространство, характеризующее пропускную способность уплотнительных поверхностей.

Обсуждение и заключение. Выполненные расчеты позволили установить, каким образом размещать притир относительно обрабатываемой уплотнительной поверхности в плане оптимизации процесса обработки. Предварительные расчеты показали, что площадь контакта притира с обрабатываемой деталью и оптимальный угол контакта изменятся незначительно в пределах относительной погрешности 5...10%.

Ключевые слова: особенности кинематики абразивной доводки, кинематическая схема, аналитические зависимости режимных параметров и шероховатости поверхности, координаты точек перемещения инструмента, площадь контакта притира с обрабатываемой поверхностью

Для цитирования: Скрябин В. А. Особенности расчета кинематических параметров и величины шероховатости при абразивной доводке запорных поверхностей корпусов задвижек, соединяющих трубы // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 546–559. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.546-559>

© Скрябин В. А., 2019



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

Features of Calculating Kinematic and Roughness Parameters at Abrasive Finishing of Shut-Off Surfaces of Gate Valve Bodies Connecting Pipes

V. A. Skryabin

Penza State University (Penza, Russia)

vs_51@list.ru

Introduction. The author defines main provisions for peculiarities of the kinematics of plant lapping in the process of finishing shut-off elements of the valves, as well as methods for determination of operating parameters and values of roughness in the process of abrasive finishing of sealing surfaces of valves.

Materials and Methods. The kinematic scheme of grinding machines was developed to determine the angular velocity of rotation of an instrumental disc and lapping machine. Based on the developed kinematic scheme, we obtained analytical expressions to determine the capacity of the machine's drive motor and cutting elements, as well as the angular and linear speeds of rotation of tool drive and laps. There were also developed trajectory traces of grid points of the lapping tool at its movement along with the treated surface details of pipe fittings.

Results. There are given examples of calculation of kinematic parameters and roughness of the treated sealing surface of gate valves with the diameter $DN = 100$ according to established analytical dependencies for rough and finish lapping. The coordinates of the moving tools were calculated with visualization of trajectory points using special software Lazarus. The coordinates were calculated and the trace of the moving point tool was built. The specific space which characterizes the capacity of the sealing surfaces was calculated.

Discussion and Conclusion. Calculations allowed us to determine how to place the lapping tool relative to the machine's sealing surface for optimization of the treatment process. Preliminary calculations showed that the area of lapping tool's contact with the workpiece and the optimum angle of contact would change slightly within the relative probability of error of 5% and 10%.

Keywords: features of abrasive finishing kinematics, kinematic scheme, analytical dependences of operating parameters and surface roughness, coordinates of tool movement points, contact area of lapping tool with the treated surface

For citation: Skryabin V.A. Features of Calculating Kinematic and Roughness Parameters at Abrasive Finishing of Shut-Off Surfaces of Gate Valve Bodies Connecting Pipes. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):546-559. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.546-559>

Введение

Для обеспечения качественных параметров запорных элементов притиркой необходимо обращать внимание на:

– исходное состояние поверхности детали;

– скорости вращения инструментального блока и инструментов для абразивной доводки (их величины зависят от характера доводочной операции);

– давление (усилие прижима) при-тира на обрабатываемые поверхности;

– состав абразивной рабочей среды.

При производстве или ремонте запорных (уплотнительных) деталей трубопроводной арматуры (в частности при мелком ремонте, то есть восстановлении уплотнительных поверхностей корпусов клиновых задвижек) необходимым параметром является герметичность затвора. Для этого необходимо получить заданные качественные характеристики уплотнительных поверхностей на специальном станке

ГАКС-Ф-4¹ [1–3] с определенным сочетанием движений притира и рабочего диска (рис. 1):

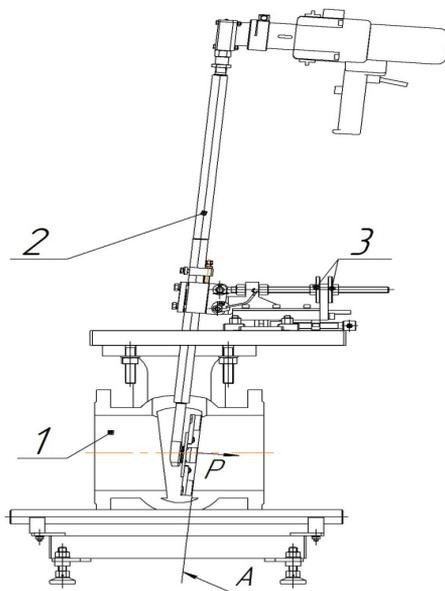
– главного движения (вращения диска, на котором закреплен инструмент, непосредственно от двигателя);

– движения, обеспечивающего равномерную обработку (вращения инструмента вокруг своей оси).

Плотность (непроницаемость уплотнительных поверхностей деталей арматуры-задвижки и корпуса) в процессе ремонта достигается абразивной доводкой. К уплотнительным поверхностям деталей трубопроводной арматуры, обработанным доводкой, предъявляются следующие требования: шероховатость поверхности не ниже $R_a = 0,08$ мкм, отклонения от плоскостности до 1 мкм.

Обзор литературы

При абразивной доводке запорных поверхностей деталей трубопроводной арматуры основным недостатком является отсутствие основных положений особенностей кинематики движения инструмента относительно обрабатываемых уплотнительных поверхностей деталей трубопроводной арматуры. Отсутствуют также методики определения режимных параметров и величины шероховатости в процессе абразивной доводки уплотнительных поверхностей² [2–5]. Неполностью раскрыты вопросы настройки технологического оборудования перед притиркой поверхностей. Все это негативным образом влияет на производительность и качество процесса обработки и требует



Р и с. 1. Схема переносного станка для абразивной доводки
1 – обрабатываемый корпус; 2 – станок; 3 – регулировочные винты для приложения усилия;
А – обрабатываемая уплотнительная поверхность корпуса задвижки

Fig. 1. Scheme of portable machine for abrasive finishing
1 – treated housing; 2 – machine; 3 – adjustment screws for force application;
А – machined sealing surface of the gate valve body

¹ Сейнов С. В., Сейнов Ю. С., Маргьнов А. Н. Технологии и оборудование для притирки уплотнений арматуры: технич. справочник. М.: Прондо, 2013. 250 с. URL: <http://tpkom.com/book/book.php?ID=1414.5> (дата обращения: 30.08.2019).

² Там же.

применения соответствующих технических и технологических решений. Большой вклад в создание установок для абразивной доводки уплотнительных поверхностей деталей трубопроводной арматуры внесли ученые и инженеры немецких фирм, в том числе Л. В. Молчанова, генеральный директор концерна Unigrind-SLIM, и Якоб Вост, генеральный директор концерна EFCO-HSL, а также российские ученые и специалисты: С. В. Сейнов, А. К. Адаменков, В. А. Поляков, В. К. Погодин и др. Однако конструкции установок немецких фирм при всей их оригинальности обладают определенными недостатками: малая мощность электро- или пневмодвигателя, по сравнению с российской фирмой «ГАКС-РЕМ-АРМ», и малая глубина погружения шинделя с инструментальным диском, оборудованным притирами, не позволяют обеспечить высокую производительность и заданные качественные параметры при абразивной доводке крупногабаритных корпусов клиновых задвижек с диаметром условного прохода $DN = 1000 \dots 1400$ мм и глубиной погружения $L = 1200 \dots 1400$ мм. Одними из первых предприятий в России по производству вышеуказанных установок и по технологии шлифования и доводки запорных поверхностей деталей трубопроводной арматуры являются «ГАКС-АРМ-Сервис» и «ГАКС-РЕМ-АРМ» в составе «ГАКС-АРМ-Сервис», генеральным директором которых является Ю. С. Сейнов, а президентом – профессор С. В. Сейнов. Значительный вклад в вопросы настройки переносных станков для абразивной доводки и создания методики определения режимных параметров и величины шероховатости процесса абразивной доводки уплотнительных поверхностей, а также в вопросы выбора рациональных абразивных материалов и смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), внес ведущий эксперт вышеуказанных предприятий профессор В. А. Скрябин.

Материалы и методы

При решении данной задачи необходимо определить траекторию движения инструмента. Для этого выполним расчет по определению кинематических параметров и шероховатости обработанной уплотнительной поверхности задвижки с диаметром условного прохода $DN 100$ по схеме, приведенной на рисунке 2. Определяем размеры OA и AC [4–7].

На рисунке 3 показан инструментальный блок 1 с расположенными на нем пластинами 2, на которых закрепляются инструменты 3.

Наружные диаметры инструментальных блоков $D = \emptyset 116,5 \dots 241$ мм; $D_{\text{инструмента}} = 40$ мм; $D_{\text{диска}} = 40$ мм.

Из рисунков 2 и 3: OA – расстояние от центра инструментального блока до центра инструмента; $OA = 116,5/2 - 40/2 = 58,25 - 20 = 38,25$ мм; AC – расстояние от центра инструментального блока до середины обрабатываемой уплотнительной поверхности; H – ширина уплотнительной поверхности.

Для $DN 100 - H = \frac{D_{\text{max}} - D_{\text{min}}}{2}$, $H =$

$= (125 - 110)/2 = 7,5$ мм. Из рисунка 2:

$AC = \frac{D_{\text{инструмента}}}{2} - \Delta - \frac{H}{2}$, где Δ – вылет инструмента за край уплотнительной поверхности для исключения его торможения за счет разности линейных скоростей вращения инструментального блока V_A и инструмента V_C , $\Delta \approx 5$ мм.

$$AC = \frac{40}{2} - 5 - 3,75 = 11,25 \text{ мм.}$$

Мощность резания определяется по формуле:

$$N_{\text{рез}} = n \cdot R_p \cdot V_C,$$

где n – число одновременно работающих инструментов; R_p – сила резания; V_C – линейная скорость точки приложе-

ния силы сопротивления. Сила резания подсчитывается по формуле:

$$R_p = f \cdot F_{\text{пр}},$$

где f – коэффициент (трения) сопротивления между инструментом и обрабатываемой поверхностью; $F_{\text{пр}}$ – усилия прижима инструмента к обрабатываемой поверхности. По производственным данным при чистовой притирке V_C ограничивают значениями 0,25...0,5 м/с, а при черновой притирке V_C ограничивают значениями 0,4...2 м/с.

Коэффициент трения f между абразивным инструментом и обрабатываемой поверхностью из легированной стали изменяется в диапазоне 0,1...0,4. В этом случае $N_{\text{рез}} = n \cdot f \cdot F_{\text{пр}} \cdot V_C$.

Для определения усилия прижима инструмента к обрабатываемой поверхности $F_{\text{пр}}$ приведем таблицу 1. Все рекомендуемые усилия прижима в таблице 1 являются данными, полученными в результате производственных испытаний на базе ООО «ГАКС-РЕМ-АРМ (г. Пенза).

Таблица 1

Table 1

Рекомендуемые значения усилия прижима
Recommended values of the clamping force

DN – диаметр условного прохода, мм // DN – diameter of the conditional pass, mm	50	80	100	150	200	400	600	800	1000	1200
S – суммарная площадь контакта инструментов с обрабатываемой поверхностью, cm^2 // S – total contact area of the tools with the work, cm^2	11	20	28	47	85,4	193,2	290	617	805	1160
$F_{\text{пр}}(F)$ ($P = 0,1$ МПа) – усилие прижима инструмента к обрабатываемой поверхности детали $F_{\text{пр}}$, кг, и соответствующее ему давление P , МПа // $F_{\text{пр}}(F)$ ($P = 0,1$ МПа) – tool clamping force on the work piece surface $F_{\text{пр}}$, kg, and pressure P , МПа	11	20	7	8	10	20	24	30	30	36
$F_{\text{пр}}(F)$ ($P = 0,04$ МПа) – усилие прижима инструмента к обрабатываемой поверхности детали $F_{\text{пр}}$, кг, и соответствующее ему давление P , МПа // $F_{\text{пр}}(F)$ ($P = 0,04$ МПа) – tool clamping force on the work piece surface $F_{\text{пр}}$, kg and P , МПа	4,4	8	2,6	3	4	7,7	9,6	12	12	15
$F_{\text{пр}}(F)$ ($P = 0,15$ МПа) – усилие прижима инструмента к обрабатываемой поверхности детали $F_{\text{пр}}$, кг, и соответствующее ему давление P , МПа // $F_{\text{пр}}(F)$ ($P = 0,15$ МПа) – tool clamping force on the work piece surface $F_{\text{пр}}$, kg) P , МПа	16,5	30	8,5	12	15	30	36	45	45	54

$N_{\text{рез}} = 3 \cdot 0,2 \cdot 70 \cdot 0,3 = 12,6 \text{ Н} \cdot \text{м/с} = 12,6 \text{ Вт} = 0,0126 \text{ кВт}$ – чистовая притирка.

$N_{\text{рез}} = 3 \cdot 0,2 \cdot 85 \cdot 0,4 = 20 \text{ Н} \cdot \text{м/с} = 26 \text{ Вт} = 0,02 \text{ кВт}$ – черновая притирка.

Угловая скорость вращения инструмента определяется по следующей зависимости (рис. 2) [4; 8; 9]:

$$\omega_2 = \frac{n \cdot f \cdot F_{\text{пр}} \cdot \omega_1 \cdot OA - N_{\text{рез}}}{n \cdot f \cdot F_{\text{пр}} \cdot AC},$$

где n – число одновременно работающих инструментальных головок; $R_p = f \cdot F_{\text{пр}}$ – сила резания; ω_1, ω_2 – угловые скорости двигателя привода и инструмента; OA, AC – плечи приложения движущей силы $P_{\text{дв}}$ от привода, приложенной в точке A и результирующей силой резания R_p ; f – коэффициент (трения) сопротивления между инструментом и обрабатываемой поверхностью; $F_{\text{пр}}$ – усилия прижима инструмента к обрабатываемой поверхности. Мощность резания и мощность двигателя привода связаны соотношением:

$$N_{\text{рез}} \leq \eta \cdot N_{\text{дв}}$$

где η – КПД привода ($\eta \approx 0,9$).

Результаты исследования

Мощность двигателя связана с моментом вращения двигателя привода зависимостью:

$$\eta \cdot N_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} \cdot \omega_1.$$

Угловая скорость двигателя определяется следующим образом:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n}{60}.$$

По производственным данным технологических процессов ООО «ГАКС-РЕМ-АРМ» $n_1 = 120 \text{ мин}^{-1}$ при черновой притирке. Тогда:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n}{60} = \frac{6,28 \cdot 120}{60} = 12,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

При получистовой и чистовой притирке:

$$\omega_1 = \frac{6,28 \cdot 100}{60} = 10,4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

При чистовой притирке:

$$M_{\text{дв}} = \frac{\eta \cdot N_{\text{дв}}}{\omega_1} = \frac{0,9 \cdot 2}{12,6} = 0,16 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

При черновой притирке:

$$M_{\text{дв}} = \frac{\eta \cdot N_{\text{дв}}}{\omega_1} = \frac{0,9 \cdot 2}{10,4} = 0,18 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Угловая скорость инструмента ω_2 для чистовой притирки определяется как:

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \frac{3 \cdot 0,2 \cdot 70 \cdot 10,4 \cdot 38,25 \cdot 10^{-3} - 12,6}{3 \cdot 0,2 \cdot 70 \cdot 11,25 \cdot 10^{-3}} = \\ &= \frac{4,1}{0,47} = 8,72 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Определим линейную скорость инструмента по зависимости:

$$V_2 = \omega_2 \cdot R,$$

где R – радиус инструмента.

$$V_2 = 8,72 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,174 \frac{\text{м}}{\text{с}} (10,44 \frac{\text{м}}{\text{мин}}).$$

В соответствии с производственными данными по предприятиям России и литературным источникам окружная скорость при чистовой притирке ограничивается значениями не более 0,5..0,8 м/с и рекомендуется задавать ее в диапазоне 0,2...0,5 м/с.

Давление притира на обрабатываемую поверхность определяется как:

$$P = \frac{F_{\text{пр}}}{S} = \frac{7}{28} = 0,25 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 0,025 \text{ МПа}.$$

Среднее давление по таблице 1: $P = 0,04 \dots 0,1$ МПа ($0,4 \dots 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$).

По производственным и литературным данным давление при чистой притирке находится в диапазоне $0,05 \dots 0,12$ МПа.

Определим скорость вращения диска с инструментами:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D_{\text{диска}} \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 116,5 \cdot 100}{1000} \approx 37 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$$

Шероховатость обработанной поверхности при плоской притирке, согласно исследованиям П. Н. Орлова (МГТУ им. Н. Э. Баумана), определяется по следующей зависимости:

$$R_a = C_{R_a} \cdot P^y \cdot HB^{-m} \cdot d,$$

где C_{R_a} – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, абразива и других условий обработки; P – давление притира на обрабатываемый материал; HB – твердость обрабатываемого материала; d – диаметр абразивных зерен. Для наплавленной поверхности из высоколегированной стали марки Св-15Х18Н12С4ТЮ $HB = 120 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$. $P = 0,4 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ ($0,04$ МПа), $y = 1$, $m = -1$, абразивный материал – микрошлифпорошки М10(F800) электрокорунда хромтитанистого марок 91А...95А; $C_{R_a} = 235 \dots 280$.

$$R_a = 235 \cdot 0,4^1 \cdot (120 \cdot 10^2)^{-1} \cdot 10 \approx 0,07 \text{ мкм.}$$

Угловая скорость инструмента ω_2 для черновой притирки определяется как:

$$\omega_2 = \frac{3 \cdot 0,25 \cdot 85 \cdot 12,6 \cdot 38,25 \cdot 10^{-3} - 20}{3 \cdot 0,25 \cdot 85 \cdot 11,25 \cdot 10^{-3}} = \frac{10,7}{0,7} = 15,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$V_2 = 15,2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,31 \frac{\text{м}}{\text{с}} (18,6 \frac{\text{м}}{\text{мин}}).$$

При механической доводке плоских наружных поверхностей рациональные значения давлений в соответствии с производственными и литературными данными скорости вращения притира составляют для предварительной притирки и изменяются в диапазоне $0,5 \dots 2$ м/с.

$$P = \frac{F_{\text{пр}}}{S} = \frac{10,5}{28} = 0,4 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 0,04 \text{ МПа} \\ (0,15 \text{ МПа}).$$

Определим скорость вращения диска с инструментами:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D_{\text{диска}} \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 116,5 \cdot 120}{1000} \approx 43,92 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$$

По производственным и литературным данным, давление при черновой притирке находится в диапазоне $0,12 \dots 0,2$ МПа. В качестве абразивного материала используются микрошлифпорошки М14(F600) электрокорунда хромтитанистого марок 91А...95А; $C_{R_a} = 235 \dots 280$ [10–14].

$$R_a = 280 \cdot 1,5^1 \cdot (120 \cdot 10^2)^{-1} \cdot 14 \approx 0,56 \text{ мкм.}$$

Вследствие того, что построение траекторий движения инструмента связано с достаточно трудоемкими и длительными по времени вычислениями, следует использовать программный продукт, который позволит быстро и точно рассчитать положение заданных точек в определенный момент времени.

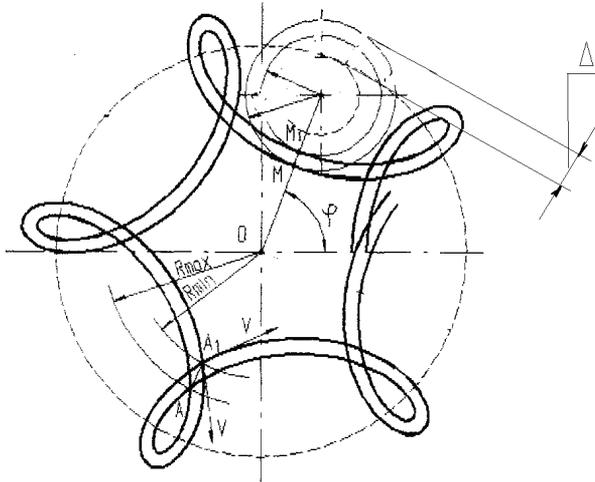
Визуализация траектории движения точек инструмента выполнена с помощью программного продукта Lazarus (симбиоз программ DELFI и C++).

Одним из важных вопросов стабильного обеспечения качества обработки поверхностей деталей является управление траекторией движения притира.

На рисунке 4 показан след точки притира по обрабатываемой поверхности.

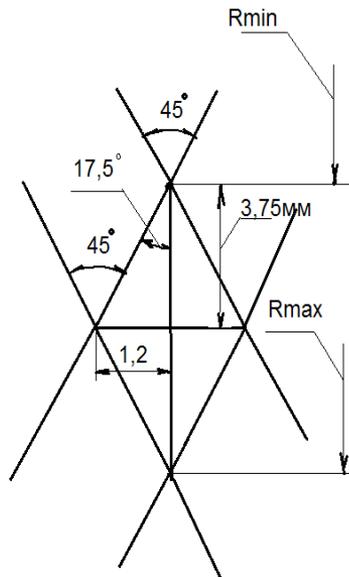
На рисунке 5 приведено графическое изображение следов сетки точки притира на обрабатываемой поверхности.

Анализ теоретических результатов исследований сложного движения пластин показывает влияние следа точки инструмента по обрабатываемой уплотнительной поверхности на качество обработки поверхностей деталей. Из



Р и с. 4. След точки притира по обрабатываемой поверхности

F i g. 4. Trace of the point of lapping on the processed surface



Р и с. 5. Графическое построение следов сетки точки притира на обрабатываемой поверхности с помощью программы Lazarus

F i g. 5. Graphic construction of traces of the point of lapping on the processed surface with the help of the program Lazarus

рисунков 4 и 5 следует, что равномерная сетка при пересечении рисок от наложения двух движений получилась за счет плавной и равномерной скорости движения инструмента по траектории, стабильной величины давления притира на обрабатываемую поверхность по всей ее площади. Это уменьшает завал торцевой уплотнительной плоскости и способствует достижению заданных параметров качества поверхности.

Удельное междууплотнительное пространство определяется в соответствии с литературным источником³ [10] по следующей зависимости:

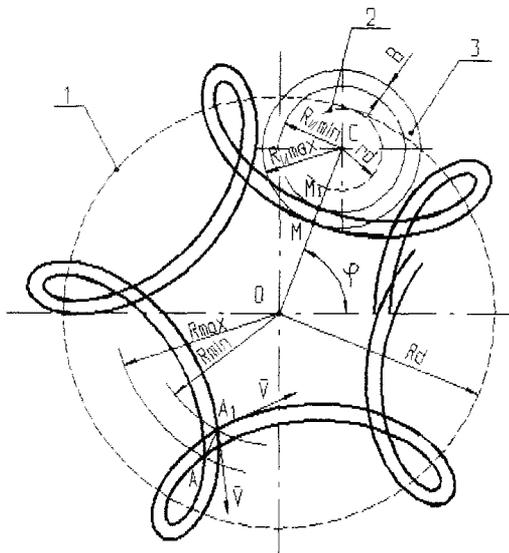
$$S_{\text{мп}} = R_{\text{max}} \cdot L \cdot K,$$

где L – базовая длина, мм; K – коэффициент, учитывающий незаполненное пространство профиля.

При чистовой доводке уплотнительных поверхностей согласно предшествующим расчетам $Ra = 0,07$ мкм, $R_{\text{max}} = 0,4$ мкм, $L = 0,25$ мм, $K = 0,5$.

$$S_{\text{мп}} = 0,4 \cdot 250 \cdot 0,5 = 50 \text{ мкм}^2.$$

Эта величина хорошо соответствует величине удельного междууплотнительного пространства, определенного экспериментальным путем на предприятии ООО «ГАКС-АРМ-СЕРВИС».



Р и с. 6. Положение притира 3 слева от обрабатываемой уплотнительной поверхности: Ru_{min} и Ru_{max} – минимальный и максимальный радиусы рабочей поверхности притира; R_{min} и R_{max} – минимальный и максимальный радиусы обрабатываемой уплотнительной поверхности; φ – угол поворота водила с инструментом; M , M_1 , A и A_1 – точки начала и конца рабочей поверхности притира; r_a и R_a – радиусы окружностей, описываемых при вращении вала крепления притира при вращении его вокруг своей оси 2 и вокруг оси инструментального блока 1; \vec{V} – вектор линейной скорости вращения инструмента

Fig. 6. Position of lapper 3 to the left of the machined sealing surfaces: Ru_{min} and Ru_{max} – minimum and maximum radii of the working surface of the lapper; R_{min} and R_{max} – minimum and maximum radii of the processed sealing the surface; φ – angle of rotation of the carrier with the tool; M , M_1 , A and A_1 – start and end points of the working surface of the lapper; r_a and R_a are the radii of the circles described by the rotation of the shaft mounting lapper by rotating it around its axis 2 and axis tools instrumental block 1; \vec{V} is the vector of linear speed of rotation of the tool

³ Там же.

Обсуждение и заключение

Анализ представленных результатов позволил решить вопрос о месте расположения притиров на инструментальном блоке относительно обрабатываемых уплотнительных поверхностей (рис. 6).

Диаметр посадочной поверхности притира $D_d = 13$ мм для $DN 100$. Таким образом, ширина рабочей поверхности притира:

$$B = \frac{D_{\text{инструмента}} - D_d}{2} = \frac{40 - 13}{2} = 13,5 \text{ мм.}$$

$R_{\max} = 20$ мм, $R_{\min} = 6,5$ мм. С учетом выхода верхней точки притира относительно верхней точки обрабатываемой уплотнительной поверхности на величину $\Delta \approx 5$ мм контакт притира с обрабатываемой поверхностью детали происходит по размеру 8,5 мм и на 1 мм перекрывает ширину уплотнительной поверхности $H = 7,5$ мм.

Оптимальный сектор контакта притира и уплотнительной поверхности, рекомендуемый для благоприятных условий вращения абразивного инструмента определяется следующим образом из рисунка 7:

Из рассмотрения треугольника $AOK - OK$ определяется как:

$$OK = d/2 - \Delta - 7,5 - 1 = 20 - 5 - 7,5 - 1 = 6,5 \text{ мм.}$$

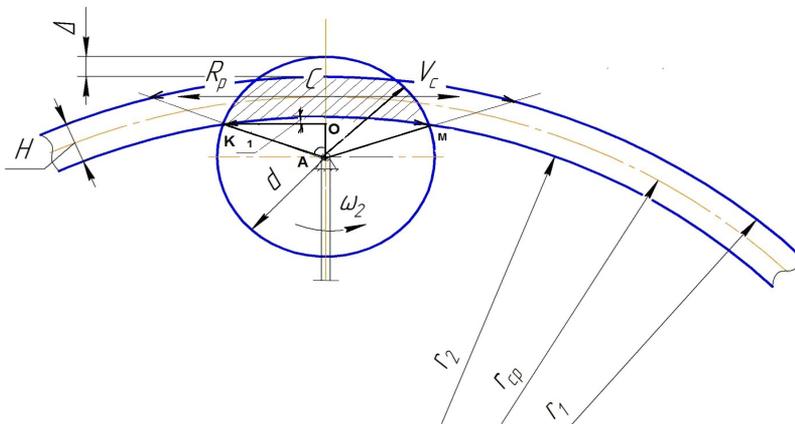
\sin угла $AKO = OA/AK$; \sin угла $AKO = 6,5/20 = 0,325$; Угол $AKO = 19^\circ$. Угол $OAK = 90^\circ - 19^\circ = 71^\circ$. Оптимальный угол контакта KAM равен 142° .

На рисунке 8 положение притира изображено справа от уплотнительной поверхности.

Предварительные расчеты показали, что площадь контакта и оптимальный угол контакта изменятся незначительно в пределах относительной погрешности 5...10 %.

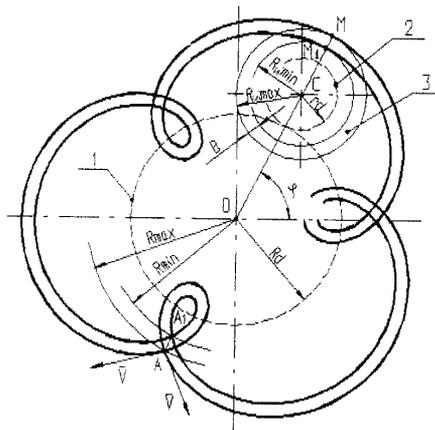
Экспериментально установлено, что при настройке переносного станка более предпочтительным будет расположение притира 3 слева от обрабатываемой поверхности, так как схема, предложенная на рисунке 8, обладает рядом существенных недостатков:

1. Увеличение плеча OC инструментального диска примерно на 15...20 мм с учетом того, что он изготовлен из алюминиевого сплава, уменьшает



Р и с. 7. Определение оптимального угла контакта абразивного инструмента с уплотнительной поверхностью

F i g. 7. Determination of the optimum contact angle of the abrasive tool with the sealing surface



Р и с. 8. Положение притира 3 справа от обрабатываемой уплотнительной поверхности F
 F i g. 8. Position of the lapper 3 to the right of the machined sealing surface

жесткость инструментальной системы и повышает ее вибрации, что негативно влияет на качественные параметры обрабатываемой поверхности.

2. Кроме того, это может привести к проблеме размещения инструментов на обрабатываемой уплотнительной поверхности деталей трубопроводной арматуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адаменков А. К., Поваров В. П., Шаранов С. В. Диагностика электроприводной арматуры с использованием комплекса ПКСД-01 // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 16. С. 23–27.
2. Oren J. W. Design Considerations of Deflection in a Rigid Flange Gasket Joint // SAE Transactions. 1983. Vol. 92. Pp. 817–828. URL: https://www.jstor.org/stable/44644415?seq=1#page_scan_tab_contents (дата обращения: 30.08.2019).
3. Скрыбин В. А., Павлова Ж. В. Модернизация переносного станка для шлифования и притирки уплотнительных поверхностей затворов задвижек трубопроводной арматуры // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 2. С. 8–13. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2227 (дата обращения: 30.08.2019).
4. Скрыбин В. А., Желтова Ж. В. Определение траектории движения инструмента при абразивной доводке уплотнительных поверхностей деталей трубопроводной арматуры // Машиностроитель. 2015. № 5. С. 20–24.
5. Скрыбин В. А. Этапы обработки при восстановлении запорных деталей трубопроводной арматуры // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 2. С. 228–245. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201602.228-245>
6. Sarda S. P., Le Tirant P., Baron G. Influence Des Contraintes Et De La Pression De Fluide Sur Le Cou Lement Dans Les Rocked Fissurees // Advances of Rock Mechanics. 1974. Vol. 2. Pp. 667–673.
7. Gläser H. Eine Methode der näherungsweise Berechnung der Dichtungskennwerte für Metalledichtungen der ND-Technik anhand mechanischer Ersatzmodelle – 4 Int. Dichtungstag. Dresden, 1970. Pp. 420–444.
8. Gane N., Skinner J. The Friction and Scratch Deformation of Metals on a Micro Scale // Wear. 2005. Vol. 24, Issue 2. Pp. 207–217. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90233-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90233-0)

9. Macdonald I. F., El-Sayed M. S., Mow K., Dullien F. A. L. Flow through Porous Media-the Ergun Equation Revisited // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1979. Vol. 18, no. 3. Pp. 199–208. DOI: <https://doi.org/10.1021/i160071a001>

10. Поляков В. А., Шестаков Р. А., Комаров Д. Н. Комплексная параметрическая методика обнаружения утечек и несанкционированных взрывов на трубопроводах // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. 2018. № 1 (65). С. 40–44.

11. Исследование влияния эксплуатационных параметров на ресурс и герметичность затворного узла трубопроводной арматуры / В. К. Погодин [и др.] // *Арматуростроение*. 2004. № 5. С. 64–67.

12. Krause H. Tribochemical Reactions in the Friction and Wearing Process of Iron // *Wear*. 1971. Vol. 18, Issue 5. Pp. 403–412. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(71\)90004-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(71)90004-4)

13. Огар П. М., Тарасов В. А., Ключев Е. А., Максимова О. В. Влияние толщины покрытия на упругую характеристику слоистого упругого полупространства // *Механика XXI века*. 2007. С. 321–327.

14. Адаменков А. К., Веселова И. Н., Рясный С. И. Метод выбора трубопроводной арматуры АЭС, подлежащей ремонту по техническому состоянию // *Тяжелое машиностроение*. 2008. № 10. С. 8–11.

Поступила 11.02.2019; принята к публикации 18.04.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторе:

Скрябин Владимир Александрович, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440000, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), доктор технических наук, ResearcherID: R-2385-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Adamenkov A.K., Povarov V.P., Sharanov S.V. Diagnostics of Electric Actuators with the Use of PKSD-01 Complex. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texnicheskie nauki* = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series. 2006; (16):23-27. (In Russ.)

2. Oren J.W. Design Considerations of Deflection in a Rigid Flange Gasket Joint. *SAE Transactions*. 1983; 92:817-828. Available at: https://www.jstor.org/stable/44644415?seq=1#page_scan_tab_contents (accessed 30.08.2019). (In Eng.)

3. Skryabin V.A., Pavlova G.V. Technology of Repair of Corps of Bolt of Pipeline Armature. *Remont, vosstanovleniye, modernizatsiya* = Repair, Renewal, Modernization. 2015; (2):8-13. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2227 (accessed 30.08.2019). (In Russ.)

4. Skryabin V.A., Zheltova Zh.V. Determination of Trajectory of Motion of Instrument at the Abrasive Polishing of Packer Surfaces of Details of Pipeline Armature. *Mashinostroitel* = Mechanical Engineer. 2015; (5):20-24. (In Russ.)

5. Skryabin V.A. The Processing Steps in the Renew of Plug-Forming Details of Pipeline Fittings. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2016; 26(2):228-245. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201602.228-245>

6. Sarda S.P., Le Tirant P., Baron G. Influence Des Contraintes Et De La Pression De Fluide Sur Le Cou Lement Dans Les Rocked Fissurees. *Advances of Rock Mechanics*. 1974; 2:667-673. (In Fr.)

7. Gläser H. Eine Methode der näherungsweise Berechnung der Dichtungskennwerte für Metall-dichtungen der ND-Technik anhand mechanischer Ersatzmodelle – 4 Int. Dichtungstag. Dresden; 1970. p. 420–444. (In Ger.)

8. Gane N., Skinner J. The Friction and Scratch Deformation of Metals on a Micro Scale. *Wear*. 2005; 24(2):207-217. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90233-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90233-0)
9. Macdonald I.F., El-Sayed M.S., Mow K., Dullien F.A.L. Flow through Porous Media-The Ergun Equation Revisited. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1979; 18(3):199-208. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1021/i160071a001>
10. Polyakov V.A., Shestakov R.A., Komarov D.N. Complex Parametric Method of Leakage Detection and Unauthorized Taps on Pipelines. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika* = Pipeline Transport: Theory and Practice. 2018; (1):40-44. (In Russ.)
11. Pogodin V.K., Drevin A.K., Mixajlyuk E.A., et al. The Study of the Influence of Operational Parameters on the Service Life and Tightness of the Gate Valve of Pipeline Valves. *Armaturostroenie* = Fittings. 2004; (5):64-67. (In Russ.)
12. Krause H. Tribochemical Reactions in the Friction and Wearing Process of Iron. *Wear*. 1971; 18(5):403-412. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(71\)90004-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(71)90004-4)
13. Ogar P.M., Tarasov V.A., Klyuchev E.A., Maksimova O.V. Influence of Coating Thickness on Elastic Characteristic of Layered Elastic Half-Space. *Mekhaniki XXI veku* = 21st Century Mechanics. 2007; 321-327.
14. Adamenkov A.K., Veselova I.N., Ryasnyy S.I. Method for Selecting the Pipeline Valves of the Nuclear Power Plant to Be Repaired as per Technical Condition. *Tyazheloe mashinostroenie* = Heavy Engineering. 2008; (10):8-11.

Received 11.02.2019; revised 18.04.2019; published online 31.12.2019

About the author:

Vladimir A. Skryabin, Professor of Engineering Technology Chair, Penza State University (40 Krasnaya St, Penza 440000, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: R-2385-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

The author has read and approved the final manuscript.



Исследование генеральных планов предприятий технического сервиса в агропромышленном комплексе

В. А. Комаров^{1*}, В. В. Салмин², М. И. Курашкин¹

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

²ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
(г. Пенза, Россия)

*komarov.v.a2010@mail.ru

Введение. Большинство территорий, на которых размещены предприятия технического сервиса в агропромышленном комплексе, относятся к землям сельскохозяйственного назначения высокого качества. Однако до настоящего времени не проводился анализ технологической целесообразности использования данных земельных участков. Цель настоящей работы – разработать рекомендации по эффективному использованию участков, отведенных под предприятия технического сервиса, с учетом повышения плотности застройки территорий за счет реконструкции ремонтно-обслуживающих баз.

Материалы и методы. Определение фактических показателей плотности застройки для предприятий технического сервиса и их соответствия своду правил проведено с помощью документов по учету предприятий и ситуационных планов ремонтно-обслуживающих баз. В процессе исследования были разработаны рекомендации по реконструкции схем генеральных планов предприятий, обеспечивающие повышение плотности застройки площадок ремонтно-обслуживающих баз предприятий технического сервиса.

Результаты исследования. Результаты исследований фактической плотности застройки для предприятий технического сервиса показали, что она в 65 % случаев ниже минимальной плотности застройки, установленной сводом правил СП 19.13330.2011. Фактическая плотность застройки ремонтно-обслуживающих баз находится в интервале 5,1–66,0 %. При этом фактическая средняя плотность застройки предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей составила 19,7 %. Наибольшее количество предприятий (61,9 %) имеют плотность застройки 5–20 %, то есть значительно ниже нормативной величины. Наименьшее число предприятий (3,6 %) имеют плотность застройки свыше 50 %. Большинство предприятий (58,5 %) имеют площадь озеленения менее 10 %, что ниже регламентированного значения. Это характеризует рассматриваемые площадки с экологической точки зрения как не соответствующие современным требованиям. В результате сравнения фактической величины коэффициента использования участка предприятий и минимальной величины коэффициента использования участка сельскохозяйственных предприятий выявлено, что у 62 % ремонтно-обслуживающих баз предприятий технического сервиса он не превысил рекомендуемой в специальной литературе величины. *Обсуждение и заключение.* Проведенные исследования показали низкую эффективность использования участков, отведенных под ремонтно-обслуживающие базы предприятий технического сервиса для различных районов агропромышленного комплекса Приволжского федерального округа Российской Федерации.

© Комаров В. А., Салмин В. В., Курашкин М. 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: генеральный план, ремонтно-обслуживающая база, технический сервис, плотность застройки, коэффициент использования участка, коэффициент озеленения, реконструкция

Для цитирования: Комаров В. А., Салмин В. В., Курашкин М. И. Исследование генеральных планов предприятий технического сервиса в агропромышленном комплексе // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 560–577. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.560-577>

Study of Master Plans of Technical Service Enterprises in Agricultural Sector

V. A. Komarov^{a*}, V. V. Salmin^b, M. I. Kurashkin^a

^aNational Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

^bPenza State University (Penza, Russia)

*komarov.v.a2010@mail.ru

Introduction. Most of the territories where technical service enterprises are located in the agricultural-and-industrial complex, are high-quality agricultural lands. However, so far no analysis of the technological feasibility of using these land plots has been made. The goal of this work is to develop recommendations for the effective use of areas allocated for technical service enterprises, taking into account the increase in the density of development of territories through reconstructing of repair and service bases.

Materials and Methods. Determination of actual indicators of the development density for technical service enterprises and their compliance with the set of rules was carried out using the companies' accounting documents and situational plans for repair and maintenance bases. In the course of the study, recommendations were developed for reconstruction of master plans to increase the development for density repair and maintenance bases of these companies.

Results. The results of studies of the actual development density of technical service enterprises have shown that in 65% of cases it is below the minimum development density established by the code of rules SP 19.13330.2011. The actual density maintenance bases is in the range of 5.1–66.0%. At the same time, the actual average density of development of enterprises of technical service for agricultural producers was 19.7%. The largest number of enterprises (61.9%) has the development density of 5–20%, that is, significantly lower than the standard value. The smallest number of enterprises (3.6%) have the development density in terms ecology of above 50%. Most enterprises (58.5%) have the green area less than 10%, which is lower than the regulated value. This characterizes the sites under considering as not meeting modern requirements. Comparing the actual value of the utilization rate of the enterprises site and the minimum value of the utilization rate of agricultural enterprises, it was found that 62% of the repair and maintenance bases of technical service enterprises did not exceed the value recommended in the special literature.

Discussion and Conclusion. We showed the low efficiency in the use of areas allocated for repair and maintenance bases of technical service enterprises in various areas of the agricultural-and-industrial complex of the Volga Federal District of the Russian Federation.

Keywords: master plan, repair and maintenance base, technical service, building density, site utilization rate, planting ratio, reconstruction

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

Введение

Проблему размещения ремонтно-обслуживающих баз (РОБ) по ремонту, техническому обслуживанию и хранению сельскохозяйственной техники в производственных зонах сельских населенных пунктов невозможно решить без анализа производственной деятельности и планов развития сельскохозяйственных предприятий [1–3]. Они устанавливаются в соответствии с проектами генеральных планов территорий с учетом схем расположения подразделений сельскохозяйственного производства областей и республик Российской Федерации¹. Под генеральным планом понимается схема планировочного решения на конкретном земельном участке. Исходя из Земельного кодекса Российской Федерации², для размещения РОБ предприятий технического сервиса должны выбираться участки на землях, непригодных для ведения сельскохозяйственного производства, или на землях худшего качества. Выбор площадок для размещения РОБ подтверждается обоснованием затрат на строительство, основываясь на результатах рассмотрения конкурентоспособности различных вариантов расположения. При этом учитывается наиболее эффективное использование участков и устранение потерь в результате изъятия площадей из сельскохозяйственного производства [4–6].

Резервирование территорий для расширения РОБ допускается за счет участков, находящихся за пределами площадок сельскохозяйственных пред-

приятий. Поэтому при выборе участков учитывается возможность выделения соседних площадей в соответствии с положениями 4.6 свода правил³. Резервирование участков на территории предприятий технического сервиса допускается только в соответствии с заданиями на проектирование.

В настоящее время стоимость земель сельскохозяйственного назначения в Приволжском федеральном округе очень сильно отличается в различных районах и составляет 120–6520 тыс руб./га⁴. Поэтому в работе осуществлен анализ использования участков, отведенных под РОБ предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей.

Данные исследования позволяют оценить эффективность размещения РОБ с учетом назначения минимальных расстояний между зданиями и сооружениями, учитывая санитарные и противопожарные требования, нормы технологического проектирования и методические рекомендации по технологическому проектированию, утвержденные Минсельхозом России [7–9]. При этом основным показателем, регламентирующим использование земельного участка, является плотность застройки территорий сельскохозяйственных предприятий. Она должна быть не меньше значений, приведенных в своде правил генеральных планов сельскохозяйственных предприятий⁵.

До настоящего времени исследова-

¹ СП 19.13330.2011. Генеральные планы сельскохозяйственных предприятий. Актуализированная редакция СНиП II-97-76 (с Изменением № 1) [Электронный ресурс]. URL: docs.cntd.ru/document/1200084090 (дата обращения: 17.11.2019); СП 18.13330.2011. Генеральные планы промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП II-89-80 (с Изменением № 1) [Электронный ресурс]. URL: docs.cntd.ru/document/1200084088 (дата обращения: 17.11.2019).

² Земельный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/ (дата обращения: 17.11.2019).

³ СП 19.13330.2011. Генеральные планы сельскохозяйственных предприятий.

⁴ Публичная кадастровая карта – Россия 2019 года [Электронный ресурс]. URL: https://egrp365.ru/map/ (дата обращения: 17.11.2019).

⁵ СП 19.13330.2011. Генеральные планы сельскохозяйственных предприятий.

вания участков, отведенных под РОБ предприятий технического сервиса агропромышленного комплекса РФ, не проводились. В работе они осуществлены с помощью документов по учету предприятий и ситуационных планов РОБ Приволжского федерального округа (на примере Пензенской области и Республики Мордовия)⁶ [10;11].

Целью настоящего исследования является разработка рекомендаций по эффективному использованию участков, отведенных под РОБ, с учетом повышения плотности застройки территорий за счет реконструкции предприятий технического сервиса.

Обзор литературы

В соответствии со сводом правил⁷ схемы генеральных планов, относящиеся к производственным зонам сельских территорий, разрабатываются на срок 20 лет с расположением первой очереди состава зданий и сооружений на срок до 10 лет. Плотность застройки участков РОБ предприятий технического сервиса устанавливается как отношение суммарной площади застройки A_3 РОБ к общей пло-

щади предприятия технического сервиса A_{II} (в процентах). При этом площади, занимаемые производственными корпусами и инженерными коммуникациями, определяются по границам наружных контуров внешних стен, не учитывая ширину отступков [12–14]. В таблице 1 представлены величины минимальных плотностей застройки территорий РОБ предприятий технического сервиса, исходя из свода правил генеральных планов предприятий сельского хозяйства⁸. Из таблицы 1 видно, что, согласно своду правил, минимальная плотность застройки устанавливается центральной ремонтной мастерской (ЦРМ), входящей в состав РОБ предприятий технического сервиса, в зависимости от парка тракторов у сельхозпроизводителя.

Минимальная плотность застройки может быть уменьшена (при техническом обосновании) не более чем на 1/10 от установленных правил при размещении предприятий технического сервиса на участках с уклоном более 3 %, наличии просадочных грунтов, тяжелых инженерно-геологических факторах,

Т а б л и ц а 1
Table 1

Показатели минимальной плотности застройки площадок сельскохозяйственных предприятий⁹

Indicators of the minimum density of development of agricultural enterprises¹⁰

Характер показателя / Nature of the indicator	Центральные ремонтные мастерские для хозяйств с парком тракторов, шт. ¹¹ / Central repair shops for farms with a fleet of tractors, pieces ¹²			
	25	50 и 75 / 50 and 75	100	150 и 200 / 150 and 200
Минимальная плотность застройки площадок сельскохозяйственных предприятий, % / Minimum building density of agricultural enterprises, %	25	28	31	35

⁶ Публичная кадастровая карта – Россия 2019 года.

⁷ СП 18.13330.2011. Генеральные планы промышленных предприятий; СП 19.13330.2011. Генеральные планы сельскохозяйственных предприятий.

⁸ Там же.

⁹ Там же.

¹⁰ Ibid.

¹¹ Там же.

¹² Ibid.

а также в случаях расширения и реконструкции предприятий технического сервиса.

В таблице 1 величины минимальной плотности застройки показаны для предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей со степенью огнестойкости не ниже III степени и класса С1. Для производственных корпусов III степени огнестойкости (классы С2 и С3), IV степени огнестойкости (классы С1, С2 и С3) и V степени огнестойкости минимальная величина плотности застройки может быть уменьшена (при техническом обосновании) не более чем на $1/10^{13}$.

Подсчет площадок, занимаемых галереями и эстакадами, осуществляется по проекциям на горизонтальную плоскость для тех территорий, под которыми, исходя из габаритов, не могут быть расположены производственные корпуса. При подсчете площади застройки A_3 не учитываются площади сооружений и коммуникаций A_C . Для остальных надземных территорий производится учет только площадей, занимаемых конструкциями опор [15–17].

Таким образом, главным фактором повышения эффективности использования участков, отведенных под РОБ сельхозпроизводителей, является достоверное установление плотности застройки территории с учетом современных требований по реконструкции сервисных предприятий [18–20].

Материалы и методы

Анализ фактических показателей плотности застройки площадок предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей и их соответствия своду правил¹⁴ проведен с помощью документов учета предприятий и ситуационных планов РОБ¹⁵ [21; 22]. Обследованы ~ 100 предприятий тех-

нического сервиса сельхозпроизводителей в 32 муниципальных районах Приволжского федерального округа (на примере Пензенской области и Республики Мордовия).

Плотность застройки K_3 определялась в процентах как отношение площади застройки A_3 к площади предприятия A_{II} :

$$K_3 = (A_3 / A_{II}) \cdot 100.$$

Используя положения свода правил¹⁶ и ранее проведенные исследования [1; 10; 11], площадь застройки A_3 определим по формуле:

$$A_3 = A_{31} + A_{32} + A_{33} + A_{34} + A_{35} + \\ + A_{36} + A_{37} + A_{38} + A_{39},$$

где A_{31} – площадь зданий и сооружений, м²; A_{32} – площадь капитальных навесов, м²; A_{33} – площадь открытых санитарно-технических и технологических устройств, м²; A_{34} – площадь галерей и эстакад, м²; A_{35} – площадь участков, занятых погрузочно-разгрузочными установками, м²; A_{36} – площадь подземных инженерных коммуникаций, над которыми нельзя размещать производственные корпуса, м²; A_{37} – площади для длительного и кратковременного хранения тракторов, комбайнов, автомобильной и сельскохозяйственной техники, м²; A_{38} – площадь открытых складов, м²; A_{39} – площадь резервных площадок на территории сервисного предприятия, м².

Территория РОБ сервисного предприятия A_{II} должна включать всю площадь предприятия технического сервиса в рамках установленных границ.

На территориях, которые не заняты постройками и дорожными по-

¹³ СП 18.13330.2011. Генеральные планы промышленных предприятий; СП 19.13330.2011. Генеральные планы сельскохозяйственных предприятий.

¹⁴ Там же.

¹⁵ Публичная кадастровая карта – Россия 2019 года.

¹⁶ СП 19.13330.2011. Генеральные планы сельскохозяйственных предприятий.

крытиями и которые находятся вдоль периметра участка РОБ предприятия сельхозпроизводителей, должно быть предусмотрено озеленение. Площадь территории, занятой зелеными культурными насаждениями A_O , должна быть не менее 15 % участка РОБ предприятия¹⁷. Коэффициент озеленения K_O участка определяется как отношение зон озеленения к площади РОБ предприятия технического сервиса сельхозпроизводителей:

$$K_O = A_O / A_{IT}$$

Отсюда определяем коэффициент использования территории по формуле:

$$K_{IT} = (A_3 + A_O + A_C) / A_{IT}$$

При этом площадь территории, занятой зелеными культурными насаждениями A_O , находим по формуле:

$$A_O = A_{O1} + A_{O2} + A_{O3} + A_{O4},$$

где A_{O1} – площадь культурных зеленых насаждений по периметру предприятия, м²; A_{O2} – площадь, занятая культурными зелеными насаждениями около тротуаров, м²; A_{O3} – площадь, занятая культурными зелеными насаждениями около автомобильных дорог, м²; A_{O4} – площадь, занятая культурными зелеными насаждениями по периметру территории отдыха работающих и спортивных площадок, м².

Площадь инженерных сооружений и коммуникаций A_C с учетом предыдущих исследований [13; 14; 19] определяется по формуле:

$$A_C = A_{C1} + A_{C2} + A_{C3} + A_{C4} + A_{C5} + A_{C6} + A_{C7} + A_{C8} + A_{C9},$$

где A_{C1} – площади отмосток по периметру корпусов и инженерных ком-

муникаций, м²; A_{C2} – площади тротуарных покрытий, м²; A_{C3} – площади автомобильных и железнодорожных путей, м²; A_{C4} – площади временных построек и сооружений, м²; A_{C5} – площадки для занятий спортом и отдыха работающих, м²; A_{C6} – площади стоянок личных транспортных средств, м²; A_{C7} – площади различных каналов и водоотводов, м²; A_{C8} – площади стенок с подпорками, м²; A_{C9} – площади подземных коммуникаций, над которыми могут быть расположены производственные корпуса и инженерные коммуникации, м².

Поэтому при модернизации схем генеральных планов РОБ предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей должны быть предусмотрены [21]: а) планировочная увязка с селитебной зоной; б) организация кооперирования сервисных предприятий на одной производственной площади и общих корпусов подсобного и вспомогательного характера; в) технологическая связь схем грузопотока различных типов транспорта в соответствии с требованиями п. 4.3 правил¹⁸; г) организация расположения производственных корпусов и инженерных коммуникаций, в соответствии с минимальными расстояниями между ними; д) связь инженерно-технических и технологических требований с целью создания архитектурного ансамбля, учитывающего природно-климатические, геологические и другие местные условия; е) интенсификация использования участков, включая подземные и наземные площадки; ж) благоустроенность участка; з) защита участков, исключаящая заболачивание, эрозию и загрязнение подземных вод и открытых водоемов; и) возможность расширения территории предприятия; к) возможность осуществления строительно-монтажных работ с использованием инновационных методов; л) возможность проектирова-

¹⁷ Там же.

¹⁸ Там же.

ния и строительства предприятий технического сервиса с использованием пусковых комплексов; м) организация восстановления земельных участков; н) технико-экономическая оценка эффективности планировочных решений.

При реконструкции схем генеральных планов предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей должны быть предусмотрены [20]: а) концентрация производственных корпусов на одной территории, учитывающая требования п. 4.3 правил¹⁹; б) возможность реконструкции, расширения и размещения новых РОБ предприятий технического сервиса в будущем; в) ликвидация незагруженных подъездных коммуникаций; г) вероятность максимального использования территории РОБ предприятий с возможностью размещения новых корпусов между действующими зданиями; е) возможность упорядочения размещения и зонирования инженерных коммуникаций; ж) рекультивация участков при ликвидации РОБ предприятий технического сервиса; з) организация благоустройства производственных участков и улучшения архитектурного ансамбля территории; и) организация участков для стоянки автомобильного транспорта; к) технико-экономическая оценка предлагаемых разработок.

Производственные корпуса ЦРМ, расположенные в производственных участках сельских территорий, целесообразно объединять, учитывая требования п. 5.1 правил²⁰, формируя при этом области: а) территорий РОБ; б) подразделений вспомогательного производства; в) складских подразделений.

РОБ предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей необходимо разделять на зоны по функциональному назначению [19]: а) основная

производственная; б) вспомогательная производственная; в) хранения и переработки сырья и материалов; г) обеззараживания, переработки и хранения отходов производственной деятельности; д) бытовая. Производственные и вспомогательные корпуса РОБ могут быть объединены в более крупные подразделения, учитывая техническое обоснование технологических, строительных, санитарно-гигиенических, противопожарных норм [20]. Проектирование трансформаторных подстанций и распределительных пунктов (напряжение до 20 кВ), котельных, воздушных компрессорных, пунктов технического обслуживания, вентиляционных камер и установок, насосных станций, складов (кроме складов легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и газов) и других аналогичных объектов должно производиться в виде встроенных в производственные корпуса или в виде пристроя к ним.

Таким образом, при оценке генеральных планов РОБ предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей, выбор показателей зависит от назначения и цели исследования плотности застройки РОБ предприятий технического сервиса в агропромышленном комплексе (АПК).

Результаты исследования

В настоящее время в АПК Приволжского федерального округа у более 90 % предприятий, осуществляющих деятельность по категории «Услуги по монтажу, ремонту и техобслуживанию машин для сельского хозяйства», основными видами деятельности являются: предоставление услуг, связанных с производством сельскохозяйственных культур, разведение крупного рогатого скота и др.²¹ [21]. Поэтому в ра-

¹⁹ Там же.

²⁰ Там же.

²¹ Услуги по монтажу, ремонту и техобслуживанию машин для сельского хозяйства [Электронный ресурс]. URL: <http://saransk7m.ru/class/1162> (дата обращения: 17.11.2019); Услуги по монтажу, ремонту и техобслуживанию машин для сельского хозяйства [Электронный ресурс]. URL: <http://okato.net/category/1162/5> (дата обращения: 17.11.2019).

боте на данном первоначальном этапе исследований проанализированы РОБ сельхозпроизводителей.

Изучены около 100 РОБ предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей с различным составом машинно-тракторного парка (табл. 2). В таблице 3 представлены общие сведения о показателях площади генеральных планов РОБ сельскохозяйственных предприятий. Полный анализ всех исследуемых предприятий рассматривается при изучении курсов «Современные проблемы науки и производства в агроинженерии» и «Ремонт и утилизация автомобилей и тракторов», которые преподают в ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск) и ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (г. Пенза) [23–25].

Парк тракторов в исследуемых предприятиях составил 7–49 единиц. Общая площадь РОБ предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей находится в пределах от 9970 м² до 361350 м², то есть изменяется более чем в 36 раз (табл. 3). Площадь застройки РОБ предприятий составила от 590 до 39110 м², то есть отличается более чем в 65 раз. Площадь сооружений и инженерных коммуникаций РОБ варьируется от 820 до 34970 м², то есть отличается более чем в 42 раза. Площадь озеленения в ис-

следуемых предприятиях составила от 0 до 25790 м².

Поэтому на основании вышеприведенных данных не удалось установить зависимости между количественными показателями парка тракторов, общего парка сложной сельскохозяйственной техники и общей площадью РОБ предприятий, площадью застройки РОБ, площадью сооружений и инженерных коммуникаций и площадью озеленения. Это свидетельствует о несоответствии большинства предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей современным требованиям застройки сельских территорий.

Для более детального анализа эффективности использования территорий РОБ сельскохозяйственных предприятий проведен расчет следующих показателей: плотность застройки, коэффициент озеленения и коэффициент использования участка предприятия (табл. 4).

Фактическая плотность застройки K_3 в исследуемых предприятиях технического сервиса находится в пределах 5,1–66,0 % (рис. 1). При этом фактическая средняя плотность застройки K_3 составила 19,7 %. Предприятия в зависимости от величины плотности застройки K_3 РОБ были разделены на четыре группы. Количество предприятий (%) в каждой группе показано на рисунке 2. Наибольшее количество

Таблица 2

Table 2

Состав машинно-тракторного парка сельскохозяйственных предприятий
Composition of the machine and tractor fleet of agricultural enterprises

Характер показателя / Nature of the indicator	Количество техники, шт. / Number of vehicles, pieces		
	Тракторы / Tractors	Комбайны / Combines	Автомобили / Cars
Минимальное количество / Minimal amount	7	5	6
Среднее количество / Average number	25	14	17
Максимальное количество / Maximum amount	49	30	47

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Общая характеристика площадей ремонтно-обслуживающих баз сельскохозяйственных предприятий
General characteristics of the areas of repair and maintenance bases agricultural enterprises

Характер показателя / Nature of the indicator	Общий парк техники (трактора, автомобили, комбайны), шт. / General fleet of vehicles (tractors, cars, combines), items	Общая площадь ремонтно-обслуживающей базы, м ² / Total area of repair and maintenance base, m ²	Площадь застройки, м ² / Building area, m ²	Площадь сооружений и инженерных коммуникаций, м ² / Area of facilities and utilities, m ²	Площадь озеленения, м ² / Area of gardening, m ²
Минимальное значение / Minimum value	18	9970	590	820	0
Среднее значение / Average value	56	66760	13140	5130	5295
Максимальное значение / Maximum value	126	361350	39110	34970	25790

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

Эффективность использования участков ремонтно-обслуживающих баз сельскохозяйственных предприятий
Efficiency of the use of plots of repair and maintenance bases of agricultural enterprises

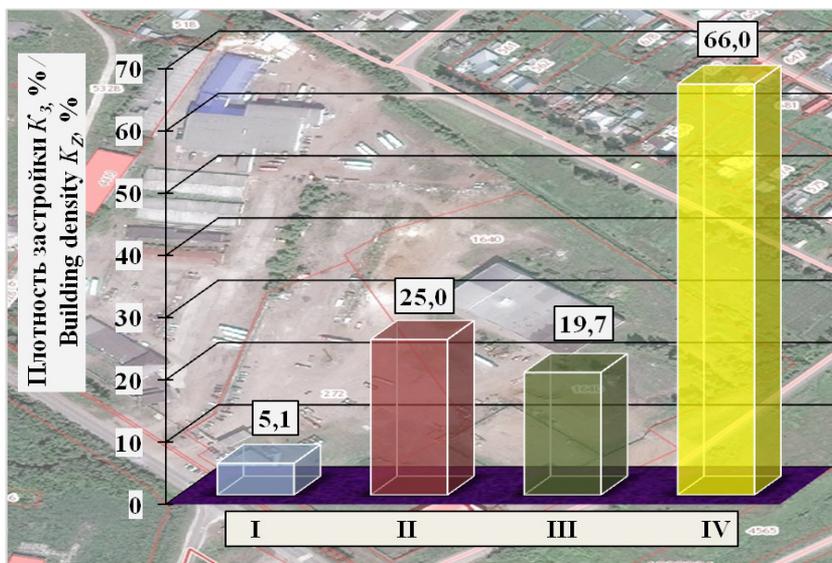
Характер показателя / Nature of the indicator	Плотность застройки, % / Density of building, %	Коэффициент озеленения / Coefficient of gardening	Коэффициент использования участка / Coefficient of land use
Фактическая минимальная величина / Actual minimum value	5,1	0,00	0,14
Минимальная нормативная величина / Minimum standard value	25,0	0,15	0,40
Фактическая средняя величина / Actual average value	19,7	0,08	0,35
Фактическая максимальная величина / Actual maximum value	66,0	0,36	0,81

предприятий (61,9 %) имеют плотность застройки 5–20 %, то есть значительно ниже нормативной. Наименьшее число предприятий (3,6 %) имеют плотность застройки выше 50 %.

Результаты сравнения фактической плотности застройки K_3 действующих

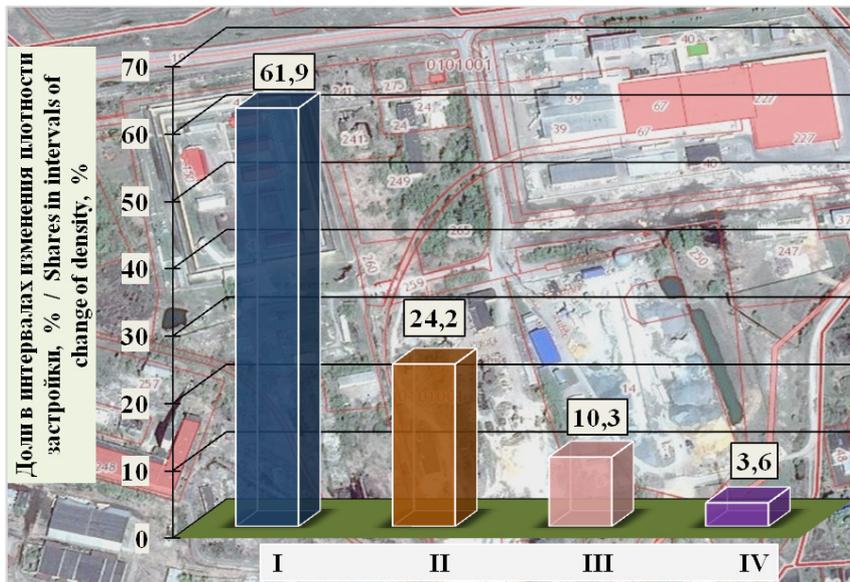
предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей и минимальной плотности застройки (равна 25 %) площадок предприятий технического сервиса, регламентированной сводом правил²², показали, что у 65 % предприятий нарушены нормативы.

²² СП 19.13330.2011. Генеральные планы сельскохозяйственных предприятий.



Р и с. 1. Показатели плотности застройки K_z ремонтно-обслуживающих баз, %:
 I – фактическая минимальная величина K_z ; II – минимальная нормативная величина K_z ;
 III – фактическая средняя величина K_z ; IV – фактическая максимальная величина K_z

F i g. 1. Indicators of the density development K_z of repair and maintenance bases, %:
 I – actual minimum value K_z ; II – minimum standard value K_z ; III – actual average value K_z ;
 IV – actual maximum value K_z



Р и с. 2. Распределение плотности застройки K_z ремонтно-обслуживающих баз, %:
 I – 5–20; II – 20–35; III – 35–50; IV – 50–65

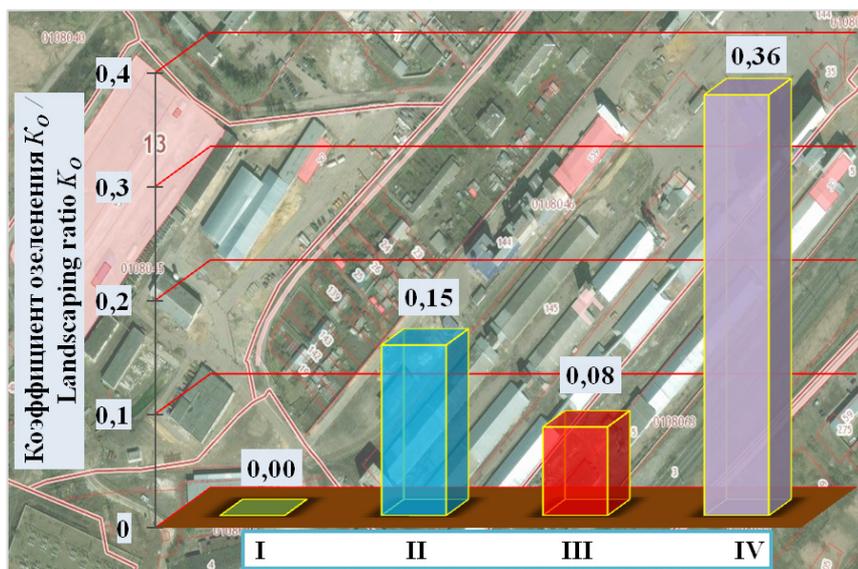
F i g. 2. Distribution of density development K_z of repair and maintenance bases, %:
 I – 5–20; II – 20–35; III – 35–50; IV – 50–65

Для определения характеристики участков с экологической точки зрения в работе проведен расчет коэффициента озеленения K_o . Фактическая величина коэффициента озеленения K_o в исследуемых предприятиях технического сервиса находится в пределах 0–0,36 (рис. 3). При этом фактическая средняя величина коэффициента озеленения K_o составила 0,08. Предприятия в зависимости от величины коэффициента озеленения K_o РОБ были разделены на четыре группы. Количество предприятий (%) в каждой группе показано на рисунке 4. Наибольшее количество предприятий (58,5 %) имеют коэффициент озеленения K_o менее 0,10, то есть значительно ниже нормативной величины. Наименьшее число предприятий (3,2 %) имеют коэффициент озеленения K_o выше 0,30.

Сопоставление фактической величины коэффициента озеленения K_o

действующих предприятий технического сервиса и минимальной величины площади озеленения площадок сельскохозяйственных предприятий (равна 15 %), регламентируемой сводом правил²³, показали, что у 68,0 % предприятий нарушены экологические нормативы.

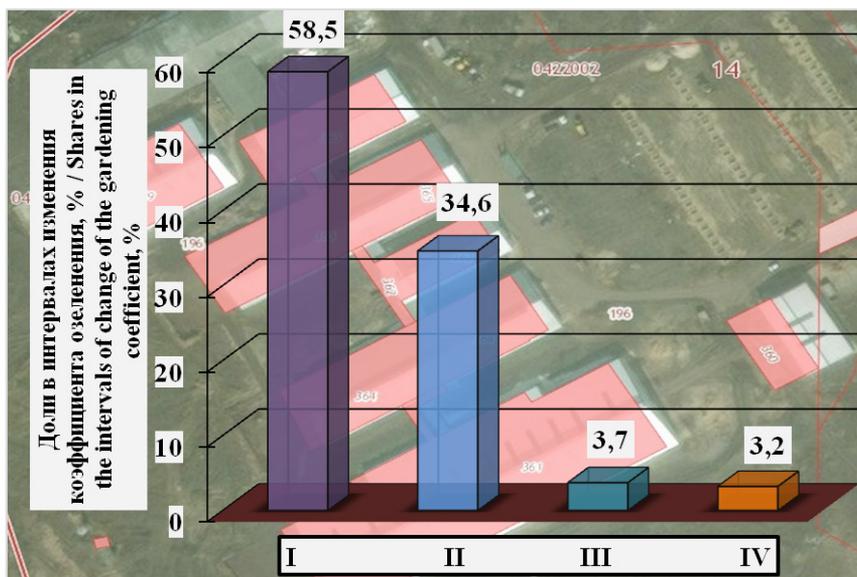
В результате выявлен низкий уровень использования земельных участков, отведенных под РОБ сервисных предприятий. Так коэффициент использования участка $K_{и}$ находится в пределах 0,14–0,81 (рис. 5). При этом фактическая средняя величина коэффициента использования участка $K_{и}$ составила 0,35. Предприятия в зависимости от величины коэффициента использования участка $K_{и}$ РОБ были разделены на четыре группы. Количество предприятий (%) в каждой группе показано на рисунке 6. Низкую величину коэффи-



Р и с. 3. Показатели коэффициента озеленения K_o ремонтно-обслуживающих баз:
 I – фактическая минимальная величина K_o ; II – минимальная нормативная величина K_o ;
 III – фактическая средняя величина K_o ; IV – фактическая максимальная величина K_o

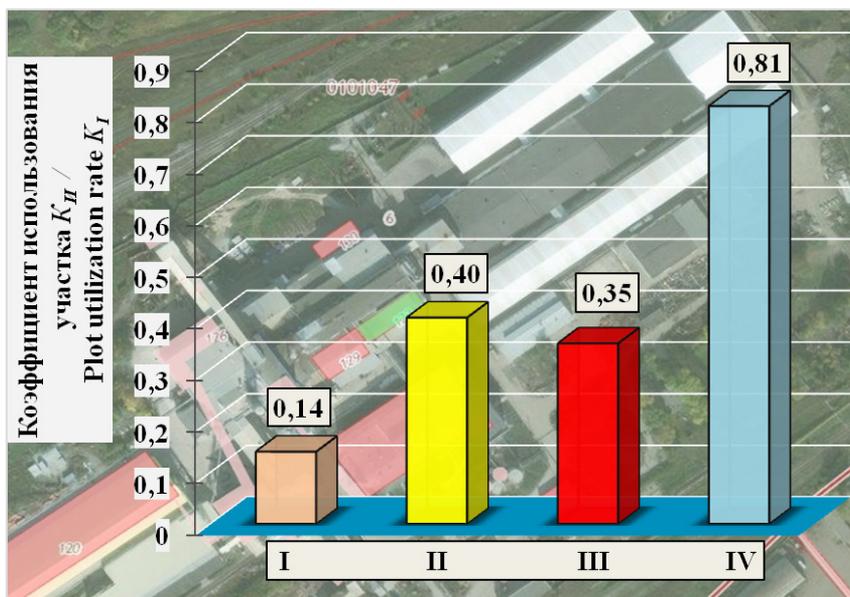
F i g. 3. Indicators of greening K_o repair and maintenance bases:
 I – actual minimum value K_o ; II – minimum standard value K_o ; III – actual average value K_o ;
 IV – actual maximum value K_o

²³ Там же.



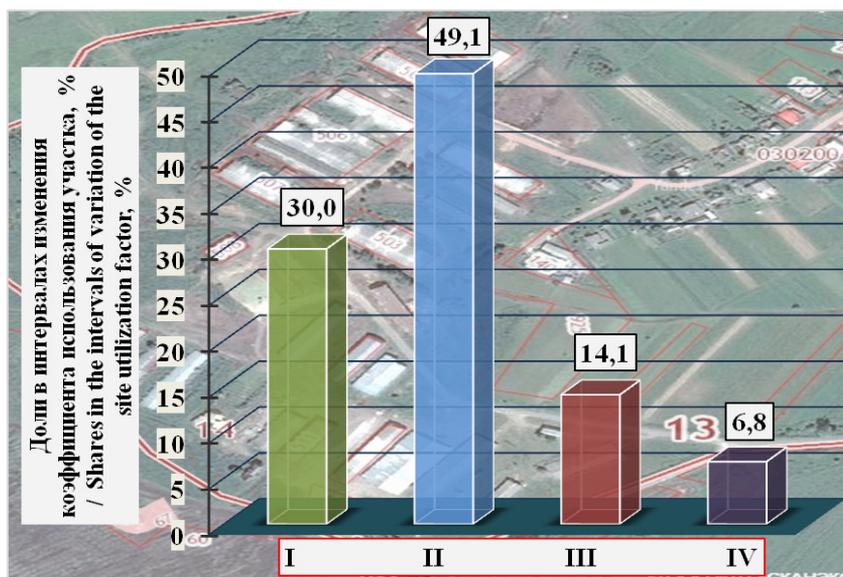
Р и с. 4. Распределение коэффициента озеленения K_O ремонтно-обслуживающих баз:
 I – 0–0,10; II – 0,10–0,20; III – 0,20–0,30; IV – 0,30–0,40

Fig. 4. Distribution of greening factor K_O of repair and maintenance bases:
 I – 0–0,10; II – 0,10–0,20; III – 0,20–0,30; IV – 0,30–0,40



Р и с. 5. Показатели коэффициента использования участка K_I ремонтно-обслуживающих баз:
 I – фактическая минимальная величина K_I ; II – минимальная нормативная величина K_I ;
 III – фактическая средняя величина K_I ; IV – фактическая максимальная величина K_I

Fig. 5. Indicators of the utilization rate of the site K_I of repair and maintenance bases:
 I – actual minimum value K_I ; II – minimum standard value K_I ; III – actual average value K_I ;
 IV – actual maximum value K_I



Р и с. 6. Распределение коэффициента использования участка K_{II} ремонтно-обслуживающих баз: I – 0,05–0,25; II – 0,25–0,45; III – 0,45–0,65; IV – 0,65–0,85

F i g. 6. Distribution of the utilization rate of the site K_i of repair and maintenance bases: I – 0,05–0,25; II – 0,25–0,45; III – 0,45–0,65; IV – 0,65–0,85

коэффициента использования площади участка 0,05–0,25 имеют 30 % РОБ предприятий сельхозпроизводителей. Только 6,8 % предприятий технического сервиса имеют величину коэффициента использования участка K_{II} выше 0,65.

Сравнение фактической величины коэффициента использования участка K_{II} и минимальной величины коэффициента использования участка площадок сельскохозяйственных предприятий (равна 0,40), выявило, что у 62 % РОБ предприятий технического сервиса он не превысил рекомендуемой в специальной литературе [10; 11] величины.

Обсуждение и заключение

Результаты исследований фактической плотности застройки РОБ предприятий сельхозпроизводителей показали, что она в 65 % случаев ниже минимальной плотности застройки, установленной сводом правил²⁴. Фактическая плотность застройки РОБ находится в интервале 5,1–66,0 %. При

этом фактическая средняя плотность застройки предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей составила 19,7 %.

Установлено, что основной причиной низкой плотности застройки РОБ предприятий сельхозпроизводителей является отсутствие полного перечня подразделений и сооружений в составе предприятия технического сервиса необходимых для качественного выполнения всего цикла операций по техническому обслуживанию, ремонту и хранению сложной сельскохозяйственной техники. Подробные результаты исследований о составе и структуре подразделений предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей приведены в одной из наших работ [21].

Определено среднее значение коэффициента озеленения РОБ предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей. Оно составило 0,08, что характеризует рассматриваемые пло-

²⁴ Там же.

щадки, с экологической точки зрения, как не соответствующие современным требованиям.

В результате вышесказанного получены величины коэффициента использования участка, отведенного под РОБ предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей. Фактическая величина коэффициента использования участка РОБ находится в интервале 0,14–0,81. При этом фактическое среднее значение коэффициента использования участка РОБ предприятий технического сервиса установлено равным 0,35.

Большой объем проведенных исследований показал необходимость масштабной реконструкции предприятий технического сервиса сельхозпроизводителей в АПК Приволжского федерального округа РФ. При реконструкции РОБ с целью оптимизации показателей генеральных планов на имеющихся площадях необходимо проектирование в первую очередь следующих производственных корпусов и пунктов²⁵ [21]:

– механизированной наружной мойки и очистки машин;

– технического обслуживания и диагностики импортной техники;

– подготовки и длительного хранения сложной сельскохозяйственной техники;

– хранения и отпуска топливно-смазочных материалов с учетом международных экологических требований;

– высокоресурсного ремонта отдельных агрегатов российской и импортной техники с учетом современных изменений качества и надежности машин.

Кроме того необходимо создание площадок с твердым покрытием, территорий озеленения и мест межменного отдыха.

Таким образом, на основании проведенных исследований и с учетом международной практики технической сервис в АПК должен рассматриваться как комплексная сервисная услуга сельхозпроизводителю, включая процессы приобретения, использования и обеспечения работоспособного состояния техники в течение всего срока службы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Горячев С. А., Романов И. В.** Модернизация ремонтно-обслуживающей базы // Сельский механизатор. 2015. № 3. С. 38–40. URL: <http://www.selmech.msk.ru/315.html> (дата обращения: 17.11.2019).

2. **Богосов И. Е., Доронина Н. П.** Модернизация ремонтно-обслуживающей базы АПК // Young Science. 2015. Т. 2, № 6. С. 11–13.

3. **Зимин В. К., Сметнев А. С.** Современные тенденции в техническом сервисе сельскохозяйственной техники // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2015. Вып. 19 (24). С. 69–73. URL: http://old.rgazu.ru/db/files/scientific_work/vestnik_19.pdf (дата обращения: 17.11.2019).

4. **Асадуллин Э. З., Ибляминов Ф. Ф., Закирова Т. Р.** Основные направления развития технического сервиса в агропромышленном комплексе Татарстана // Вестник Казанского ГАУ. 2015. Т. 10, № 2 (36). С. 60–62. DOI: <https://doi.org/10.12737/12052>

5. **Баганов Н. А., Бехтольд Т. Г., Кухарь В. С.** Проблемы агропромышленного комплекса в условиях северного Казахстана (на примере Костанайской области) // Аграрный вестник Урала. 2018. № 1 (168). С. 63–66. URL: <http://avu.usaca.ru/media/BAhbBlshOGZmSSIpMjAxOC8wMy8yMC8wN18yNV8zN18xMjBfX19fXzIwMTgucGRmBjoGRVQ> (дата обращения: 17.11.2019).

²⁵ Инновационные направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники: монография / С. А. Соловьев [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 160 с.

6. **Немцев А. Е., Деменок И. В.** Пути улучшения ремонтно-эксплуатационной базы АПК // Вестник ИрГСА. 2011. Вып. 47. С. 92–98. URL: <http://www.igsha.ru/science/files/v47.pdf> (дата обращения: 17.11.2019).
7. **Гладыш А. Ю.** Анализ состояния технического сервиса в Нижегородской области и его дальнейшего развития // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 8 (118). С. 125–131. URL: <http://www.asau.ru/vestnik/2014/8/125-131.pdf> (дата обращения: 17.11.2019).
8. **Волкова З. Н., Горячев С. А.** Исследование состояния ремонтной базы сельского хозяйства и разработка нормативов планирования затрат на ремонт сельскохозяйственной техники // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 112, № 2. С. 9–14. URL: <https://docplayer.ru/38990762-Z-n-volkova-s-a-goryachev-gnu-gosniti-rosselhozakademii-tel-495.html> (дата обращения: 17.11.2019).
9. **Колмыков А. В.** Внутрихозяйственная организация территории сельскохозяйственного предприятия // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 346–353. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14694> (дата обращения: 17.11.2019).
10. **Коротких В. В., Немцев А. Е.** Формирование технического сервиса в АПК на основе сервисных технических кластеров // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 125. С. 74–79.
11. **Кушнарев Л. И.** Методика обоснования параметров модернизации ремонтно-технической базы предприятий, эксплуатирующих сельхозтехнику // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 7. С. 49–51.
12. **Климин Д. И.** Современное состояние и направления совершенствования агросервиса в Беларуси // Вестник Белорусской сельскохозяйственной академии. 2017. № 3. С. 19–22. URL: <http://elc.baa.by/vestnik/vestnik2017-3/vestnik2017-3.pdf> (дата обращения: 17.11.2019).
13. **Малыха Е. Ф.** Совершенствование системы технического сервиса в условиях импортозамещения // Известия Международной академии аграрного образования. 2017. Вып. 36. С. 114–118.
14. **Корнеев В. М., Кравченко И. Н., Овчинникова М. С.** Развитие системы технического сервиса машин в агропромышленном комплексе // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 6. С. 5–9. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2619 (дата обращения: 17.11.2019).
15. **Садыхов С. Я., Рзаев В. Г., Гулиев Ш. А.** Организация и обоснование сервисных и ремонтных баз предприятий агропромышленного комплекса Азербайджанской Республики // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 4 (19). С. 34–38. URL: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/04/Insel19.pdf> (дата обращения: 17.11.2019).
16. **Velychko O., Velychko L.** Management of Inter-Farm Use of Agricultural Machinery Based of the Logistical System BOA // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2017. Vol. 23, Issue 4. Pp. 534–543. URL: <https://www.agrojournal.org/23/04-03.pdf> (дата обращения: 17.11.2019).
17. **Hodge I., Hauck J., Bonn A.** The Alignment of Agricultural and Nature Conservation Policies in the European Union // Conservation Biology. 2015. Vol. 29, Issue 4. Pp. 996–1005. DOI: <https://doi.org/10.1111/cobi.12531>
18. **Vorotnikov I. L., Gutuev M. Sh., Petrov K. A., Esin O. A.** Concept of Regional Technical Service Development // Espacios. 2017. Vol. 38, Issue 23. Pp. 22. URL: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n23/17382322.html> (дата обращения: 17.11.2019).
19. **Комаров В. А., Лезин П. П., Григорьев А. В.** Прогнозирование долговечности узлов ремонтно-технологического оборудования предприятий АПК // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 9. С. 46–48.
20. **Комаров В. А., Мачнев В. А., Григорьев А. В.** Формирование надежности ремонтно-технологического оборудования на сервисных предприятиях // Техника и оборудование для села. 2015. № 5. С. 33–36. URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/58-arkhiv-zhurnala-za-2015/418-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-maj-5-215-2015-g> (дата обращения: 17.11.2019).
21. **Комаров В. А.** Исследование предприятий технического сервиса для обеспечения показателей надежности машин (на примере агропромышленного комплекса Республики Мордовия) // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 222–238. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.222-238>

22. **Комаров В. А., Нуязин Е. А.** Анализ технической оснащённости предприятий и готовности техники // Сельский механизатор. 2018. № 1. С. 12–13. URL: <http://www.selmech.msk.ru/118.html> (дата обращения: 17.11.2019).

23. **Комаров В. А., Наумкин Н. И., Нуязин Е. А.** Междисциплинарные проекты в агроинженерном образовании // Техника и оборудование для села. 2015. № 10. С. 41–43. URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/58-arkhiv-zhurnala-za-2015/423-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-oktyabr-10-220-2015-g> (дата обращения: 17.11.2019).

24. Подготовка специалистов агроинженерных направлений на базе специализированных учебных центров / Е. А. Нуязин [и др.] // Техника и оборудование для села. 2016. № 3. С. 29–32. URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/57-arkhiv-zhurnala-za-2016/428-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-3-225-fevral-2016-g> (дата обращения: 17.11.2019).

25. **Комаров В. А., Нуязин Е. А.** Обоснование потребности региона в кадрах агроинженерного профиля // Техника и оборудование для села. 2018. № 2. С. 41–43. URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/55-arkhiv-zhurnala-za-2018/451-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-fevral-2-248-2018-g> (дата обращения: 17.11.2019).

Поступила 19.02.2019; принята к публикации 18.04.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

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

Салмин Владимир Васильевич, заведующий кафедрой транспортных машин ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: Q-9667-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7185-6733>, salmin-penza@yandex.ru

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

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Комаров – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, подготовка начального варианта статьи; В. В. Салмин – доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ; М. И. Курашкин – проведение мониторинга ремонтно-обслуживающих баз, обработка результатов исследований, компьютерные работы и визуализация.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Goryachev S.A., Romanov I.V. Repair and Modernization of the Service Base. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2015; (3):38-40. Available at: <http://www.selmech.msk.ru/315.html> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)
2. Bogosov I.Ye., Doronina N.P. Modernization of the Repair and Maintenance Base of the Agro-Industrial Complex. *Young Science*. 2015; 2(6):11-13. (In Russ.)
3. Zimin V.K., Smetnev A.S. The Modern Tendencies in Maintenance of Agricultural Machines. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta* = Journal of Russian State Agrarian Correspondence University. 2015; 19:69-73. Available at: http://old.rgaz.u/db/files/scientific_work/vestnik_19.pdf (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

4. Asadullin E.Z., Ibyaminov F.F., Zakirova T.R. Main Directions of Technical Service Development in Agriculture of Tatarstan. *Vestnik Kazanskogo GAU* = Journal of Kazan State Agrarian University. 2015; 10(2):60-62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.12737/12052>

5. Baganov N.A., Bekhtold T.G., Kukhar V.S. Problems of Agrarian and Industrial Complex in the Conditions of Northern Kazakhstan (On the Example of the Kostanay Region). *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2018; (1):63-66. Available at: <http://avu.usaca.ru/media/BAhbBlshOGZmSSIpMjAxOC-8wMy8yMC8wNl8yNV8zNl8xMjBfX19fXzIwMTgucGRmBjoGRVQ> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

6. Nemtsev A.E., Demenok I.V. Ways of Improvement of Repair and Exploitation Base of AIC. *Vestnik IrGSHA* = Irkutsk State Agricultural Academy Bulletin. 2011; 47:92-98. Available at: <http://www.igsha.ru/science/files/v47.pdf> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

7. Gladtsyn A.Yu. Analysis of the State of Technical Service in the Nizhniy Novgorod Region and Its Further Development. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2014; (8):125-131. Available at: <http://www.asau.ru/vestnik/2014/8/125-131.pdf> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

8. Volkova Z.N., Goryachev S.A. Research of a Condition of Repair Base of Agriculture and Development of Standards of Costs Planning on Repair of Agricultural Machinery. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2013; 112(2):9-14. Available at: <https://docplayer.ru/38990762-Z-n-volkova-s-a-goryachev-gnu-gosniti-rosselhozakademii-tel-495.html> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

9. Kolmykov A.V. Internal Organization of the Territory of the Agricultural Enterprise. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education. 2014; (5):346-353. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14694> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

10. Korotkikh V.V., Nemtsev A.E. Formation of Technical Service in the Agro-Industrial Complex on the Basis of Service Technical Clusters. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2016; 125:74-79. (In Russ.)

11. Kushnarev L.I. Methodology for Justifying the Parameters of Modernization of Repair and Technical Base of Enterprises Operating Agricultural Equipment. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2015; (7):49-51. (In Russ.)

12. Klimin D.I. Modern State and Trends of Improvement of Agro-Service in Belarus. *Vestnik Belorusskoy selskhozaystvennoy akademii* = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy. 2017; (3):19-22. Available at: <http://elc.baa.by/vestnik/vestnik2017-3/vestnik2017-3.pdf> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

13. Malykha E.F. Improving the System of Technical Service in Terms of Import. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya* = News of the International Academy of Public Education. 2017; 36:114-118. (In Russ.)

14. Korneev V.M., Kravchenko I.N., Ovchinnikova M.S. Development of the System of Technical Service of Machines in the Agro-Industrial Complex. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* = Repair. Restoration. Modernization. 2017; (6):5-9. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2619 (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

15. Sadykhov S.Ya., Rzayev V.G., Guliev Sh.A. Organization and Justification of Service and Repair Bases of Enterprises of the Agro-Industrial Complex of the Azerbaijan Republic. *Innovatsii v selskom khozyaystve* = Innovations in Agriculture. 2016; (4):34-38. Available at: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/04/Insel19.pdf> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

16. Velychko O., Velychko L. Management of Inter-Farm Use of Agricultural Machinery Based of the Logistical System BOA. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2017; 23(4):534-543. Available at: <https://www.agrojournal.org/23/04-03.pdf> (accessed 17.11.2019). (In Eng.)

17. Hodge I., Hauck J., Bonn A. The Alignment of Agricultural and Nature Conservation Policies in the European Union. *Conservation Biology*. 2015; 29(4):996-1005. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/cobi.12531>

18. Vorotnikov I.L., Gutuev M.Sh., Petrov K.A., Esin O.A. Concept of Regional Technical Service Development. *Espacios*. 2017; 38(23):22. Available at: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n23/17382322.html> (accessed 17.11.2019). (In Eng.)

19. Komarov V.A., Lezin P.P., Grigoriev A.V. Prediction of Durability of Repair and Technological Equipment Units of Agro-Industrial Complex Enterprises. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2012; (9):46-48. (In Russ.)

20. Komarov V.A., Machnev V.A., Grigoriev A.V. Formation of Reliable Repair and Processing Equipment at Service Enterprises. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2015; (5):33-36. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/58-arkhiv-zhurnala-za-2015/418-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-maj-5-215-2015-g> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

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

22. Komarov V.A., Nuyansin E.A. Analysis of Technical Equipment of Enterprises and the Availability of Technology. *Selskiy mehanizator* = Rural Mechanic. 2018; (1):12-13. Available at: <http://www.selmech.msk.ru/118.html> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

23. Komarov V.A., Naumkin N.I., Nuyansin E.A. The Interdisciplinary Projects in Agricultural Engineering Education. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2015; (10):41-43. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/58-arkhiv-zhurnala-za-2015/423-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-oktyabr-10-220-2015-g> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

24. Nuyanzin E.A., Komarov V.A., Machnev V.A., et al. Training of Agroengineering Specialists on the Basis of Specialized Training Centres. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2016; (3):29-32. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/57-arkhiv-zhurnala-za-2016/428-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-3-225-fevral-2016-g> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

25. Komarov V.A., Nuyanzin E.A. Substantiation of the Region Need for Agricultural Engineering Personnel. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2018; (2):41-43. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/55-arkhiv-zhurnala-za-2018/451-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-fevral-2-248-2018-g> (accessed 17.11.2019). (In Russ.)

Received 19.02.2019; revised 18.04.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

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

Vladimir V. Salmin, Head of Department of Transport Machines, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: Q-9667-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7185-6733>, salmin-penza@yandex.ru

Mikhail I. Kurashkin, Postgraduate Student of Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 640005, Russia), ResearcherID: B-1295-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081>, mishakurashkin@gmail.com

Contribution of the authors:

V. A. Komarov – scientific guidance, formulation of the main directions of research, development of theoretical framework, preparation of the initial version of the article; V. V. Salmin – the finalization of the text, formation of general conclusions and literary analysis; M. I. Kurashkin – conducting monitoring of repair and servicing bases, processing of research results, computer work and visualization.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

УДК 631.3:631.51

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201904.578-593



Условия равновесия сельскохозяйственных машин для основной обработки почвы

И. В. Божко*, Г. Г. Пархоменко, С. И. Камбулов
ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»
(г. Зерноград, Россия)

*i.v.bozhko@mail.ru

Введение. Как известно, в настоящее время для решения вопроса равновесия сельскохозяйственных агрегатов является недостаточным применение уравнений статики и динамики, а также требуется введение дополнительных усилий, что в свою очередь существенно увеличивает сложность исследований в данном направлении. Известные исследования характеризуются тем, что при анализе устойчивости почвообрабатывающего орудия, исходя из условия равновесия, в качестве рабочего органа рассматривается стандартный корпус плуга.

Материалы и методы. В исследовании применялись методы, позволяющие определить условия равновесия системы сходящихся сил в аналитической или геометрической форме. Условия равновесия определялись для навесного пятикорпусного комбинированного орудия для послыйной безотвальной обработки почвы. Аналитическое определение условий равновесия системы осуществлялось посредством составления уравнений равновесия. Графическое определение условий равновесия осуществлялось посредством построения силовых многоугольников для вертикальной и горизонтальной плоскости проекций.

Результаты исследования. В результате исследований установлено, что почвообрабатывающие агрегаты имеют избыточное число связей (опор). Получено условие равновесия сил, действующих на почвообрабатывающее орудие с рабочими органами для послыйной безотвальной обработки почвы, имеющие двенадцать связей: пять полевых досок по две связи и два опорных колеса по одной, воспринимаемые реакции от взаимодействия с почвой которых должны быть положительными.

Обсуждение и заключение. По итогам исследований можно отметить, что современные сельхозмашины являются многооперационными статически неопределимыми системами. Вследствие этого усложняется процесс их регулирования во время работы и становится практически невозможным проведение силовых расчетов без принятия дополнительных условий. Для упрощения, точности и наиболее наглядного представления поставленная задача решалась посредством анализа замкнутых силовых многоугольников, методика построения которых представлена как для условия равновесия в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

Ключевые слова: условия равновесия, почвообрабатывающий агрегат, аналитический метод, графический метод, пахотный горизонт

© Божко И. В., Пархоменко Г. Г., Камбулов С. И., 2019



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

Финансирование: Работа выполнена в рамках НИР при финансовой поддержке государственного бюджета.

Для цитирования: Божко И. В., Пархоменко Г. Г., Камбулов С. И. Условия равновесия сельскохозяйственных машин для основной обработки почвы // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 578–593. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.578-593>

Equilibrium Conditions of Agricultural Machines for Main Tillage

I. V. Bozhko*, G. G. Parkhomenko, S. I. Kambulov
State Scientific Establishment “Agricultural Research Center
“Donskoy” (Zernograd, Russia)

*i.v.bozhko@mail.ru

Introduction. The use of the equations of statistics and dynamics is insufficient to solve the problem of equilibrium of agricultural aggregates, and additional efforts are required that in turn significantly increases the complexity of relevant research. Known studies are characterized by the fact that when analyzing the stability of the tillage machine, on the basis of the equilibrium condition, a standard plow body is considered as a working body. **Materials and Methods.** In this study, a variety of methods was used to determine equilibrium conditions for a system of converging forces in an analytical or geometric form. The equilibrium conditions were determined for the mounted five-case combined machine made soilless tillage. Analytical determination of the equilibrium conditions for the system was through the preparation of equilibrium equations. A graphical definition of the equilibrium conditions was obtained by constructing power polygons for vertical and horizontal projection planes.

Results. As a result, it was found that tillage machines have an excessive number of bonds (supports). There is defined a condition for the balance of forces acting on a tillage machine with working bodies for layer-by-layer subsurface tillage, having twelve connections: five field boards with two connections each and two support wheels one at a time, the perceivable responses from the interaction with which should be positive.

Discussion and Conclusion. According to the results, it is noteworthy that modern agricultural machines are multi-operation statically indeterminate systems. As a result, the process of their regulation during operation is complicated and it is practically impossible to make power calculations without accepting additional conditions. For simplification, accuracy and most visual representations, the problem was solved by analyzing closed force polygons, the construction method of which is presented for both the equilibrium conditions in horizontal and vertical planes.

Keywords: equilibrium conditions, tillage machine, analytical method, graphical method, arable horizon

Funding: The work was carried out within the framework of research and development with financial support from the state budget.

For citation: Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Kambulov S.I. Equilibrium Conditions of Agricultural Machines for Main Tillage. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):578-593. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.578-593>

Введение

Обработкой почвы принято считать приемы механического воздействия на почву, способствующие повышению ее плодородия и созданию лучших ус-

ловий для роста и развития растений. Основная обработка почвы включает в себя отвальный и безотвальный способы рыхления почвы. Отвальный способ (вспашка) – это прием основной

обработки почвы, при помощи которого происходит оборачивание, перемешивание и рыхление обрабатываемого слоя почвы. Безотвальный способ (чизелевание) – производится на большую глубину, но без оборота пласта почвы, что в свою очередь снижает эрозию почв и способствует накоплению влаги внутри пласта. Вспашку и чизелевание проводят осенью в системе зяблевой обработки почвы (зять) или иногда весной (весенняя вспашка). При применении этих способов изменяется плотность почвы, а также производится взаимное перемещение слоев почвы внутри плодородного пласта.

К машинам, выполняющим способ отвальной обработки почвы, относятся оборотные плуги лемешного типа российских (ПН-5-35, ПНО, ППО) и зарубежных (Lemken: Europal, Variopal, Juwel, Diamant) производителей. С различными вариантами комплектации, рабочими органами и соответственно шириной захвата таких орудий.

Машины, осуществляющие безотвальный способ обработки почвы, подразделяются на комбинированные агрегаты российского производства (АКПД-6Р, АКП-2, КАО-2, КУМ-4), зарубежным аналогом которых является AmazoneTL, а также плоскорезы глубокорыхлители (чизели). В модельном ряду сельскохозяйственных машин следует отметить такие, как АЧП-2,5, АГР-2,4, ГР-2,5, ГРН-4 российского производства и Lemkin (Labrador 160), Case (EcoloTil 2500, EcoloTiger 870) зарубежных производителей.

Все вышеперечисленные сельскохозяйственные машины для основной обработки почвы по типу агрегатирования с машинно-тракторным агрегатом (МТА) подразделяются на прицепные, полунавесные и навесные. Навесные сельхозмашины, как известно, в 1,5–2 раза легче, значительно проще по устройству и маневреннее при транспортировке, чем прицепные: для их поворота в конце поля нужна по-

лоса вдвое меньшей ширины, чем для прицепных сельхозмашин. Поэтому производительность навесных агрегатов больше, а тяговое сопротивление меньше, чем у прицепных агрегатов равной ширины захвата. Полунавесные сельхозмашины, в свою очередь, по большинству показателей занимают промежуточное место между навесными и прицепными орудиями.

Сельскохозяйственные агрегаты, как известно, во время работы находятся под воздействием различных по величине и направлению сил, из которых одни являются активными (сила тяги, вес); другие, возникающие в результате действия первых, являются пассивными (сопротивление почвы, реакция опор, силы инерции). Движение почвообрабатывающего агрегата во время работы, как правило, не бывает устойчивым из-за непостоянства сопротивления почвы ввиду различной твердости, обрабатываемого пласта, неровностей поля и так далее. Поэтому для решения вопроса равновесия сельскохозяйственных агрегатов является недостаточным применение уравнений статистики и динамики: требуется введение дополнительных усилий, что в свою очередь существенно увеличивает сложность исследований в данном направлении. Для упрощения вопроса, как правило, ограничиваются лишь статическим равновесием, которое практически позволяет отразить основные моменты правильной установки агрегата, учитывая сравнительно небольшие рабочие скорости орудий для основной обработки почвы.

Цель исследования – равновесие навесных сельскохозяйственных машин для основной послойной безотвальной обработки почвы и условия необходимые для его обеспечения.

Обзор литературы

Равновесие сельскохозяйственных машин является определяющим фактором в стабильности работы агрегатов для основной обработки почвы [1]. Од-

ним из базовых условий для почвообрабатывающих агрегатов любых видов является получение работы хорошего качества с минимальным энергопотреблением. Качество работы и потребление энергии зависят от совокупной стабильности во время эксплуатации агрегатов для основной безотвальной обработки почвы. Нестабильная работа агрегата приводит к низкому качеству выполняемых технологических операций, высокому расходу топлива и увеличению количества манипуляций, выполняемых трактором.

Количество и тип сил, которые действуют на сельскохозяйственные машины в процессе работы, определяют устойчивость почвообрабатывающих агрегатов. Когда эти силы находятся в равновесии как по горизонтали, так и по вертикали, работу сельскохозяйственного агрегата можно назвать стабильной [2–4]. Большинство исследований в этом направлении посвящены условиям равновесия плугов с различными способами агрегатирования (прицепные, полунавесные, навесные). Многими исследователями отмечается, что стабильность работы навесных орудий обуславливается различными факторами: физическими и механическими характеристиками почвы (состав, текстура, структура и влажность почвы); размерами среза и перевернутой борозды в процессе вспашки (глубина и ширина); скоростью обработки почвы и массой плуга. На устойчивую работу агрегата оказывает большое влияние тяговое сопротивление плуга. Соединения между рабочими органами (лемехом и отвалом, соответственно, их крепление на опоре и степень износа режущей кромки, формы и скорость полировки поверхностей отливков, сопротивление качению колес, трение носка о стенку борозды) [5–7].

Также известно, что сопротивление почвы в процессе вспашки имеет большое влияние на расчет устойчивости почвообрабатывающих агрегатов. Это объединяет бесконечность реакций,

создаваемых в ходе сложного процесса резки и разрушения борозды на рабочих поверхностях корпуса плуга. Исследователями установлено, что для правильной работы плуги должны поддерживать установленные параметры: рабочую глубину и ширину обработки почвы. Этого можно достичь, если у плугов есть достаточная устойчивость как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях соответственно, а распределение сил, действующих на плуги, находится в равновесии в двух плоскостях [8–10].

Следует отметить, что в вопросе условий равновесия почвообрабатывающих машин для безотвальной обработки почвы таких исследований практически не проводилось.

Материалы и методы

Как известно из механики и статике, для равновесия пространственной системы сходящихся сил необходимо и достаточно, чтобы равнодействующая этой системы сил равнялась нулю. Равновесие плоской системы сходящихся сил определяется тем, что алгебраические суммы проекций всех сил на каждую из двух выбранных любым образом координатных осей, лежащих в плоскости, в которой расположены линии действия всех сил, равнялись нулю.

Если на свободное тело действует система сходящихся сил (неважно пространственная или плоская) эквивалентная нулю, то из этого еще не следует, что данное тело будет находиться в покое от выбранной системы отсчета, так как это тело может двигаться и по инерции. Необходимыми и достаточными условиями состояния покоя свободного тела, на которое действует система сходящихся сил, являются:

- равнодействующая этой системы сил должна быть равна нулю;
- начальные скорости всех точек рассматриваемого тела также должны быть равны нулю.

Если эти два условия выполняются, то можно сказать, что данное тело

находится в равновесии (условия равновесия свободного тела в этом случае полностью совпадают с условиями равновесия свободной материальной точки). Однако иногда под равновесием рассматриваемого тела понимают его движение по инерции, а не только состояние покоя. В связи с этим в статике решают задачи, относящиеся не только к телам, находящимся в покое, но и к телам, движущимся по инерции. Если же на данное тело наложены связи, то, присоединяя силы реакций связей к активным силам, приложенным к телу, можно рассматривать его как свободное (аксиома связей). При этом в большинстве случаев в задачах статики по некоторым известным активным силам, приложенным к данному несвободному телу, требуется определить неизвестные силы реакций связей, предполагая, что тело находится в покое и что, следовательно, все приложенные к нему активные силы и силы реакций связей уравниваются [11].

При решении таких задач, когда линии действия всех сил, приложенных к телу, включая и силы реакций, пересекаются в одной точке, нужно воспользоваться условиями равновесия системы сходящихся сил в аналитической или геометрической форме.

При аналитическом методе находят искомые величины из уравнений равновесия, в левые части которых войдут, кроме проекций известных активных сил, и проекции неизвестных сил реакций связей. Следует отметить, что те соотношения, в которые будут входить проекции сил реакций связей, называют *уравнениями равновесия*, а те из них, в которые проекции сил реакций связей не будут входить, называют *условиями равновесия*. Если тело несвободно, то число условий равновесия будет равно числу степеней свободы тела, то есть числу независимых перемещений, которые может иметь это тело.

При применении графического метода для системы сходящихся сил

определяются искомые силы реакций связей или другие неизвестные в данной задаче величины при помощи построения замкнутого силового многоугольника или *чисто графически*, строя этот силовой многоугольник в строго определенном масштабе или вычисляя его стороны по правилам *геометрии тригонометрии* [12; 13].

Результаты исследования

Опорами сельхозмашин во время работы служат общепринятые элементы конструкции, такие как: полевые доски, колеса ограничения глубины обработки и устройства агрегатирования с трактором.

Принимая во внимание, что масса МТА значительно (приблизительно в 10 раз) больше массы агрегируемой сельхозмашины, при определении условий равновесия последней число степеней свободы будет определяться по отношению к остоу трактора [14].

Наибольшее число степеней свободы имеет прицепная сельскохозяйственная машина, так как, будучи агрегатированна с трактором в одной точке (точке прицепа), она может совершать поворот вдоль продольной, поперечной и вертикальной осей, проведенных через эту точку, а шарнирное присоединение прицепа к раме сельхозмашины делает возможным также поступательные перемещения сельхозмашины относительно трактора в вертикальном направлении. Поэтому прицепные сельхозмашины имеют относительно трактора четыре степени свободы.

Навесные сельхозмашины, агрегатированные с трактором посредством трехточечного механизма навески, имеют относительно трактора две степени свободы – возможность поворота вокруг осей y и z . Уменьшение числа степеней свободы навесной сельскохозяйственной машины относительно трактора до одной невозможно, так как это в свою очередь приведет к поломке агрегируемого устройства (если отсутствует возможность поворота сельхозмашины

вокруг оси y) и потере управляемости трактора (если отсутствует возможность поворота вокруг оси z). Агрегатирование навесной сельхозмашины с трактором при оставлении трех степеней свободы (возможности поворота вокруг осей x , y , z) целесообразно лишь в многокорпусных сельхозмашинах (5 и более корпусов), когда необходимо обеспечить независимое приспособление сельхозмашины и трактора к рельефу поля в поперечной плоскости проекции.

Полунавесные сельхозмашины в зависимости от способа агрегатирования с трактором имеют относительно последнего три или четыре степени свободы.

Как правило, сельхозмашины имеют избыточное число связей (опор). Так, к примеру, навесное пятикорпусное комбинированное орудие для послышной безотвальной обработки почвы имеет двенадцать связей: пять полевых досок, каждая из которых, соприкасаясь с дном и стенкой борозды, одновременно воспринимает два усилия (одно параллельное оси z , другое – оси y), и два опорных колеса, которые добавляют по еще одной связи каждое. Число степеней свободы такого орудия относительно МТА равно двум, следовательно, в рассматриваемом случае число избыточных опор равно десяти.

Таким образом, современные сельхозмашины являются многооперационными статически неопределимыми системами, что в свою очередь усложняет их регулировку во время работы и делает практически невозможным проведение силовых расчетов без принятия дополнительных условий. Поэтому при проведении расчетов предположим, что:

- полевые доски корпусов сельхозмашины не соприкасаются с дном борозды, что соответствует случаю работы долотообразного лемеха;

- все корпуса рабочих органов сельхозмашины и полевые доски одинаково нагружены;

- величины коэффициента трения почвы о сталь f и коэффициента пере-

катывания колеса μ известны ($\mu = \text{const}$ при различных нагрузках на колесо).

Равенство усилий, приложенных к рабочей поверхности каждого корпуса, позволяет заменить силы и моменты, приложенные к отдельным корпусам, равнодействующей силой и суммарным моментом, приложенными к среднему корпусу почвообрабатывающей машины. Из тех же соображений усилия, приложенные к полевым доскам корпусов агрегата, заменяют равнодействующей силой F , приложенной к полевой доске среднего корпуса.

Определение сил, действующих на почвообрабатывающий агрегат, может быть выполнено аналитическим и графическим методами [15; 16].

Поскольку колеса и полевые доски являются односторонними связями, условия равновесия хода агрегата заключаются в том, чтобы реакции этих опор были всегда положительными.

Проверочный расчет устойчивости хода производится дважды:

- для случая работы агрегата с острыми долотами, когда угол ψ , характеризующий наклон силы R_{xz} , имеет положительное значение;

- при работе агрегата с износившимися (тупыми) долотами, когда угол ψ отрицательный.

Аналитический метод определения сил, действующих на навесной почвообрабатывающий агрегат

Задача заключается в определении усилий S , N_n , N_d в звеньях механизма навески T и в тягах грузового вала, а также усилий Q и F , приложенных соответственно к ободу опорного колеса и полевой доске среднего корпуса агрегата. При этом известны масса агрегата G , главный вектор сил сопротивления почвы R и момент динамы M_0 (рис. 1). Линии действия усилий T и T' в тягах грузового вала механизма навески на схеме изображены параллельными оси Z и приложенными к оси подвеса в точках, соответствующих центрам присоединительных втулок нижних тяг механизма навески. Такое

допущение возможно, так как определение усилий T и T' (равных по величине, но при этом противоположно направленных) необходимо лишь для определения величины момента, удерживающего агрегат от поворота вокруг оси x .

Координаты точек приложения всех сил известны, за начало координат на схеме (рис. 1) принята середина левой цапфы оси подвеса – точка O .

Использование уравнений, определяющих условия равновесия твердого тела в пространстве, дает:

$$R_x + Q_x + F_x + S_x - N_{lx} - N_{nx} = 0, \quad (1)$$

$$F_y - R_y + N_{ly} - N_{ny} = 0, \quad (2)$$

$$T' - T + N_{lz} + N_{nz} + Q_z + S_z - R_z - G = 0, \quad (3)$$

$$Q_z y_Q - G y_G + F_y z_F - R_y z_R - R_z y_R + \\ + S_z y_z + N_{lz} y_N + T' y_T - M_{Ox} = 0, \quad (4)$$

$$Q_z x_Q + Q_z z_Q - S_x z_S + R_x z_R - R_z x_R + \\ + F_x z_F - G x_G + M_{Oy} = 0, \quad (5)$$

$$N_{lx} y_N - S_x y_S - Q_x y_Q - R_x y_R - R_y x_R + \\ + F_y x_F - F_x y_F - M_{Oz} = 0. \quad (6)$$

Учитывая, что:

$$T = T'; Q_x = \mu Q_z; F_x = f F_y;$$

$$S_z = S_x \operatorname{tg} \alpha; N_{lz} = N_{lx} \operatorname{tg} \beta; N_{nz} = N_{nx} \operatorname{tg} \beta; \\ N_{ly} = N_{lx} \operatorname{tg} \gamma_1; N_{ny} = N_{nx} \operatorname{tg} \gamma_2,$$

где α , β , γ_1 и γ_2 – углы, характеризующие направление звеньев механизма навески в соответствующих плоскостях проекций [17; 18].

Далее в найденных уравнениях необходимо сделать подстановки и упрощения, после чего произвести расчет обычными методами, применяемыми для решения системы линейных уравнений.

Графическое определение сил, действующих на агрегат, навешенный на колесный трактор

Заданными являются силы R_{xz} и R_{xy} , приложенные к среднему корпусу аг-

регата соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях проекций, а также вес сельхозмашины G .

Необходимо определить реакцию F стенки борозды, реакцию Q на опорных колесах агрегата и усилия S , N_1 и N_2 в верхнем, нижнем левом и нижнем правом звеньях механизма навески.

Рассматривая равновесие агрегата в вертикальной плоскости проекций, зададимся значением коэффициента перекачивания опорных колес μ , также определимся направлением силы Q и величиной силы F_x . При работе агрегата на плотных почвах $\mu = 0,15$, а при работе на рыхлых почвах $\mu = 0,2$ соответственно. Величина силы F_x зависит от величины боковой составляющей тягового сопротивления R_y , коэффициента трения f , положения на раме агрегата опорных колес, а также от направления в плане линии тяги и верхнего звена AB механизма навески. Так как в начале расчетов представляется невозможным точно определить влияние перечисленных факторов на величину силы F_x , то принимаем:

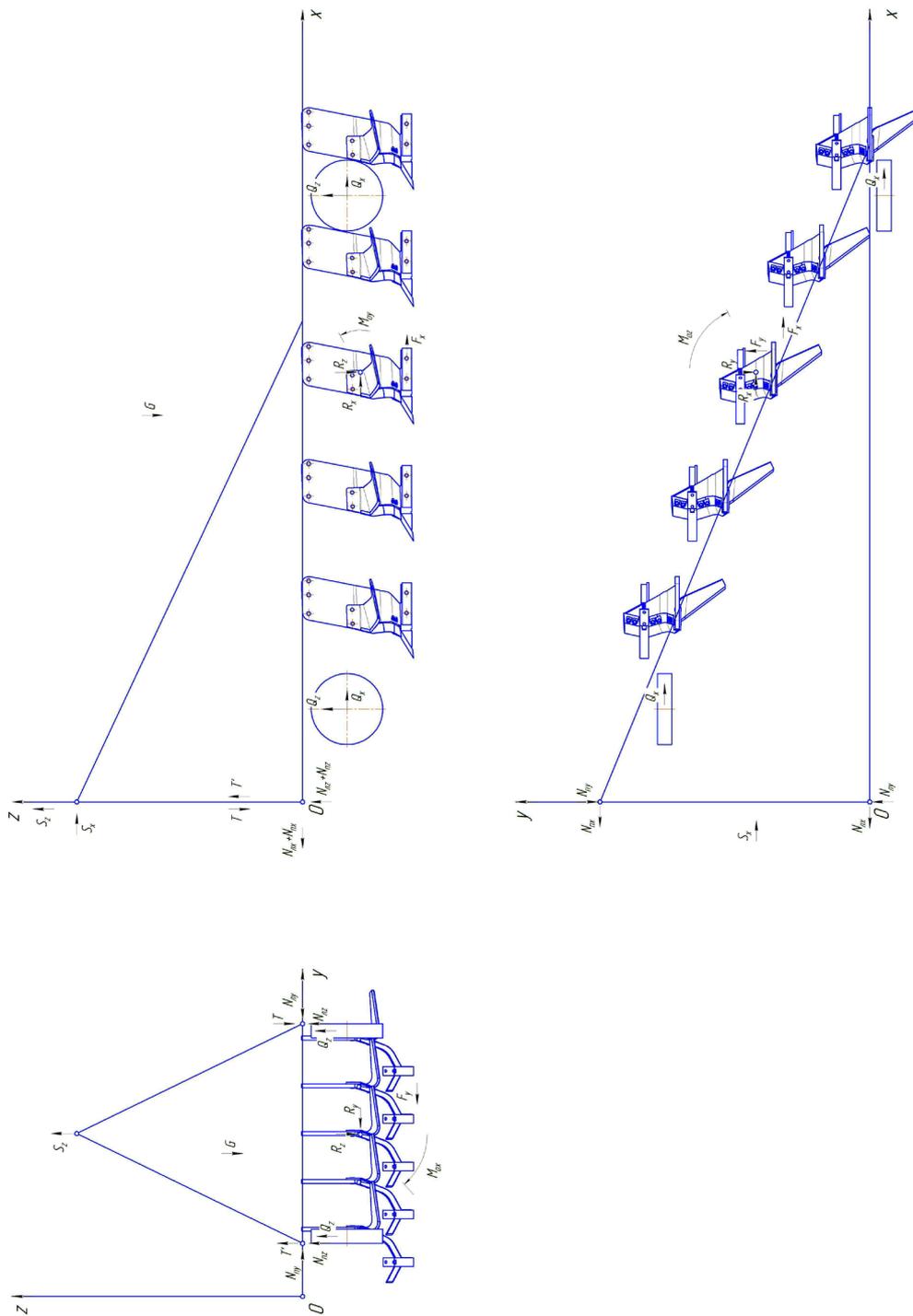
$$F_y = R_y = \frac{R_x}{5} \text{ и } f = 0,5, \quad (7)$$

откуда:

$$F_x \approx \frac{R_x}{10}. \quad (8)$$

Силу F будем считать приложенной к концу полевой доски среднего корпуса агрегата.

Силы, действующие на агрегат, должны быть нанесены на соответствующие проекции схемы сельхозмашины. Геометрическое сложение этих сил произведем не на самой схеме, а в стороне, построив для этого в каждой плоскости проекции свой силовой многоугольник. Построение силовых многоугольников дает более точные и наглядные результаты, чем последовательное сложение на схеме агрегата действующих на него сил.



Р и с. 1. Схема сил, действующих на навесной пятикорпусный агрегат

F i g. 1. Forces acting on the mounted five body unit

Построение силового многоугольника в вертикальной плоскости проекций трактора (рис. 2) начнем со сложения сил G и R_{xz} , после определения направления равнодействующей этих сил (силы R_G) на схеме агрегата через точку 1 , являющуюся пересечением направления сил G и R_{xz} , проводим прямую $1-2$, параллельную равнодействующей силе R_G . Сложив силы R_G и F_x , получим результирующую силу R_1 , параллельно направлению которой через точку 2 на схеме агрегата отложим прямую $2-3$, пересекающую направление силы Q в точке 3 . Для графического определения направления линии тяги (направления силы P_{xz}) на схеме агрегата соединим прямой точки 3 и π_1 .

Основная силовая нагрузка Q при работе агрегата приходится на переднее опорное колесо, вследствие чего построение силового многоугольника производится в привязке точек проекций сил относительно переднего опорного колеса. Заднее опорное колесо предусмотрено в конструкции агрегата для повышения устойчивости хода рамы сельхозмашины параллельно пахотному горизонту и снижению вероятности возникновения эффекта глиссирования [19; 20].

Путем разложения в силовом многоугольнике силы R_1 по направлениям сил P_{xz} и Q определим их величину. Далее разложением силы P_{xz} по направлениям AB и CD найдем проекции усилий S и $N_1 + N_2$ в звеньях механизма навески на плоскость xOz . На этом заканчивается определение сил, действующих на агрегат в вертикальной плоскости проекций. В том случае, когда точка π_1 из-за малого наклона звеньев лежит за пределами схемы, искомые силы можно определить построением плана скоростей механизма $ABCD$ в масштабе звена CD .

В горизонтальной плоскости проекций произведем построения, аналогичные описанным выше (рис. 3).

Построение силового многоугольника начнем со сложения сил R_{xy} и Q_x .

Сила Q_x имеет обратное направление относительно движения агрегата. Так как в конструкции предусмотрено второе опорное колесо, расположенное по линии направления силы R_{xy} , также имеющее силу Q_x и оказывающее уравновешивающий эффект хода рамы агрегата относительно пахотного горизонта, можно сделать допущение о том, что направление равнодействующей силы R_Q , образованной силами R_{xy} и Q_x , будет параллельно направлению силы R_{xy} , образующими точку 4 на крайнем рабочем органе агрегата. А воздействия, оказываемые силами Q_x от обоих опорных колес, являются уравновешивающими друг друга, и ими можно пренебречь.

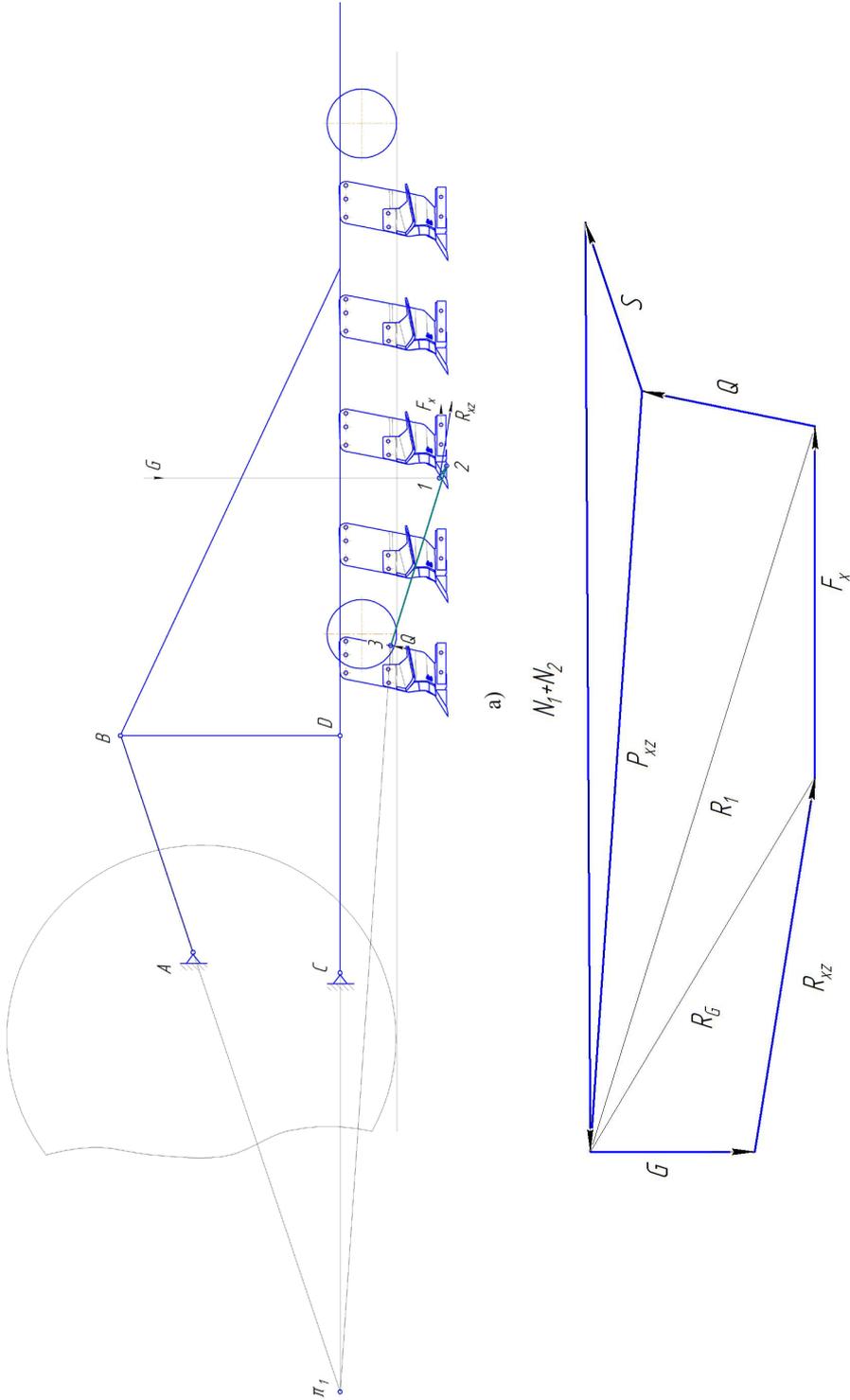
Через точку 4 до пересечения с направлением силы F проведем прямую $4-5$. Точку 5 соединим с полюсом π_2 , после чего в многоугольнике сил разложим силу R_Q по направлениям, параллельным направлению силы F и линии $5 - \pi_2$ и определим величины сил P_{xy} и F .

Из многоугольника сил вертикальной плоскости проекций в силовой многоугольник горизонтальной плоскости проекций спроектируем усилие S , воспринимаемое верхним звеном механизма навески, и найдем равнодействующую R_s сил P_{xy} и S . Далее, перенеся из схемы агрегата в силовой многоугольник направления C_1D_1 и C_2D_2 нижних звеньев механизма навески, разложим по этим направлениям силу R_s . Определим величину проекций на плоскость xOy усилий N_1 и N_2 , возникающих в этих звеньях.

Обсуждение и заключение

По итогам исследований следует отметить, что современные сельхозмашины являются многооперационными статически неопределимыми системами. Вследствие этого усложняется их регулировка во время работы и становится практически невозможным проведение силовых расчетов без принятия дополнительных условий.

Установлено, что почвообрабатывающие агрегаты имеют избыточное

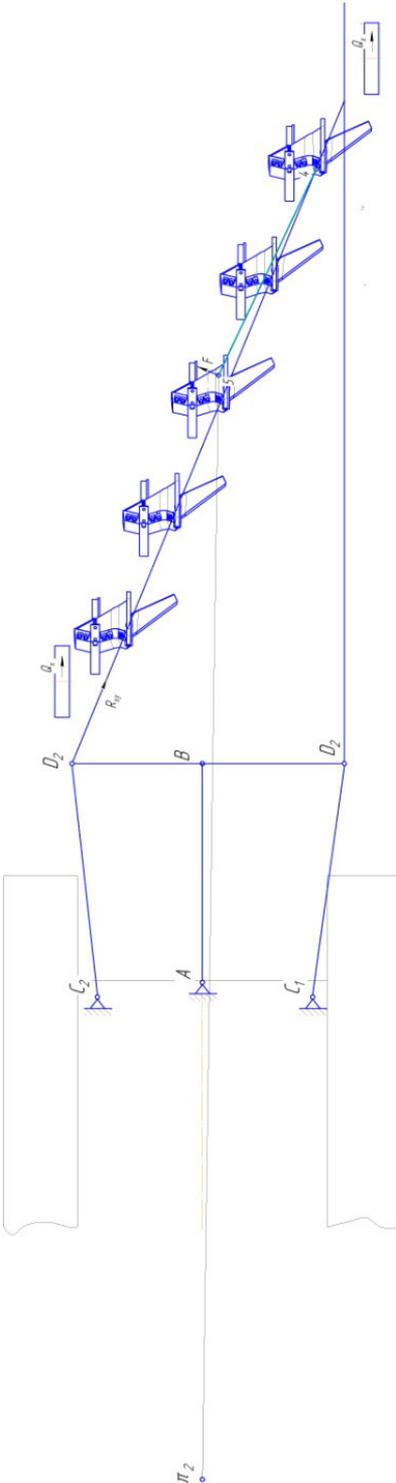


Р и с. 2. Схема сил, действующих на агрегат, навешенный на колесный трактор, в вертикальной плоскости проекций:

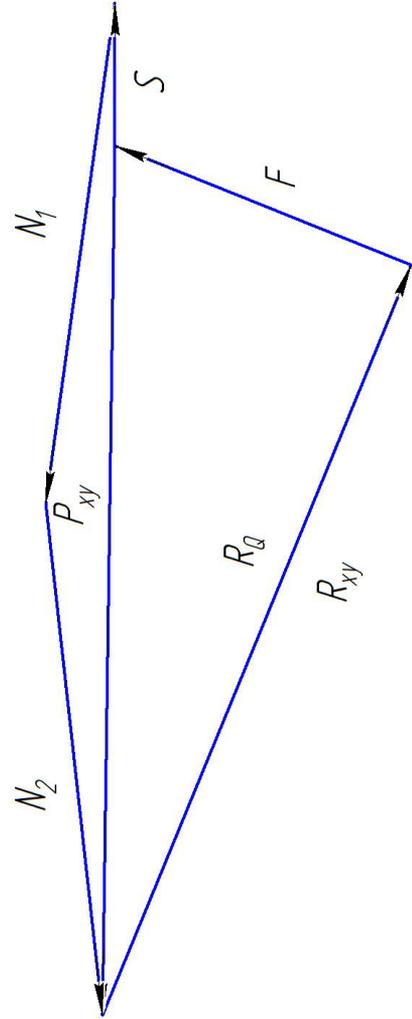
а) схема сил; б) силовой многоугольник

Fig. 2. Forces acting on the mounted unit of the wheeled tractor, in a vertical plane of projections:

a) force scheme; b) force polygon



a)



b)

Р и с. 3. Схема сил, действующих на агрегат, навешенный на колесный трактор, в горизонтальной плоскости проекций:
 а) схема сил; б) силовой многоугольник
 Fig. 3. Forces acting on the mounted unit of the wheeled tractor, in the horizontal plane of the projections:
 a) force scheme; b) force polygon

число связей (опор). Навесное пятикорпусное комбинированное орудие для послонной безотвальной обработки почвы имеет двенадцать связей: пять полевых досок, каждая из которых, соприкасаясь с дном и стенкой борозды, одновременно воспринимает два усилия (одно параллельное оси z , другое – оси y), и два опорных колеса, которые добавляют по еще одной связи каждое. В то время, как число степеней свободы такого орудия относительно МТА равно двум, следовательно, в рассматриваемом случае число избыточных опор равно десяти.

Условие равновесия хода агрегата относительно пахотного горизонта заключается в том, чтобы реакции, воспринимаемые от опор, опорных колес глубины хода и полевых досок агрегата, были всегда положительными.

Определение сил, действующих на почвообрабатывающий агрегат, производилось аналитическим и графическим методами.

При аналитическом методе искомые величины определялись из уравнений равновесия, в левые части которых входят, кроме проекций известных активных сил, и проекции неизвестных сил реакций связей. Далее в найденных уравнениях равновесия необходимо сделать подстановки и упрощения, после чего произвести расчет обычными методами, применяемыми для решения системы линейных уравнений.

При применении графического метода для системы сходящихся сил искомые силы реакций связей или другие неизвестные величины определялись при помощи построения замкнутого силового многоугольника. Графическое определение сил, действующих на навесной почвообрабатывающий агрегат производили как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости проекций. Построение силовых многоугольников дает более точные и наглядные результаты, чем последовательное сложение на схеме агрегата действующих на него сил.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Paraschiv G., Maican E., Paraschiv I., Bucur D.** Study on Stability at Work for Tillage Aggregates // *Cercetări Agronomice în Moldova*. 2007. Issue 2. Pp. 5–13. URL: http://www.uaiasi.ro/CERCET_AGROMOLD/en-V2_2007 (дата обращения: 18.11.2019).
2. **Tenu I., Carlescu P., Cojocariu P., Rosca R.** Impact of Agricultural Traffic and Tillage Technologies on the Properties of Soil // *Resource Management for Sustainable Agriculture*. 2012. Pp. 263–296. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/47746>
3. **Godwin R. J.** A Review of the Effect of Implement Geometry on Soil Failure and Implement Forces // *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 97, Issue 2. Pp. 331–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>
4. **Askari M., Khalife E.** Draft Force Inputs for Primary and Secondary Tillage Implements in a Clay Loam Soil // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 21, Issue 12. Pp. 1789–1794. URL: https://www.researchgate.net/publication/248386870_Draft_Force_Inputs_for_Primary_and_Secondary_Tillage_Implements_in_a_Clay_Loam_Soil (дата обращения: 18.11.2019).
5. **Al-Suhaibani S. A., Ghaly A. E.** Comparative Study of the Kinetic Parameters of Three Chisel Plows Operating at Different Depth Sand Forward Speed in a Sandy Soil // *The International Journal of Engineering and Science*. 2013. Vol. 2, Issue 7. Pp. 42–59. URL: <http://www.theijes.com/papers/v2-i7/Part.6/H0276042059.pdf> (дата обращения: 18.11.2019).
6. **Deshpande Sh., Shirwal S.** Studies on Operational Parameters of Selected Tillage Tools in Soil Bin // *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 5, Issue 3. Pp. 381–389. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/a77b/60293849cfa982ac144405774dae37ad02bf.pdf> (дата обращения: 18.11.2019).

7. **Mandradzhiev S., Kehayov D.** Degree of Influence of the Lid Angle over Soil Sputtering and Disintegration by a Tiller // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2007. Vol. 13. Pp. 247–252. URL: <https://www.agrojournal.org/13/02-13-07.pdf> (дата обращения: 18.11.2019).
8. Effect of Soil Forces on the Surface of Moldboard Plow under Different Working Conditions / I. A. Mari [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2014. Vol. 20, Issue 2. Pp. 277–281. URL: https://www.researchgate.net/publication/262603386_Effect_of_soil_forces_on_the_surface_of_moldboard_plow_under_different_working_conditions/references (дата обращения: 18.11.2019).
9. Plough Section Control for Optimised Uniformity in Primary Tillage / S. K. Nielsen [et al.] // Advances in Animal Biosciences. 2017. Vol. 8, Issue 2. Pp. 444–449. DOI: <https://doi.org/10.1017/S2040470017000735>
10. **Al-Subaibani S. A., Ghaly A. E.** Performance Evaluation of a Heavy Duty Chisel Plow at Various Tillage Depth and Forward Speeds // American J. of Engineering and Applied Sciences. 2010. Vol. 3, Issue 4. Pp. 588–596. URL: <https://thescrip.com/pdf/10.3844/ajeassp.2010.588.596> (дата обращения: 18.11.2019).
11. **Manuwa S. I.** Performance Evaluation of Tillage Tines Operating under Different Depths in a Sandy Clay Loam Soil // Soil And Tillage Research. 2009. Vol. 103, Issue 2. Pp. 399–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.004>
12. **Ibrahmi A., Bentaher H., Maalej A.** Soil-Blade Orientation Effect on Tillage Forces Determined by 3D Finite Element Models // Spanish Journal of Agricultural Research. 2014. Vol. 12, no. 4. Pp. 941–950. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2014124-5766>
13. **Safari M., Gazor H. R.** Comparison of Conventional Tractors Performance during Primary Tillage in Iran // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2014. Vol. 16, Issue 1. Pp. 61–68. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2608/0> (дата обращения: 18.11.2019).
14. **Rosa U. A., Wulfsohn D.** Soil Bin Monorail for High-Speed Testing of Narrow Tillage Tools // Biosystems Engineering. 2008. Vol. 99, Issue 3. Pp. 444–454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2007.11.010>
15. **Keller T., Arvidsson J.** A Model for Prediction of Vertical Stress Distribution near the Soil Surface Below Rubber-Tracked Undercarriage Systems Fitted on Agricultural Vehicles // Soil and Tillage Research. 2016. Vol. 155. Pp. 116–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.014>
16. A Comparative Study of Conventional and Controlled Traffic in Irrigated Cotton: I. Heavy Machinery Impact on the Soil Resource / J. Bennet [et al.] // Soil and Tillage Research. 2017. Vol. 168. Pp. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.12.012>
17. **Носков Н. К., Позин Б. М., Трояновская И. П.** Математическая модель бокового увода трактора // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. № 1 (31). С. 35–39. URL: [https://mospolytech.ru/storage/files/izvestiya/Izvestiya_MGTU_MAMI_No_1\(31\)_2017.pdf](https://mospolytech.ru/storage/files/izvestiya/Izvestiya_MGTU_MAMI_No_1(31)_2017.pdf) (дата обращения: 18.11.2019).
18. **Миронов Д. А., Лискин И. В., Сидоров С. А.** Влияние геометрических параметров долота на тяговые характеристики и ресурс лемехов отечественных плугов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 6. С. 25–29. URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/105> (дата обращения: 18.11.2019).
19. **Лискин И. В., Миронов Д. А., Сидоров С. А.** Равновесие плуга в продольно-вертикальной плоскости // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 6. С. 41–46.
20. **Adem H. N., Vanapalli S. K.** Review of Methods for Predicting in Situ Volume Change Movement of Expansive Soil Over Time // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 7, Issue 1. Pp. 73–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.11.002>

Поступила 27.03.2019; принята к публикации 18.04.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Божко Игорь Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: E-9518-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, ScopusID: 57204682997, i.v.bozhko@mail.ru

Пархоменко Галина Геннадьевна, ведущий научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: D-2633-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, parkhomenko.galya@yandex.ru

Камбулов Сергей Иванович, главный научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), доктор технических наук, ResearcherID: A-6156-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, ScopusID: 57207655797, kambulov.s@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. В. Божко – постановка задачи, определение методологии исследования, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, критический анализ и доработка решения; Г. Г. Пархоменко – постановка задачи, анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка текста; С. И. Камбулов – научное руководство, постановка задачи, критический анализ и доработка решения.

Благодарности: Авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Paraschiv G., Maican E., Paraschiv I., Bucur D. Study on Stability at Work for Tillage Aggregates. *Cercetări Agronomice în Moldova = Agronomic Research in Moldova*. 2007; (2):5-13. Available at: http://www.uaiasi.ro/CERCET_AGROMOLD/en-V2_2007 (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
2. Tenu I., Carlescu P., Cojocariu P., Rosca R. Impact of Agricultural Traffic and Tillage Technologies on the Properties of Soil. *Resource Management for Sustainable Agriculture*. 2012; 263-296. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/47746>
3. Godwin R.J. A Review of the Effect of Implement Geometry on Soil Failure and Implement Forces. *Soil and Tillage Research*. 2007; 97(2):331-340. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>
4. Askari M., Khalife E. Draft Force Inputs for Primary and Secondary Tillage Implements in a Clay Loam Soil. *World Applied Sciences Journal*. 2013; 21(12):1789-1794. Available at: https://www.researchgate.net/publication/248386870_Draft_Force_Inputs_for_Primary_and_Secondary_Tillage_Implements_in_a_Clay_Loam_Soil (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
5. Al-Suhaibani S.A., Ghaly A.E. Comparative Study of the Kinetic Parameters of Three Chisel Plows Operating at Different Depth Sand Forward Speed in a Sandy Soil. *The International Journal of Engineering and Science*. 2013; 2(7):42-59. Available at: <http://www.theijes.com/papers/v2-i7/Part.6/H0276042059.pdf> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
6. Deshpande Sh., Shirwal S. Studies on Operational Parameters of Selected Tillage Tools in Soil Bin. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 2015; 5(3):381-389. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/a77b/60293849cfa982ac144405774dae37ad02bf.pdf> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
7. Mandradzhiev S., Kehayov D. Degree of Influence of the Lid Angle over Soil Sputtering and Disintegration by a Tiller. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2007; 13:247-252. Available at: <https://www.agrojournal.org/13/02-13-07.pdf> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)

8. Mari I.A., Ji Ch., Tagar A.A., et al. Effect of Soil Forces on the Surface of Moldboard Plow under Different Working Conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2014; 20(2):277-281. Available at: https://www.researchgate.net/publication/262603386_Effect_of_soil_forces_on_the_surface_of_moldboard_plow_under_different_working_conditions/references (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
9. Nielsen S.K., Munkholm L.J., Aarestrup M.H., et al. Plough Section Control for Optimised Uniformity in Primary Tillage. *Advances in Animal Biosciences*. 2017; 8(2):444-449. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S2040470017000735>
10. Al-Suhaibani S. A., Ghaly A. E. Performance Evaluation of a Heavy Duty Chisel Plow at Various Tillage Depth and Forward Speeds. *American J. of Engineering and Applied Sciences*. 2010; 3(4):588-596. Available at: <https://thescipub.com/pdf/10.3844/ajeassp.2010.588.596> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
11. Manuwa S.I. Performance Evaluation of Tillage Tines Operating under Different Depths in a Sandy Clay Loam Soil. *Soil And Tillage Research*. 2009; 103(2):399-405. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.004>
12. Ibrahim A., Bentaher H., Maalej A. Soil-Blade Orientation Effect on Tillage Forces Determined by 3D Finite Element Models. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2014; 12(4):941-950. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2014124-5766>
13. Safari M., Gazor H.R. Comparison of Conventional Tractors Performance during Primary Tillage in Iran. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2014; 16(1):61-68. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2608/0> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
14. Rosa U.A., Wulfsohn D. Soil Bin Monorail for High-Speed Testing of Narrow Tillage Tools. *Biosystems Engineering*. 2008; 99(3):444-454. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2007.11.010>
15. Keller T., Arvidsson J. A Model for Prediction of Vertical Stress Distribution near the Soil Surface Below Rubber-Tracked Undercarriage Systems Fitted on Agricultural Vehicles. *Soil and Tillage Research*. 2016; 155:116-123. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.014>
16. Bennet J., Robertson S.D., Jensen T.A., et al. A Comparative Study of Conventional and Controlled Traffic in Irrigated Cotton: I. Heavy Machinery Impact on the Soil Resource. *Soil and Tillage Research*. 2017; 168:143-154. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.12.012>
17. Noskov N.K., Pozin B.M., Troyanovskaya I.P. Mathematical Model of the Lateral Traction of the Tractor. *Izvestiya MGTU "MAMI" = News of Moscow State Technical University MAMI*. 2017; (1):35-39. Available at: [https://mospolytech.ru/storage/files/izvestiya/Izvestiya_MGTU_MAMI_No_1\(31\)_2017.pdf](https://mospolytech.ru/storage/files/izvestiya/Izvestiya_MGTU_MAMI_No_1(31)_2017.pdf) (accessed 18.11.2019). (In Russ.)
18. Mironov D.A., Liskin I.V., Sidorov S.A. Influence of Geometrical Parameters of Chisel on Traction Characteristics and Resource of Domestic Ploughshares. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2015; (6):25-29. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/105> (accessed 18.11.2019). (In Russ.)
19. Liskin I.V., Mironov D.A., Sidorov S.A. Plow Balance in the Longitudinally Vertical Plane. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2014; (6):41-46. (In Russ.)
20. Adem H.H., Vanapalli S.K. Review of Methods for Predicting in Situ Volume Change Movement of Expansive Soil over Time. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015; 7(1):73-86. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.11.002>

Received 27.03.2019; revised 18.04.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Igor V. Bozhko, Researcher of Field Mechanization Laboratory of Plant Production Mechanization Department, State Scientific Establishment "Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: E-9518-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, ScopusID: 57204682997, i.v.bozhko@mail.ru

Galina G. Parkhomenko, Leading Researcher of Field Mechanization Laboratory of Plant Production Mechanization Department, State Scientific Establishment “Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: D-2633-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, parkhomenko.galya@yandex.ru

Sergey I. Kambulov, Senior Researcher of Field Mechanization Laboratory of Plant Production Mechanization Department, State Scientific Establishment “Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: A-6156-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, ScopusID: 57207655797, kambulov.s@mail.ru

Contribution of the authors:

I. V. Bozhko – problem statement, research methodology developing, collecting and analyzing analytical and practical materials on the research topic, critical analysis and finalizing the solution; G. G. Parkhomenko – problem statement, analysis of scientific sources on the topic of research, critical analysis and revision of the text; S. I. Kambulov – scientific guidance, problem statement, critical analysis and finalizing the solution.

Acknowledgements: The authors would like to thank anonymous reviewers.

All authors have read and approved the final manuscript.



Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу

А. В. Анисимов*, Ф. Я. Рудик
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Россия)

*anisimovaleksan@mail.ru

Введение. Современная технология переработки зерна уделяет особое внимание качественной и эффективной подготовке зерна к помолу. На малых предприятиях с сокращенным технологическим процессом это практически единственный способ, позволяющий повысить выход и качество получаемой продукции. Без правильной и многоступенчатой подготовки зерна к помолу на малых предприятиях невозможно достичь качества и количества продукции, выпускаемой промышленными мельницами. Шелушение зерна является одним из самых эффективных способов очистки поверхности от загрязнений и удаления наружных оболочек. Удаление внешних оболочек позволяет на сокращенных схемах помола повысить выход муки высшего сорта. Ключевое влияние на эффективность процесса шелушения оказывают конструктивные и режимные параметры шелушительной машины. Цель данной работы – экспериментальное определение оптимальных условий протекания процесса обработки зерна в шелушительно-сушильной машине.

Материалы и методы. Для определения оптимальных условий протекания процесса обработки зерна в шелушительно-сушильной машине был применен метод экстремального планирования эксперимента. Отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации, был осуществлен методом случайного баланса. При отыскании области оптимума использовался метод крутого восхождения по поверхности отклика (метод Бокса – Уилсона): реализованы матрица планирования, статистический анализ полученных результатов и крутое восхождение по поверхности отклика. Проверка результатов исследования осуществлялась с помощью программы Statistica 10.0.

Результаты исследования. На основании экспериментальных исследований была получена математическая модель технологического процесса обработки зерна пшеницы в шелушительно-сушильной машине, связывающая конструктивные и режимные параметры машины с влажностью обрабатываемого зерна. Полученные результаты подтвердили работоспособность разработанной машины при работе с зерном повышенной влажности и являются основополагающими для ее дальнейшей модернизации.

Обсуждение и заключение. Анализ диаграммы рассеивания управляемых факторов позволил отобрать наиболее значимые из них по степени влияния на выбранный параметр оптимизации – белизну муки, полученную из обработанного зерна. В результате оценки экспериментальных данных проведенных исследований определили конструктивные и режимные параметры разработанной машины, соответствующие области оптимума параметра оптимизации: частота вращения вала – 1400 об/мин; угол наклона выштамповки на ситовом барабане – 15 градусов; исходная влажность обрабатываемого зерна – 15,5 %; производительность машины – не выше 700 кг/ч.

© Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., 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: шелушение, белизна, влажность, сушка, гидротермическая обработка, планирование эксперимента, диаграмма рассеивания

Для цитирования: Анисимов А. В., Рудик Ф. Я. Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 594–613. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>

The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding

A. V. Anisimov*, F. Ya. Rudik
Saratov State Agrarian University
(Saratov, Russia)

*anisimovaleksan@mail.ru

Introduction. Modern technology of grain processing pays special attention to the qualitative and efficient preparation of grain for milling. At small enterprises with a reduced technological process, this is almost the only way to improve product yield and quality. Without proper multi-stage preparation of grain for milling at small enterprises, it is impossible to achieve the required quality and quantity of products produced by industrial mills. Grain peeling is one of the most effective ways to clean the surface from dirt and remove outer shells. The removal of outer shells allows increasing the yield of high-grade flour at reduced milling diagrams. The efficiency of the peeling process is significantly influenced by the design and operating parameters of the peeling machine. The purpose of this work is the experimental determination of optimal conditions for grain processing in the peeling and drying machine (the optimal combination of factors).

Materials and Methods. To determine optimal conditions for grain processing in the peeling and drying machine, the method of extreme planning of the experiment was applied. The method of random balance was used to select the most significant factors based on their influence on the optimization parameter. The method of steep ascent on the response surface (the Box – Wilson method) was used to find the optimum area (the planning matrix was realized and statistical analysis of results and steep ascent on the response surface was carried out). Verification of the results was carried out on the software Statistica 10.0. **Results.** On the basis of experiments, a mathematical model of the technological process of wheat processing in the peeling and drying machine there were obtained, which linked the structural and mode parameters of the machine with the humidity of the treated grain. The results of the experiment confirmed the operability of the developed machine when working with high-humidity grain; they are fundamental for the machine's further modernization.

Discussion and Conclusion. The analysis of the controlled factor dispersion diagram allowed us to select the most significant of them based on influence on the selected optimization parameter, the white flour color obtained from the treated grain. As a result of the evaluation of experimental data of the conducted studies, the design and mode parameters of the developed machine were determined, corresponding to the areas of the optimal optimization parameter: shaft rotation speed is 1400 rpm, angle of inclination of stamping on the sieve drum is 15 degrees, the initial moisture content of the processed grain is 15.50%, and the machine productivity does not exceed 700 kg/h.

Keywords: peeling, whiteness, humidity, drying, hydrothermal treatment, experiment planning, dispersion diagram

For citation: Anisimov A.V., Rudik F.Ya. The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):594-613. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>

Введение

В условиях рыночной экономики главной задачей предприятий по переработке зерна является выпуск больших объемов высококачественной продукции. Большие объемы продукции обеспечивают экономическую эффективность производства, а высокое качество повышает конкурентоспособность продукции на рынке.

Получать большие объемы качественной продукции возможно только при использовании новых технологий и современного эффективного оборудования. Контроль качества переработки зерна (в муку, крупу, комбикорма) включает объективную оценку эффективности как всего технологического процесса, так и отдельных технологических операций.

Современная технология переработки зерна уделяет особое внимание качественной и эффективной подготовке зерна к помолу. На малых предприятиях с сокращенным технологическим процессом это практически единственный способ, позволяющий повысить выход и качество получаемой продукции. Без правильной и многоступенчатой подготовки зерна к помолу на малых предприятиях невозможно достичь качества и количества продукции, выпускаемой промышленными мельницами [1; 2].

Немногочисленные отечественные изготовители оборудования для мельниц малой производительности не придают существенного значения подготовке зерна к переработке, что сказывается на качественном составе оборудования. В составе таких поточно-технологических линий машины для очистки от

примесей, гидротермической обработки и очистки поверхности зерна присутствуют в минимальном количестве, а их уровень не дотягивает до современных промышленных образцов¹. Оборудование зарубежных производителей, за исключением стран бывшего СССР, недоступно по причине высокой стоимости.

Обзор литературы

На промышленных мукомольных заводах Российской Федерации очистка поверхности зерна от загрязнений осуществляется в основном в обочных и щеточных машинах (типа РЗ-БМО или А1-БЦМ). В результате такой обработки существенно увеличивается содержание битого зерна. Так ежегодно в России недоиспользуется потенциал огромного количества продовольственного зерна, что требует разработки новых технологий и технических средств по подготовке зерна к помолу.

Шелушение зерна является одним из самых эффективных способов очистки поверхности от загрязнений и удаления наружных оболочек² [3–6]. Удаление внешних оболочек позволяет на сокращенных схемах помола повысить выход муки высшего сорта. Также в процессе шелушения с поверхности зерна удаляются не только грязь, пыль и волоски, но и часть плодовых и семенных оболочек. Это, с одной стороны, снижает продолжительность процесса увлажнения зерна, но с другой, из-за травмирования и дробления зерна, может привести к снижению качества получаемой муки, чему не уделяется достаточно внимания. На целесообразность удаления анатомических частей зерновки перед помолом ука-

¹ Бузверов С. Ю., Тарасов С. А. К вопросу интенсификации подготовки зерна к помолу различными способами // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник статей: в 3 книгах. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2017. С. 24–27.

² Галимзянов Д. А. Интенсификация подготовки зерна для мельниц малой производительности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 146 с.

звали К. А. Зворыкин, С. К. Нотович и П. А. Козьмин и другие ученые³ [7; 8].

Исследования по шелушению увлажненного и сухого зерна в обочной машине показали, что шелушение предварительно увлажненного зерна несколько эффективнее сухого: мука становится светлее.

Было отмечено, что чрезмерное переувлажнение зерна перед шелушением имеет отрицательные стороны: отходы шелушения получаются влажными, возникает необходимость в их просушивании, к тому же мука имеет высокую влажность, а рабочая поверхность обочной машины быстро зашлифовывается⁴ [9; 10].

Многочисленные исследования в области совершенствования машин для обработки поверхности зерна указывают на то, что в мукомольном производстве наиболее распространенными являются машины с абразивными рабочими органами, работающие по принципу «сжатия и трения» вертикальной или горизонтальной компоновки и имеющие резерв повышения эффективности обработки зерна [11–14].

Исследуя зарубежный мукомольный опыт, можно отметить, что ведущие европейские компании в данной отрасли: Bühler (Швейцария), Prokor (Чехия), Golfetto (Италия) и другие – при разработке современных технологий сортового помолу пшеницы пред-

усматривают процесс предварительного шелушения зерна как наиболее эффективную операцию подготовки зерна к помолу, позволяющую удалить внешнюю оболочку зерна вместе с загрязнениями и повысить качество муки⁵ [14].

Материалы и методы

С учетом вышеизложенного в ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» совместно с ООО МИП «Здоровое питание» (в рамках договора с ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» № 180ГС1/6784 от 25.12.2014, программа «СТАРТ») была разработана экспериментальная шелушильно-сушильная установка для обработки зерна пшеницы (рис. 1)⁶. Шелушение протекает по принципу трения зерна о неподвижный ситовый цилиндр и подвижные абразивные круги [15; 16]. Для машины была разработана автоматизированная система управления (АСУ) на основе приборов фирмы OWEN [17].

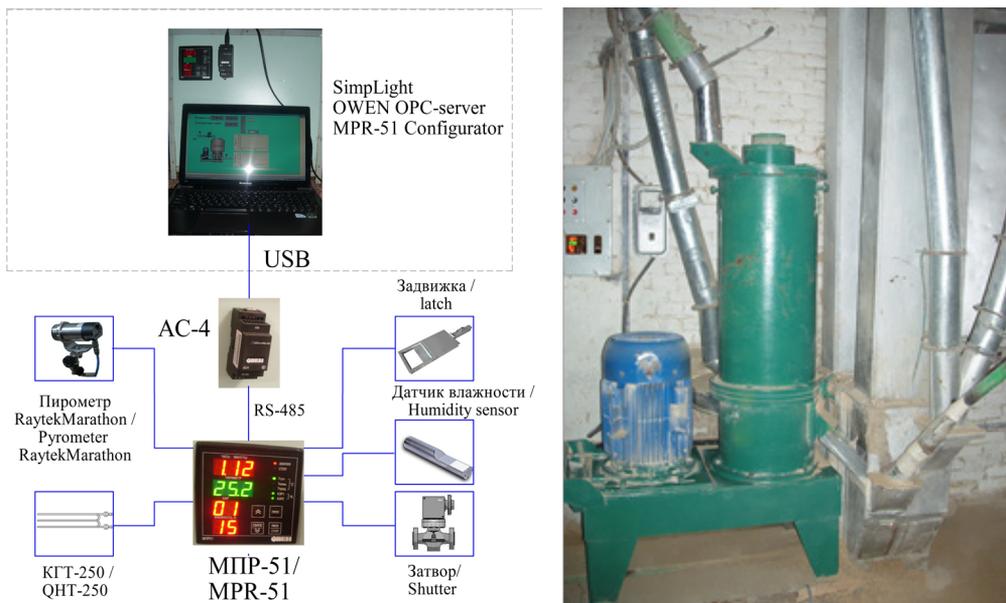
При оптимизации процесса обработки зерна в шелушильно-сушильной машине необходимым условием становится построение его математической модели [18]. Из-за сложности процесса обработки зерна и изменения свойств его составных частей решение задачи по оптимизации теоретическим путем не представляется возможным, так как на практике сложно учесть изменяю-

³ Анисимов А. В. Шелушение зерна пшеницы как метод подготовки к помолу // Наука вчера, сегодня, завтра: Сборник статей студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей. Уфа: ООО «ОМЕГА САЙНС», 2014. С. 41–42; Анисимова Л. В., Выборнов А. А. Влияние гидротермической обработки зерна ячменя на эффективность его шелушения и качество получаемой ячменной муки // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: Сборник статей и докладов пятой всероссийской научно-практической конференции «Исследования и достижения в области теоретической и прикладной химии. Экология. Продукты питания». Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 2011. С. 15–21.

⁴ Хозяев И. А., Рудой Д. В., Бабаджания А. С., Семенченко А. В. Обзор и анализ способов шелушения овса // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Сборник статей 9-й международной научно-практической конференции в рамках 19-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2016». Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2016. С. 137–140.

⁵ Разработка и создание экспериментального образца энергосберегающего оборудования для подготовки зерна к помолу: / А. В. Анисимов [и др.]. Отчет о НИОКР, рег. № НИОКР 115082610022, 14.12.2015. 65 с; Каталог продуктов фирмы BÜHLER [Электронный ресурс]. URL: https://former.buhlergroup.com/europe/ru/10.htm#_WnA2bdSWSM8 (дата обращения: 01.10.2019).

⁶ Там же.



Р и с. 1. Шелушильно-сушильная машина с автоматизированной системой управления
F i g. 1. Peeling-drying machine with automatic control system

щиеся во времени аэродинамические и физико-механические свойства материала (зерна и продуктов шелушения), а теоретические зависимости не учитывают избирательный характер протекания процесса обработки зерна и качество получаемого продукта, что является главенствующим фактором при переработке зерна в муку. Поэтому определение оптимальных условий протекания процесса обработки зерна в шелушильно-сушильной машине, то есть оптимального сочетания факторов, возможно только экспериментальным методом. Одним из эффективных методов является экстремальное планирование эксперимента⁷.

Отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации, осуществлялся методом случайно-

го баланса, который включает в себя построение матрицы планирования, проведение опытов, обработку полученных результатов и принятие решения относительно отбрасывания мало-значимых факторов, а также перехода к следующему этапу исследования⁸.

Согласно построенной матрице проводятся опыты и по их результатам строятся диаграммы рассеяния – графики, по оси X которых отмечаются все факторы с их уровнями (+ и –), а по оси Y – значения параметра оптимизации, полученные в результате опыта. Эффект факторов оценивается на графике методом выделяющихся точек либо по разности медиан⁹.

Эффекты факторов x_{ip} отобранных по вышеописанной методике, оцениваются при помощи таблиц с несколькими входами (количество входов со-

⁷ Радченко Г. Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса. Горки: Белорусская СХА, 1978. 69 с.

⁸ Анисимов А. В. Повышение эффективности процесса загрузки транспортных средств комбинированными кормами путем обоснования конструктивно-режимных параметров загрузочного распределяющего устройства: дис. ... канд. тех. наук. Саратов, 2006. 165 с.

⁹ Там же.

ответствует количеству оцениваемых факторов) и определяются по формуле:

$$x_i = \frac{y_1 + y_3 + \dots + y_n}{k_i} - \frac{y_2 + y_4 + \dots + y_{n+1}}{k_i}, \quad (1)$$

где y_1, y_3, \dots, y_n – вычисленные средние значения параметра оптимизации (верхний уровень фактора); y_2, y_4, \dots, y_{n+1} – вычисленные средние значения параметра оптимизации (нижний уровень фактора); k_i – количество средних значений параметра оптимизации y_n .

Эффекты факторов значимы, если расчетный критерий Стьюдента (t -критерий) (2) больше табличного значения:

$$t_{x_i} = \frac{(y_1 + y_3 + \dots + y_n) - (y_2 + y_4 + \dots + y_{n+1})}{\sqrt{\sum \frac{S_R^2}{n_i}}}, \quad (2)$$

где S_R – среднеквадратическая ошибка, описывающая рассеяние полученных экспериментальных значений относительно средних в строках таблицы с несколькими входами¹⁰:

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n_i - 1} - \frac{(\sum y_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}, \quad (3)$$

где n_i – количество опытов (значений y_i) в i -ой клетке таблицы с несколькими входами.

Теоретическое (табличное) значение критерия Стьюдента (t -критерия) выбирается из таблицы Z ¹¹ (согласно выбранному уровню значимости) в зависимости от числа степеней свободы f , вычисленного по формуле:

$$f = \sum n_i - k, \quad (4)$$

где k – число строчек вспомогательной таблицы.

Если вычисленное значение t -критерия больше табличного, то влияние фактора считается значимым с заданным уровнем достоверности. После определения факторов с наибольшими эффектами необходимо откорректировать результаты отсеивающих экспериментов (прибавляя к ним эффекты отобранных сильных факторов с обратным знаком), а затем вновь составляют график рассеивания. Данная операция позволяет выделить эффекты других факторов, а также их взаимодействий. В числе значимых факторов следует оставить и те из них, значимость которых достоверна не менее чем с 90-процентной вероятностью. Завершением служит принятие решений относительно перехода к следующему этапу исследования¹².

В соответствии с общей постановкой задачи и цели исследования после отсеивания факторов необходимо определить оптимальные условия протекания процесса обработки зерна. Определение оптимальных параметров осуществляется следующим образом: построение и реализация матрицы планирования, проведение анализа полученных данных; выполнение шагов по поверхности отклика, причем повторяются они до тех пор, пока не удастся достичь оптимального значения параметра оптимизации. Метод Бокса – Уилсона, предусматривающий описание поверхности отклика уравнением первой степени, является одним из распространенных при определении оптимальных условий какого-либо процесса:

¹⁰ Там же.

¹¹ Радченко Г. Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса.

¹² Там же.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots, \quad (5)$$

где b_0 – коэффициент при нулевом члене; x_0 – фиктивная переменная; b_1 – коэффициенты факторов.

После построения матрицы и проведения экспериментов рассчитываются коэффициенты регрессии уравнения (5), моделирующего исследуемый процесс¹³:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{\sum_1^N y_u}{N}, \\ b_1 &= \frac{\sum_1^N x_{iu} \cdot y_u}{N}, \\ b_{ij} &= \frac{\sum_1^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u}{N}, \end{aligned} \quad (6)$$

где \bar{y}_u – среднее значение параметра оптимизации в u -ом опыте; N – количество опытов в матрице эксперимента; x_{iu}, x_{ju} – кодированное значение отобранных управляемых факторов в u -ом опыте.

Адекватность полученного уравнения регрессии (математической модели) линейной, оценивается критерием Фишера (F -критерий)¹⁴:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (7)$$

где S_{ad}^2 – дисперсия адекватности (8); S_y^2 – дисперсия ошибки эксперимента (9).

$$\begin{aligned} S_{ad}^2 &= \frac{\sum_1^N (\bar{y}_u - y_u)^2}{N - n - 1}, \\ S_{ad}^2 &= \frac{\sum_1^N y_u^2 - N \sum_0^n b_i^2}{N - n - 1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где \bar{y}_u – значение параметра оптимизации, вычисленное по полученному уравнению регрессии; n – число выбранных управляемых факторов, $n = 0, 1, 2, \dots$

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^k (y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{N(k-1)}, \quad (9)$$

где y_{iu} – значение параметра оптимизации в повторностях (параллельных экспериментах); k – число параллельных экспериментов.

Полученная математическая модель (описываемая уравнением регрессии) признается адекватной линейной в случае, когда расчетный F -критерий меньше табличного ($F_p \leq F_{табл}$), с учетом числа степеней свободы (числитель и знаменатель):

$$\begin{aligned} f_1 &= N - n - 1, \\ f_2 &= N \cdot (k - 1). \end{aligned} \quad (10)$$

Гипотеза адекватности проверяется по другому критерию. В линейной модели свободный член b_0 окazyвается смешанным с суммой коэффициентов при квадратичных членах β_{ii} , то есть $b_0 \rightarrow \beta_0 + \sum \beta_{ii}$, в силу того, что знаки при x_0 в матрице планирования совпадают со знаками при квадратичных членах x_i^2 . Поэтому если модель линейная, то $\sum \beta_{ii} = 0$.

Для этого составляется (а затем реализуется) план экспериментов в центре и по среднему значению параметра оптимизации определяется разность $b_0 - y_0$, которая является характеристикой кривизны поверхности отклика, то есть оценкой $\sum \beta_{ii}$.

Если определенная ошибка эксперимента больше значения $b_0 - \bar{y}_0$ (прове-

¹³ Там же.

¹⁴ Радченко Г. Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса.

ряется по критерию Стьюдента), то гипотеза адекватности принимается¹⁵:

$$t_p = \frac{(b_0 - y_0) \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{S_y^2}}. \quad (11)$$

Если табличное значение t -критерия с числом степеней свободы $f = N \cdot (k - 1)$ больше расчетного ($t_{\text{табл.}} > t_p$), то разность $b_0 - y_0$ недостоверна и нуль-гипотезу можно принять (полученная модель адекватна линейной).

Критерием проверки адекватности полученной модели линейной является также проверка значимости коэффициентов регрессии b_i и b_j .

Определенные коэффициенты регрессии уравнения (5) считаются значимыми, если их значения (по модулю) больше величины доверительных интервалов Δb_p , вычисленных по формуле¹⁶:

$$\pm \Delta = b_i - \beta_i = \pm t \cdot S_{b_i}, \quad (12)$$

где t – табличное значение t -критерия со степенью свободы:

$$f = N \cdot (n_0 - 1), \quad (13)$$

где n_0 – число опытов в центре эксперимента; S_{b_i} – квадратичная ошибка коэффициента, определяемая по формуле:

$$S_{b_i} = \frac{S_y}{\sqrt{N}}. \quad (14)$$

Если модель неадекватна линейной, то область оптимума необходимо описывать уравнением второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_1^n b_i \cdot x_i + \sum_{i \leq j}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_1^n b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (15)$$

где b_{ij} – коэффициенты при парных взаимодействиях факторов.

С учетом коэффициента регрессии выбирается фактор с самым большим влиянием на параметр оптимизации, для которого вычисляется, так называемый, «единичный шаг», в соответствии с которым вычисляются значения шагов остальных факторов:

$$V_i = V_m \cdot \frac{b_i \cdot \varepsilon_i}{b_m \cdot \varepsilon_m}, \quad (16)$$

где V_i – значение шага i -го фактора; V_m – единичный шаг наиболее сильнодействующего фактора; b_i , b_m – соответственно коэффициенты регрессии i -го и наиболее сильнодействующего факторов; ε_i , ε_m – соответственно интервалы варьирования i -го и наиболее сильнодействующего факторов.

Серии экспериментов проводят, прибавляя определенные шаги факторов к их основному уровню, до того момента, когда значение параметра оптимизации перестанет увеличиваться или уменьшаться (при определении максимального или минимального значения, причем при поиске последнего знаки перед значением шагов меняются на обратные). По результатам серии экспериментов строят поверхности отклика, по которым определяют зону оптимума. Правильность статистического анализа проверялась с помощью программы Statistica 10.1.

Белизна муки определялась по ГОСТу 26361-2013 «Мука. Метод определения белизны»¹⁷ с помощью фотоэлектрического прибора СКИБ-Л [19]. Влажность зерна в потоке определялась с помощью разработанной для машины АСУ. Контроль влажности проводился по ГОСТу 13586.5-2015¹⁸ с использованием сушильного шкафа СЭШ-3М. Количес-

¹⁵ Анисимов А. В. Повышение эффективности процесса загрузки транспортных средств.

¹⁶ Там же.

¹⁷ ГОСТ 26361-2013. Мука. Метод определения белизны.

¹⁸ ГОСТ 13586.5-2015. Зерно. Метод определения влажности.

во битых зерен – по ГОСТу 30483-97¹⁹, натура зерна – по ГОСТу 10840-2017²⁰.

Производительность машины изменялась шиберной заслонкой на выходе из машины. Частота вращения вала задавалась сменой шкивов ременной передачи. Изготовлено 3 ситовых барабана с высштамповками под 15, 20 и 25 градусов.

Результаты исследования

Предварительное изучение процесса обработки зерна в шелушильной машине²¹ позволило выделить десять факторов, влияющих на эффективность процесса шелушения. В качестве параметра оптимизации выбрано значение белизны муки, получаемой из обрабатываемого зерна (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Факторы, влияющие на эффективность шелушения зерна (белизну получаемой из него муки), их условные обозначения и намеченные уровни варьирования
The factors influencing effectiveness of grain peeling (the whiteness of the flour), their legends and the planned variation levels

Обозначение фактора / Factor designation	Наименование фактора / Factor name	Размерность / Dimension	Уровни варьирования / Variation levels	
			Нижний (-) / Lower(-)	Верхний (+) / Top (+)
x_1	Частота вращения вала / Shaft speed	об/мин / rpm	1100	1600
x_2	Равномерность подачи материала / Uniformity of material supply	%	неравномерная / irregular	равномерная / regular
x_3	Исходная влажность материала / Initial grain moisture	%	12,5	17,5
x_4	Равномерность материала по влажности / Uniform of material on humidity	–	неравномерная / irregular	равномерная / regular
x_5	Подсушивание («–» при «выключено»; «+» при «включено») / Dehumidification (“–” at it is switched off; “+” at it is included)	–	–	+
x_6	Угол наклона высштамповки на ситовом барабане / Slope angle of a circular helix on a screen drum	градусы / degrees	15	25
x_7	Зернистость абразивных кругов / Graininess of abrasive disks	мкм / mkm	500	1250
x_8	Производительность машины / Efficiency of an inventory	кг/ч / kg/h	500	1000
x_9	Коэффициент трения материала по поверхности ситового барабана / Friction coefficient on the surface of the screen reel	–	уменьшенный / reduced	увеличенный / increased
x_{10}	Размер зерновок (натура) / Size of grain (nature)	г/л / g/l	730	780

¹⁹ ГОСТ 30483-97. Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержания мелких зерен и крупности; содержания зерен пшеницы, поврежденных клопом-черепашкой; содержания металломагнитной примеси.

²⁰ ГОСТ 10840-2017. Зерно. Метод определения натуры.

²¹ Разработка и создание экспериментального образца энергосберегающего оборудования...

Отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации, осуществлялся методом случайного баланса, который включает в себя: составление матрицы планирования, проведение экспериментов (согласно матрице), выделение наиболее значимых факторов (статистическая обработка результатов экспериментов), принятие решения о переходе на следующий этап экстремального планирования.

Согласно выбранному методу «случайного баланса» при составлении матрицы отсеивающих экспериментов факторы, влияющие на процесс обработки зерна в шелушильно-сушильной машине (выделенные в результате проведенных предварительных исследований²²), разделили на 2 полуреплики. Первую из них

объединили со случайным расположением значений второй полуреплики и добавили еще 4 строчки (опыты 17–20) с целью определения влияния отобранных факторов на выбранных уровнях.

Опыты проводились на поточно-технологической линии по производству муки ООО «Старый мельник» г. Энгельс на опытной установке. Значения параметра оптимизации, белизну муки, определяли в лаборатории ООО «Старый мельник». В качестве материала использовалось зерно мягкой пшеницы.

Результаты реализации матрицы экспериментов представлены в таблице 2. Столбец \bar{y} – среднее значение (из 4-х опытов) выбранного параметра оптимизации, белизна получаемой из обработанного зерна муки, а столбцы $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$ – скорректированные значения параметра оптимизации с учетом эф-

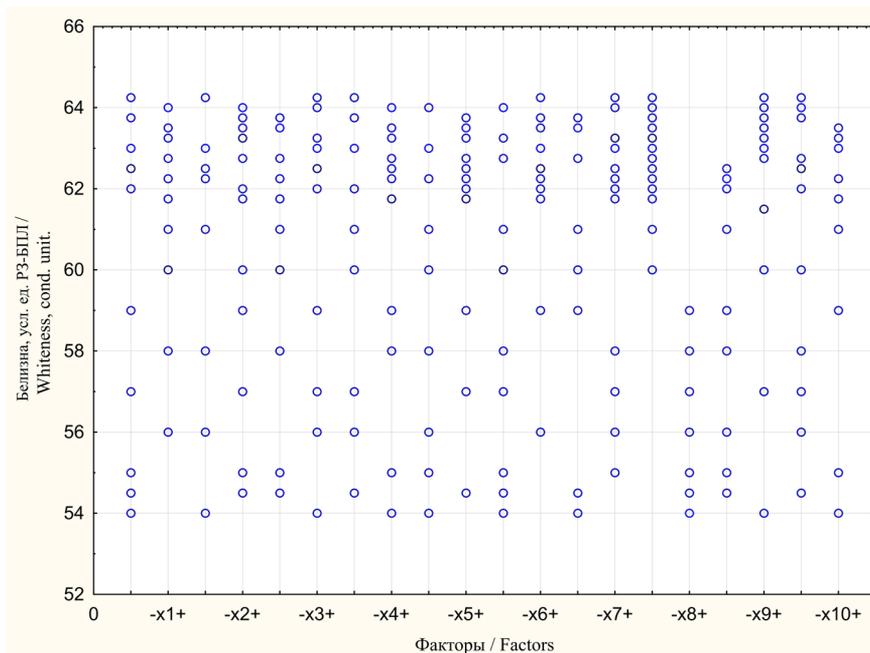
Т а б л и ц а 2

Table 2

Матрица отсеивающих экспериментов**Matrix of the eliminating experiments**

Номер опыта/ Number experience	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	\bar{y}	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3
1	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	63,00	63,00	60,81	60,81
2	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	64,00	64,00	62,06	62,49
3	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+	63,50	63,50	59,45	58,87
4	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	54,00	57,22	57,22	57,22
5	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	62,25	62,25	58,16	58,16
6	-	+	-	+	-	-	+	+	-	+	55,00	58,22	58,18	58,61
7	-	+	+	+	+	+	-	+	-	+	59,00	62,22	60,07	59,49
8	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	61,00	61,00	59,10	59,10
9	+	-	+	-	-	+	+	+	-	-	56,00	59,22	55,13	55,13
10	-	+	+	-	+	-	+	+	+	-	57,00	60,22	60,18	59,60
11	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	63,75	63,75	61,60	61,02
12	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	62,75	62,75	60,85	60,27
13	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	62,00	62,00	59,81	59,23
14	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	58,00	61,22	59,28	59,28
15	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	64,25	64,25	62,06	61,05
16	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	54,50	57,72	57,72	57,14
17	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	63,25	63,25	61,31	60,73
18	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	61,75	61,75	57,66	57,08
19	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	62,50	62,50	60,31	59,30
20	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	60,00	60,00	58,10	58,53

²² Там же.



Р и с. 2. Диаграмма рассеивания управляемых факторов
 F i g. 2. Dispersion diagram of controlled factors

Т а б л и ц а 3
 T a b l e 3

Вспомогательная таблица с двумя входами для определения эффектов факторов x_8 и x_9
 Auxiliary table with two inputs for effect detection factors x_8 and x_9

Оцениваемые факторы / Estimated factors	$+x_9$	$-x_9$
$+x_8$	54 57 $\sum y_1=111$ $y_1=55,5$	55 59 56 58 54,5 $\sum y_2=282,5$ $y_2=56,5$
$-x_8$	63 64 63,5 63,75 62,75 64,25 63,25 61,75 60 $\sum y_3=566,25$ $y_3=62,92$	62,25 61 62 62,5 $\sum y_4=247,75$ $y_4=61,94$
Эффекты факторов, формула (1) / Effects of factors, formula (1):		
$x_9 = \frac{55,5+62,92}{2} - \frac{56,5+61,94}{2} = -0,01$ $x_8 = \frac{55,5+56,5}{2} - \frac{62,92+61,94}{2} = -3,22$		

фактов сильных факторов, в соответствии с которыми (столбец \bar{y}) построили диаграмму рассеивания (рис. 2), анализ которой методом выделяющихся точек позволил выделить два самых сильных фактора: x_8 (производительность машины) и x_9 (коэффициент трения материала по поверхности ситового барабана). Результаты количественной оценки выделенных факторов представлены в таблице 3.

Результаты определения значимости эффектов выбранных управляемых факторов x_8 и x_9 представлены в таблице 4.

Анализ значений t -критериев показывает, что фактор x_8 , производительность машины, значим с 95-процентной вероятностью, в то же время фактор x_9 , коэффициент трения материала по поверхности ситового барабана, незначим даже с вероятностью 90 %.

Откорректированные значения результатов опытов с учетом эффекта значимого фактора x_8 представлены в таблице 2 (столбец \bar{y}_1). График рассеивания, построенный по этим данным (не приводится), позволил выделить три фактора: x_1 , x_6 , x_7 (частота вращения вала, угол наклона выштамповки на ситовом барабане, зернистость абразивных кругов).

Результаты количественной оценки выделенных управляемых факторов представлены в таблице 5.

Результаты расчетов значимости эффектов выбранных управляемых факторов x_8 и x_9 представлены в таблице 6.

Анализ значений t -критериев показывает, что выбранные факторы x_1 , x_6 значимы с 95-процентной вероятностью, а фактор x_7 незначим (значимость ниже 90 %).

Откорректированные значения результатов опытов с учетом эффектов выделенных факторов представлены в таблице 2 (столбец \bar{y}_2).

Эффекты остальных факторов, определили аналогично:

$$x_2 = -0,43; x_3 = 1,11; x_4 = 0,3; x_5 = 1,01; x_{10} = -0,46.$$

Значения t -критерия для этих факторов равны соответственно:

$$t_{x_2} = -0,49; t_{x_3} = 1,94; t_{x_4} = 0,54; t_{x_5} = 1,31; t_{x_{10}} = 0,82.$$

И все они, кроме фактора x_3 (90-процентная вероятность значимости), незначимы.

Степень влияния рассчитанных эффектов управляемых факторов отображена на диаграмме эффектов (рис. 3).

Согласно диаграмме эффектов факторов (рис. 3) самыми «сильными» по степени влияния на параметр оптими-

Таблица 4

Table 4

Вспомогательная таблица для оценки значимости эффектов выбранных управляемых факторов x_8 и x_9

Auxiliary table to assess the significance of the effects of the selected controlled factors x_8 and x_9

№ клетки / No. of cage	$\sum y_i$	$(\sum y_i)^2$	$\sum y_i^2$	n_i	S_R^2	S_R^2 / n_i
1	111,00	12321,00	6165,00	2	4,50	2,250
2	282,50	79806,25	15976,25	5	3,75	0,750
3	566,25	320639,06	35640,31	9	1,72	0,190
4	247,75	61380,06	15346,56	4	0,50	0,125

Значения t -критерия по формуле (2) / Values of t -criterion on a formula (2): $t_{x_8} = -7,1$, $t_{x_9} = 0,15$.
 Табличные значения t -критерия ($f = 16$) / Table values of t -criterion ($f = 16$)²³:
 уровень значимости 5 % / significance value 5%: $t_{0,05} = 2,120$
 уровень значимости 10 % / significance value 10%: $t_{0,10} = 1,746$

²³ Радченко Г. Е. Планирование эксперимента...

Т а б л и ц а 5
T a b l e 5

Вспомогательная таблица с тремя входами для определения эффектов факторов x_1, x_6, x_7
Auxiliary table with three inputs for effect detection factors x_1, x_6, x_7

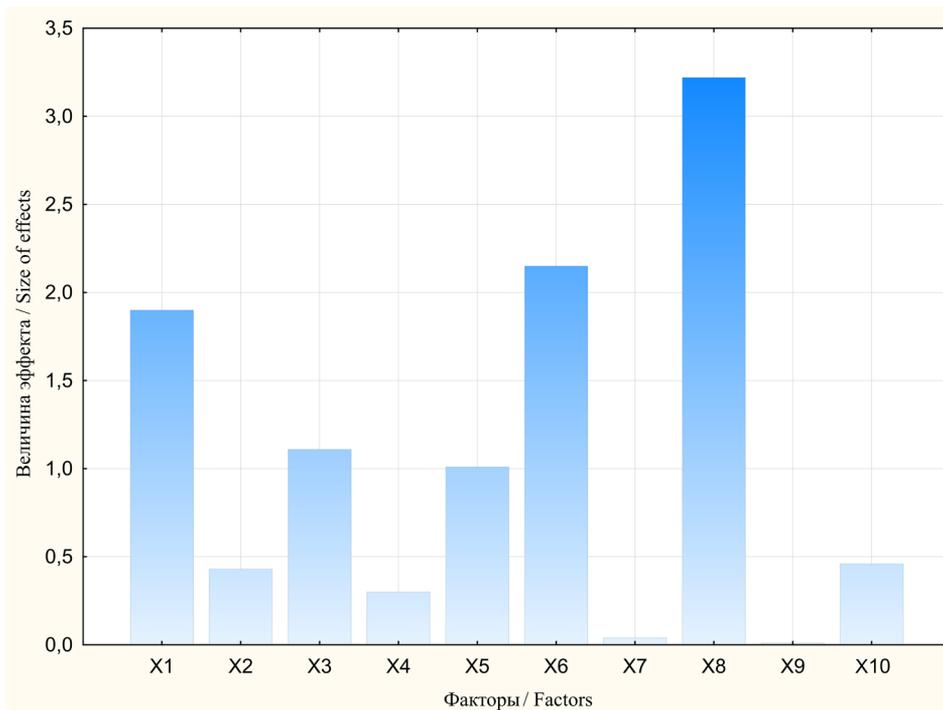
Оцениваемые факторы/ Estimated factors	+ x_1		- x_1	
	+ x_6	- x_6	+ x_6	- x_6
+ x_7	62,25	64,00	63,00	
	59,22	61,22	62,00	58,22
	61,75	63,25	64,25	60,22
	$\sum y_1=183,22$ $y_1=61,07$	$\sum y_2=188,47$ $y_2=62,82$	$\sum y_3=251,75$ $y_3=62,94$	$\sum y_4=118,44$ $y_4=59,22$
- x_7	63,5	61,00	62,22	57,22
	$\sum y_5=63,5$	62,75	63,75	57,72
	$y_5=63,5$	62,00	$\sum y_7=125,97$	$\sum y_8=114,94$
		$\sum y_6=185,75$ $y_6=61,92$	$y_7=62,99$	$y_8=57,47$
Эффекты факторов, формула (1) / Effects of factors, formula (1):				
$x_1 = \frac{61,07 + 62,82 + 63,5 + 61,92}{4} - \frac{62,94 + 59,22 + 62,99 + 57,47}{4} = 1,9$				
$x_6 = \frac{61,07 + 63,5 + 62,94 + 62,99}{4} - \frac{62,82 + 61,92 + 59,22 + 57,47}{4} = 2,15$				
$x_7 = \frac{61,07 + 62,82 + 62,94 + 59,22}{4} - \frac{63,5 + 61,92 + 62,99 + 57,47}{4} = 0,04$				

Т а б л и ц а 6
T a b l e 6

Вспомогательная таблица для оценки значимости эффектов выбранных управляемых факторов x_1, x_6, x_7
Auxiliary table to assess the significance of the effects of the selected controlled factors x_1, x_6, x_7

№	$\sum y_i$	$(\sum y_i)^2$	$\sum y_i^2$	n_i	S_R^2	S_R^2 / n_i
1	183,22	33569,57	11195,12	3	2,63	0,88
2	188,47	35520,94	11844,45	3	2,07	0,69
3	251,75	63378,06	15847,31	4	0,93	0,23
4	118,44	14028,03	7016,02	2	2,00	1,00
5	63,50	4032,25	4032,25	1	0	0
6	185,75	34503,06	11502,56	3	0,77	0,26
7	125,97	15868,44	7935,39	2	1,17	0,59
8	114,94	13211,20	6605,73	2	0,13	0,07
Значения t -критерия по формуле (2) / Values of t -criterion on a formula (2): $t_{x_1} = 4,0$; $t_{x_6} = 4,47$; $t_{x_7} = 0,09$						
Табличные значения t -критерия ($f = 12$) / Table values of t -criterion ($f = 16$) ²⁴ : уровень значимости 5 % / significance value 5%: $t_{0,05} = 2,179$ уровень значимости 10 % / significance value 10%: $t_{0,10} = 1,782$						

²⁴ Там же.



Р и с. 3. Диаграмма эффектов факторов

F i g. 3. Factor effects diagram

зации являются факторы: x_1 – частота вращения вала, x_3 – исходная влажность материала, x_6 – угол наклона высшtamповки на ситовом барабане, x_8 – производительность машины.

Была составлена матрица планирования опытов (полуреплика полного факторного эксперимента 2^4) (табл. 7). После проведения опытов (согласно матрице), определили коэффициенты регрессии. Результаты представлены в таблице 7.

По методу Бокса – Уилсона составлено уравнение регрессии (5), являющееся математической моделью технологического процесса обработки зерна пшеницы в шелушильно-сушильной машине, описывающее зависимость белизны муки (В) (среднее значение из пяти повторностей) y_1 от частоты вращения вала $n(x_1)$, исходной влажности материала $W(x_3)$, угла наклона выс-

штамповки на ситовом барабане $\alpha(x_6)$, и производительности машины $Q(x_8)$:

$$y_1 = 58,45 + 1,2 \cdot x_1 + 0,1 \cdot x_3 - 0,6 \cdot x_6 - 3,5 \cdot x_8. \quad (17)$$

Критерий Фишера для y_1 , вычисленный по формуле (7) (вспомогательные данные представлены в таблице 8), составил $F_{p,y1} = 3,49$. Теоретическое (табличное) значения F -критерия для 1-процентного уровня значимости 0,01, $F_{т,y1} = 4,5^{25}$. Так как $F_{p,y1} < F_{т,y1}$, можно сделать вывод, что гипотеза об адекватности полученной модели принимается, то есть полученная модель адекватна линейному приближению. Данное утверждение достоверно с 99-процентной доверительной вероятностью.

²⁵ Там же.

Матрица экстремального планирования эксперимента (параметр оптимизации – белизна муки из обработанного зерна)

Matrix of extreme scheduling of an experiment (optimization parameter – a whiteness of flour from the processed grain)

Обозначения / Designations	Частота вращения вала, об/мин / Shaft speed, rpm	Исходная влажность материала, % / Initial grain moisture, %	Угол наклона выштамповки на ситовом барабане, градусы / Slope angle of a circular helix on a screen drum, degrees	Производительность машины, кг/ч, / Machine productivity, kg/h	Белизна, усл. ед. РЗ-БПД / Whiteness, cond. unit
	x_1	x_3	x_6	x_8	y_1
Верхний уровень (+) / Top level (+)	1600,00	17,500	25,00	1000,00	
Основной уровень (0) / Ground level (0)	1350,00	15,000	20,00	750,00	
Нижний уровень (-) / Lower layer (-)	1100,00	12,500	15,00	500,00	
Опыты / Experiences					
1	–	+	+	+	54,0
2	+	–	+	+	55,2
3	+	+	–	+	56,4
4	–	–	–	+	54,2
5	+	+	+	–	62,6
6	–	–	+	–	59,6
7	–	+	–	–	61,2
8	+	–	–	–	64,4
Коэффициент регрессии, b_i / Regression coefficient, b_i	1,20	0,100	–0,60	–3,50	
Интервал варьирования факторов / Interval of variation of factors	250,00	2,500	5,00	250,00	
Шаг, соответствующий изменению x_8 на 50 / Step corresponding to change x_8 on 50	17,14	0,015	–0,17	–50,00	
Округленный шаг / Rounded step	50,00	0,500	–5,00	–50,00	
Опыты по программе крутого восхождения / Experiments on the program of steep ascension					
9	1350,00	15,000	20,00	750,00	62,4
10	1400,00	15,500	15,00	700,00	64,2
11	1450,00	16,000	15,00	650,00	64,3
12	1450,00	16,500	15,00	600,00	64,6

Вспомогательная таблица для определения F -критерия
Auxiliary table for determination of F -criterion

Номер опыта / Number of experience	y_1'	y_1''	y_1'''	y_1''''	y_1'''''	y_1	$\sum_1^k (y_i - y_1)^2$	y_1	$(y_1 - \bar{y}_1)^2$
1	54	54	54	54	54	54,0	0	53,25	0,56
2	55	56	55	55	55	55,2	0,8	55,45	0,06
3	56	57	56	56	57	56,4	1,2	56,85	0,20
4	55	54	54	54	54	54,2	0,8	54,25	0,01
5	62	63	63	62	62	62,6	1,6	62,65	0,01
6	60	59	59	60	60	59,6	1,2	60,05	0,20
7	62	61	61	61	61	61,2	0,8	61,45	0,06
8	64	65	64	64	65	64,4	1,2	63,65	0,56

Гипотезу адекватности (характеристику кривизны поверхности отклика) проверяем по равенству 0 коэффициентов при свободных членах $\sum \beta_{ii} = 0$. По формуле (11):

$$t_p = 0,31 < t_T = 2,042. \quad (18)$$

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что разность $b_0 - \bar{y}_0$ недостоверна для полученного уравнения регрессии, следовательно, полученная модель адекватна линейной.

Доверительный интервал для коэффициентов регрессии b_i определили по формуле 12:

$$\pm \Delta = 0,35. \quad (19)$$

С 95-процентной доверительной вероятностью можно утверждать, что все линейные коэффициенты регрессии значимы, что так же подтверждают и данные отсеивающих экспериментов в отношении существенного влияния факторов x_1 , x_3 , x_6 и x_8 на параметр оптимизации.

Результаты статистической оценки проверки адекватности полученной модели линейной позволяют утверждать, что для описания процесса обработки зерна в шелушильно-сушильной машине по параметру оптимизации, величина

получаемой муки, линейная модель может быть принята.

Результаты крутого восхождения по поверхности отклика

Согласно диаграмме эффектов факторов (рис. 2) самым сильнодействующим фактором является производительность машины – x_8 . Единичные шаги для факторов x_1 , x_3 , x_6 рассчитали в соответствии с выбранным шагом фактора x_8 , $V_m = 100$ по формуле (16).

Для $Y_1 - V_1 = 17,14$; $V_3 = 0,015$; $V_6 = -0,17$.

Полученные расчетные шаги округлили до значений, которые на практике реально задавать и фиксировать (представлены в таблице 7).

После реализации опыта 11 уровни факторов x_1 и x_6 при последующем шаговом движении были зафиксированы, так как их изменение оказалось нецелесообразным, исходя из нормальной работы машины, то при одновременном увеличении числа оборотов вала выше 1450 об/мин и уменьшении угла наклона выштамовки ситового барабана наблюдается резкое повышение потребляемой мощности и растет выход битого зерна.

После реализации 12-го опыта было решено прекратить крутое восхождение по поверхности отклика, так как параметр оптимизации увеличивался незначительно, то есть разность значе-

ний параметра оптимизации в опытах 11 и 12 затемнена ошибкой опыта.

Анализируя таблицу 7 (строки 9–12), можно утверждать, что опыт 10 дал лучшие результаты. Восхождение по поверхности отклика показало, что белизна муки из обрабатываемого зерна может быть повышена до 64,2 усл. ед. РЗ-БПЛ. Это достигается при следующем сочетании факторов: частота вращения вала составляет 1400 об/мин, угол наклона высштаповки на ситовом барабане – 15 градусов, влажность зерна – 15,5%, производительность машины – 700 кг/ч.

В результате шагового движения по поверхности отклика: 1) достигнута область оптимума (почти стационарная область); 2) определено оптимальное сочетание факторов, соответствующих максимальной белизне муки, полученной из обработанного зерна.

По данным, полученным в результате реализации матрицы эксперимента, построены трехмерные поверхности отклика (рис. 4).

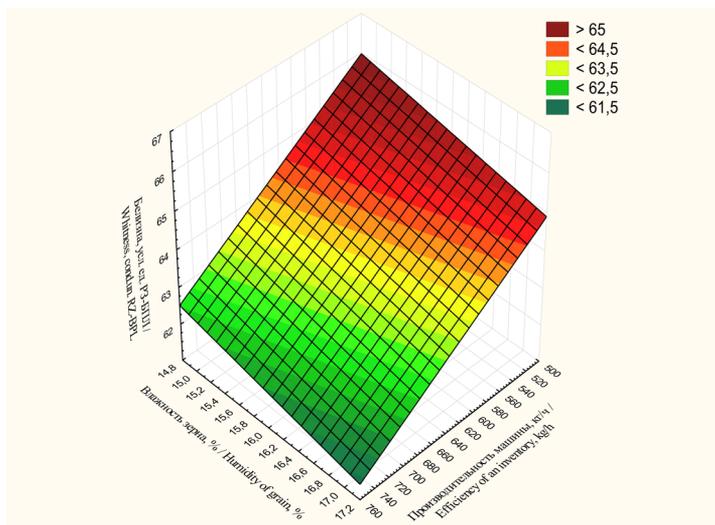
Обсуждение и заключение

В процессе экспериментальных исследований условий протекания процес-

са обработки зерна в шелушильно-сушильной машине, то есть оптимального сочетания факторов, было осуществлено экстремальное планирование эксперимента.

Методом случайного баланса был проведен отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации (белизна муки из обработанного зерна): x_1 – частота вращения вала, x_3 – исходная влажность материала, x_6 – угол наклона высштаповки на ситовом барабане, x_8 – производительность машины.

Для отыскания области оптимума реализованы: матрица экстремального планирования, статистический анализ полученных результатов и крутое восхождение по поверхности отклика. Полученные данные позволили определить оптимальные конструктивные и режимные параметры разработанной шелушильно-сушильной машины: частота вращения вала – 1400 об/мин, угол наклона высштаповки на ситовом барабане – 15 градусов, производительность машины не выше 700 кг/ч при исходной влажности обрабатываемого зерна – 15,5%.



Р и с. 4. Трехмерное сечение поверхности отклика, характеризующей величину белизны муки из обработанного зерна

Fig. 4. Three-dimensional section of the response surface characterizing the whiteness of processed grain flour

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Анисимов А. В.** Моделирование основных конструктивно-технологических параметров шелушильно-сушильной машины // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2014. № 4. С. 40–43. URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014_4 (дата обращения: 01.10.2019).
2. **Гафин М. М.** Подготовка зерна к помолу с использованием традиционного оборудования // Научный вестник технологического института – филиала ФГБОУ ВПО Ульяновская ГСХА им. П. А. Столыпина. 2014. № 13. С. 51–55.
3. **Кондрокров Р. Х., Панкратов Г. Н.** Роль шелушения зерна в технологии переработки твердой пшеницы // Хлебопродукты. 2013. № 3. С. 44–45. URL: <https://khlebprod.ru/74-texts/%D0%B6%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8B-13-%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/03-13/657-2013-04-01-08-45-51> (дата обращения: 01.10.2019).
4. **Журба О. С., Карамзин А. В., Крикунова Л. Н., Рябова С. М.** Влияние шелушения зерна на параметры процесса его измельчения // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 8. С. 18–23. URL: <http://www.foodprom.ru/journals/khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya/131-khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya-8-2012> (дата обращения: 01.10.2019).
5. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues / M. R. Martelli [et al.] // Journal of Cereal Science. 2010. Vol. 52, Issue 1. Pp. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>
6. Electrostatic Separation of Peeling and Gluten from Finely Ground Wheat Grains / M. Remadnia [et al.] // Particulate Science and Technology. 2014. Vol. 32, Issue 6. Pp. 608–615. DOI: <https://doi.org/10.1080/02726351.2014.943379>
7. **Алимкулов Ж. С., Егоров Г. А., Максимчук Б. М., Щербакова Г. С.** Опыт подготовки зерна пшеницы к помолу с предварительным отделением оболочек // Экспресс-информация. 1979. Т. 1, Вып. 7. С. 22.
8. **Верещинский А.** Подготовка зерна шелушением на мельницах сортовых помолов пшеницы большой производительности // Хлебопродукты. 2010. № 1. С. 32–33.
9. **Анисимов А. В.** Пути повышения эффективности процесса переработки зерна на малых предприятиях // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2012. № 8. С. 38–42. URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/146/2012_8 (дата обращения: 01.10.2019).
10. **Беляев В. В., Овчаров Д. Е., Анисимова Л. В., Солтан О. И. А.** Влияние способов увлажнения зерна овса при гидротермической обработке на эффективность его шелушения // Горизонты образования. 2017. № 19. С. 1–4.
11. **Перов А. А.** Способы шелушения зерна // Комбикорма. 2010. № 3. С. 45–46.
12. **Верещинский А. П.** Эффективность шелушильно-шлифовальных машин «Каскад» при подготовке зерна пшеницы в сортовых помоллах // Хлебопродукты. 2012. № 11. С. 40–41.
13. Шелушильно-шлифовальная машина: пат. 2159679 Рос. Федерация. МПК В02В3/02; заявл. 11.06.1999; опубл. 27.11.2000. Бюл. № 33. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2159679> (дата обращения: 01.10.2019).
14. **Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., Загородских Б. П.** Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 603–623. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>
15. Шелушильно-сушильная машина: пат. 2491124 Рос. Федерация. № 2012104970/13; заявл. 13.02.2012; опубл. 27.08.2013. Бюл. № 24. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2491124C1_20130827.pdf (дата обращения: 01.10.2019).
16. **Анисимов А. В.** Экспериментальное моделирование процессов подсушивания зерна в СВЧ-поле при подготовке к помолу // Молочнохозяйственный вестник. 2017. № 2 (26). С. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2017-00009>

17. Анисимов А. В. Усовершенствованная система для автоматического управления температурой и влажностью зерна при подготовке к помолу // Аграрный научный журнал. 2015. № 6. С. 53–56. URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015_6 (дата обращения: 01.10.2019).

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. Штейнберг Т. С., Леонова Т. А., Шведова О. Г. Определение белизны муки. Новый стандарт // Контроль качества продукции. 2016. № 11. С. 22–25. URL: <http://vniiz.org/science/publication/article-208> (дата обращения: 01.10.2019).

Поступила 06.11.2018; принята к публикации 18.09.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Анисимов Александр Владимирович, доцент кафедры технологий производства и переработки продукции животноводства ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: E-7817-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, anisimovaleksan@mail.ru

Рудик Феликс Яковлевич, профессор кафедры технологий продуктов питания ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-pappsgau@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Анисимов – подготовка начального текста с последующей доработкой, проведение исследований, анализ исследований, визуализация, верстка; Ф. Я. Рудик – научное руководство, анализ и доработка текста.

REFERENCES

1. Anisimov A.V. Modeling of the Main Constructive and Technological Parameters for Peeling and Drying Machine. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = The Bulletin of Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. 2014; (4):40-43. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014_4 (accessed 01.10.2019). (In Russ.)

2. Gafin M.M. Preparation of Grain for Grinding Using Traditional Equipment. *Nauchnyy vestnik tekhnologicheskogo instituta – filiala FGBOU VPO Ulyanovskaya GSHA im. P.A. Stolyipina* = Scientific Bulletin of Technological Institute – Branch of Stolypin Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2014; 13:51-55. (In Russ.)

3. Kondrokov R.Kh., Pankratov G.N. The Role of Grain Peeling in Durum Wheat Processing. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2013; (3):44-45. Available at: <https://khlebprod.ru/74-texts/%D0%B6%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8B-13-%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/03-13/657-2013-04-01-08-45-51> (accessed 01.10.2019). (In Russ.)

4. Zhurba O.S., Karamzin A.V., Krikunova L.N., Ryabova S.M. Influence of a Peeling of Grain on Parameters of Process of Its Crushing. *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2012; (8):18-23. Available at: <http://www.foodprom.ru/journals/khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya/131-khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya-8-2012> (accessed 01.10.2019). (In Russ.)

5. Martelli M.R., Barron C., Mabilie F., et al. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues. *Journal of Cereal Science*. 2010; 52(1):83-89. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>

6. Remadnia M., Kachi M., Messal S., et al. Electrostatic Separation of Peeling and Gluten from Finely Ground Wheat Grains. *Particulate Science and Technology*. 2014; 32(6):608-615. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/02726351.2014.943379>

7. Alimkulov Zh.S., Egorov G.A., Maksimchuk B.M., Shcherbakova G.S. Experience of Preparation of Seed of Wheat for a Grinding with Preliminary Office of Envelopes. *Ekspress-informatsiya* = Express Information. 1979; 1(7):22. (In Russ.)
8. Vereshchinsky A. Grain Preparation by Peeling on Mills High-Quality Grindings of Wheat of Big Efficiency. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2010; (1):32-33. (In Russ.)
9. Anisimov A.V. Ways of Improving the Efficiency of Grain Processing at Small-Scale Enterprises. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = The Bulletin of Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. 2012; (8):38-42. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/146/2012_8 (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
10. Belyaev V.V., Ovcharov D.E., Anisimova L.V., Soltan O.I.A. Influence of Methods of Oat Grain Moistening at Hydrothermal Treatment on Its Peeling Efficiency. *Gorizonty obrazovaniya* = Horizons of Education. 2017; 19:1-4. (In Russ.)
11. Perov A.A. Ways of Peeling Grain. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2010; (3):45-46. (In Russ.)
12. Vereshchinsky A.P. Effectiveness Peeling-Rubbing Machines "Cascade" by Wheat Seed Preparation in High-Quality Grindings. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2012; (11):40-41. (In Russ.)
13. Peeling-Rubbing Machine: Patent 2159679 of Russian Federation. No. IPC B02B3/02; appl. 11.06.1999; publ. 27.11.2000. Bulletin No. 33. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2159679> (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
14. Anisimov A.V., Rudik F.Ya., Zagorodskih B.P. Technological Improvements of Grain Preparation for Milling in Small Enterprises. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):603-623. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>
15. Peeling-Drying Machine: Patent 2491124 of Russian Federation. No. 2012104970/13; appl. 13.02.2012; publ. 27.08.2013. Bulletin No. 24. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2491124C1_20130827.pdf (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
16. Anisimov A.V. Experimental Modeling of Grain Drying Processes in the Microwave Field in Preparation for Grinding. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik* = Dairy Farming Journal. 2017; (2):80-91. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2017-00009>
17. Anisimov A.V. An Improved System for Automatic Control of Grain Temperature and Moisture Content in Preparation for Grinding. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2015; (6):53-56. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015_6 (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
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. Steinberg T.S., Leonova T.A., Shvedova O.G. Determination of Whiteness of Flour. New Standard. *Kontrol kachestva produktsii* = Quality Control of Production. 2016; (11):22-25. Available at: <http://vniiz.org/science/publication/article-208> (accessed 01.10.2019). (In Russ.)

Received 06.11.2018; revised 18.09.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Alexander V. Anisimov, Associate Professor of Chair of Technology of Production and Processing of Livestock Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: E-7817-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, anisimova-leksan@mail.ru

Felix Ya. Rudik, Professor of Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-pappsgau@rambler.ru

Contribution of the authors:

A.V. Anisimov – writing the draft, reviewing, carried out the research, analyzed the research results, editing, visualizing the results; F. Ya. Rudik – scientific supervision, analysis, revision of the draft.

All authors have read and approved the final manuscript.



Анализ параметров работы устройства для гидравлического удаления сорной растительности

А. Ю. Измайлов, Д. О. Хорт, И. Г. Смирнов,
Р. А. Филиппов, А. И. Кутырёв

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Москва, Россия)

vim_sad@mail.ru

Введение. Обоснование параметров и внедрение новых экологически безопасных технологий и технических средств для борьбы с сорной растительностью в приствольной зоне является актуальной проблемой, имеющей важное научно-производственное значение. Целью исследования является обоснование эффективных режимов работы прицепной машины для гидравлического удаления сорной растительности на промышленной плантации садовых культур.

Материалы и методы. По результатам анализа существующих технологий и технических средств для удаления сорной растительности в приствольных полосах садовых насаждений в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» разработано устройство для гидравлического удаления сорной растительности без использования гербицидов. Для выявления наиболее эффективных режимов работы машины на промышленной плантации яблоневого сада проведен факторный эксперимент. Статистическая обработка полученных результатов эксперимента проведена с помощью математического моделирования методом планирования экспериментов.

Результаты исследования. Статистический анализ данных факторного эксперимента показал, что для выполнения технологической операции гидравлического удаления сорной растительности наиболее эффективными являются следующие режимы работы устройства: расстояние между почвой и распыляющей головкой – 14,5 см; давление подачи рабочей жидкости – 759 бар; скорость машины – 2,4 км/ч. Статический режим обработки для оценки глубины проникновения струй с экспозициями 10, 5 и 3 с. показал глубину проникновения соответственно 62, 34 и 12 мм. Диаметры следа составили: в первом случае 350 мм внешний и 330 мм внутренний (ширина реза 24 мм); во втором и третьем – 340 мм для внешнего и 328 мм для внутреннего (ширина реза 16 мм).

Обсуждение и заключение. В результате проведенного эксперимента установлено, что машина способна обеспечить качественную обработку приствольной зоны при использовании воды центрального водоснабжения. После прохода агрегата при изначально 90-процентном покрытии поверхности сорной растительностью остается только 20–30 % видимой зеленой массы, остальное перемешано с почвой. При двукратном проходе агрегата корневая система сорной растительности осталась неповрежденной на 10–13 % площади. Устройство удовлетворяет требованиям технологической операции удаления сорной растительности в приствольной зоне без использования гербицидов при достаточно высоких технологических показателях.

Ключевые слова: садоводство, сорная растительность, приствольная зона, гидравлическое удаление, экологически безопасная технология, гербициды

© Измайлов А. Ю., Хорт Д. О., Смирнов И. Г., Филиппов Р. А., Кутырёв А. И., 2019



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

Для цитирования: Анализ параметров работы устройства для гидравлического удаления сорной растительности / А. Ю. Измайлов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 614–634. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.614-634>

Analysis of Work Parameters of the Device for Hydraulic Removal of Weed Vegetation

A. Yu. Izmaylov, D. O. Khort, I. G. Smirnov, R. A. Filippov,
A. I. Kuttyrev

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)
vim_sad@mail.ru

Introduction. The justification of parameters and introduction of new environmentally friendly technologies and technical means for weed control in the stalk zone is a pressing issue of major economic importance. The aim of the study is to justify the effective modes of operation trailer machine for the hydraulic removal weeds on the industrial plantation of horticultural crops.

Materials and Methods. According to the analysis of existing technologies and technical means for weed vegetation removal from the stalk zone of garden plantings, a device for hydraulic removal of weed vegetation without the use of herbicides has been developed at Federal Scientific Agroengineering Center VIM. To identify the most effective modes of operation of the machine on an industrial plantation of an apple orchard, a factorial experiment was conducted. Statistical processing of the obtained experimental results was carried out using mathematical modeling.

Results. The statistical analysis of the factor experiment data showed that the following operating modes of the device are the most effective for performing the technological operation of hydraulic removal weeds: the distance between the soil and the spray head is 14.5 cm, the working fluid supply pressure is 759 bar, the movement speed is 2.4 km/h. The static treatment mode for estimating the penetration depth of the jets with exposures of 10, 5, and 3 sec showed a penetration depth of 62, 34 and 12 mm, respectively. The diameters of the track were: In the first case 350 mm external and 330 mm internal (cutting width 24 mm); in the second and third cases – 340 mm for the outer and 328 mm for the inner (cutting width 16 mm).

Discussion and Conclusion. As a result of the experiment, it was established that the machine is able to provide high-quality processing stalk zone when using water from the central water supply. After the unit cultivated the soil, 90% which was covered with weeds, only 20–30% of the visible green mass remains, the rest is mixed with the soil. After double cultivation, the root system of weed vegetation remained in 10–13% of the area. The device meets the requirements of the technological operation weed vegetation removal in the stalk zone without the use of herbicides with sufficiently high technological parameters.

Keywords: horticulture, weeds, tree trunks, hydraulic removal, stalk zone, environmentally friendly technology, herbicides

For citation: Izmaylov A. Yu., Khort D.O., Smirnov I.G., et al. Analysis of Work Parameters of the Device for Hydraulic Removal of Weed Vegetation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):614-634. DOI: <http://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.614-634>

Введение

Эффективная борьба с сорной растительностью в современных агротехнологиях основывается на биологических особенностях выращиваемых растений.

В связи с этим учеными ведутся исследования по разработке новых приемов борьбы с сорняками, успешность которых напрямую зависит от конструкций и принципов работы специализиро-

ванных машин. Также при использовании различных приемов учитывается степень засоренности приствольных зон, почвенно-климатические условия и требования к факторам роста и развития возделываемых культур [1; 2].

Известны различные методы борьбы с сорной растительностью в приствольной зоне садовых насаждений, каждый из них имеет как преимущества, так и недостатки (рис. 1):

Существующие способы направлены на повышение эффективности и экономичности выполняемого процесса. Самым распространенным и эффективным является способ химического удаления сорняков. Однако в последнее время широкое применение гербицидов приводит к значительному загрязнению окружающей среды, изменению видового состава сорной растительности и снижению реакции многих видов



Р и с. 1. Методы удаления сорной растительности в приствольной зоне
 F i g. 1. Methods for weed vegetation removal in the stalk zone

сорняков на химические способы борьбы [3]. Относительно новым техническим решением для борьбы с сорными растениями является использование физических принципов воздействия, таких как огневая обработка, обработка электрическими токами и другое [4].

Современные производители сельскохозяйственных машин и оборудования большое внимание уделяют разработке машин для борьбы с сорными растениями без применения отравляющих веществ, что связано с переходом к экологически чистому (органическому) земледелию. Результатом развития этих принципов являются прицепные устройства, использующие энергию трактора и размещаемое на них газовое или гидравлическое оборудование для проведения обработки почвы в рядках виноградников, ягодников и в приствольных зонах плодовых деревьев с помощью воды центрального водоснабжения [5; 6].

Повышение эффективности работы устройства для гидравлического удаления сорной растительности в приствольной зоне возможно за счет использования оптимальных режимов работы. Обоснование параметров и внедрение новых экологически безопасных технологий и технических средств для борьбы с сорной растительностью в приствольной зоне является актуальной проблемой, имеющей важное научно-производственное значение.

Цель исследования – обосновать эффективные режимы работы прицепной машины для гидравлического удаления сорной растительности на промышленной плантации садовых культур.

Обзор литературы

Во многих зарубежных странах и в России используются различные технологии и технические средства для уничтожения сорной растительности в междурядьях и приствольной зоне садовых насаждений (рис. 2).

Анализ литературных источников показал, что уничтожение сорной ра-

стительности с помощью огня, пара и пены более эффективно и менее опасно для окружающей среды, чем традиционные способы контроля сорняков, предусматривающие механическую обработку почвы, однако многие культуры достаточно устойчивы к кратковременному нагреву. Термическая обработка позволяет контролировать сорную растительность, при этом влияние на физические, химические, микробиологические характеристики почвы практически не оказывается. Термическая прополка обходится дороже, чем альтернативные механические способы контроля сорняков [7].

Наиболее энергоемким и рискованным к травмированию культурных растений является механический способ. Это обуславливается тем, что увеличенное тяговое сопротивление используемых тракторных агрегатов приводит к перерасходу топлива, а многократное выполнение технологических операций обработки почвы в междурядьях и приствольных зонах садовых насаждений к избыточному уплотнению почвы и снижению урожайности.

Повсеместное применение химических методов борьбы с сорной растительностью приводит к увеличению концентрации вредных веществ в почве, грунтовых водах и сельскохозяйственной продукции, способствует развитию высокой резистентности сорной растительности к гербицидам. При обработке в ветреную погоду осуществляется перенос капель раствора гербицида ветровыми потоками. Под воздействием бокового ветра неконтролируемый поток некоторой части капель раствора гербицидов оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду [3].

Использование электрофизических способов борьбы с сорной растительностью, несмотря на экологическую чистоту, не находит широкого применения в сельскохозяйственном производстве, так как требует контактного воздействия с сорной растительностью. Дан-



Р и с. 2. Устройства для удаления сорной растительности в приствольной зоне:
 а) ECO GP 500-800L INOX, Италия; б) ENTREPRISE TECHNIQUE RIQUIER VITIFLAM, Франция; в) Officine Mingozi, Италия; д) Jalent Industrie, Франция;
 е) Herbicide Spray Boom TELMA, Польша; ф) TecnoVict SCHIUMONE, Италия;
 г) Micron Group, Undavina 900, Великобритания; h) УВГ-600, ВИМ, Москва;
 и) Rinieri, FS 130, Италия; j) Calderoni FPS, Италия; к) КИУ-2,5, ВИМ, Москва;
 л) ES Cucchi, Италия

F i g. 2. Devices for removal of weeds in stalk zone: а) ECO GP 500-800L INOX, Italy;
 б) Entreprise Technique Seasonal Vitiflam, France; в) Officine Mingozi, Italy; д) Jalent Industrie, France;
 е) Herbicide Spray Boom, TELMA, Poland; ф) TecnoVict SCHIUMONE, Italy;
 г) Micron Group, Undavina 900, UK; h) UVG-600, VIM, Moscow; и) Rinieri, FS 130, Italy;
 j) Calderoni FPS, Italy, к) KIU-2,5, VIM, Moscow; л) ES Cucchi, Italy

ные способы не оказывают воздействия на проростки сорняков, находящиеся в поверхностном слое почвы [8; 9].

В результате проведенного анализа существующих технических средств и методов борьбы с сорной растительностью установлено, что наиболее эффективным и экологически безопасным методом удаления сорной растительности в приствольных зонах садовых насаждений является использование водопроводной воды (гидравлический метод). Химическое загрязнение почвы, грунтовых вод и воздуха при использовании данного метода исключено.

Материалы и методы

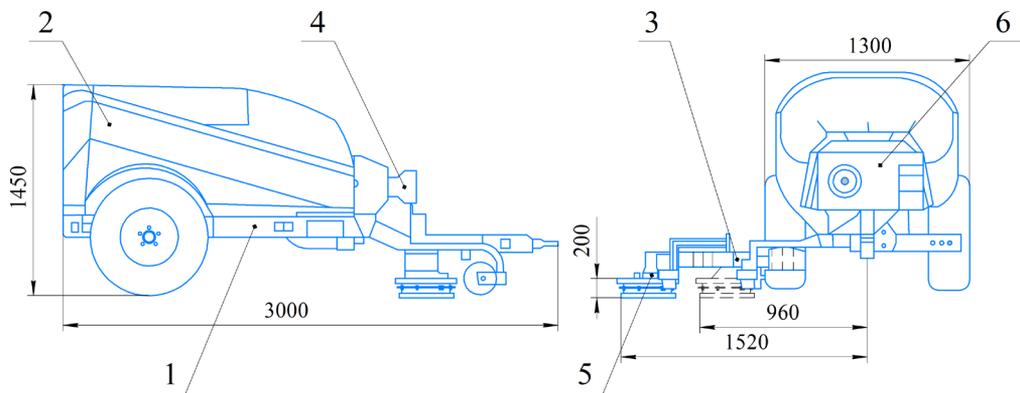
По результатам анализа существующих технологий и технических средств для удаления сорной растительности в приствольных полосах садовых насаждений в ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» разработано устройство для гидравлического удаления сорной растительности без использования гербицидов.

Устройство представляет собой конструкцию прицепного типа. На раме смонтированы основные составные части и сборочные единицы, крепление которых производится посредством болтовых и сварных соединений (рис. 3).

Технические характеристики устройства представлены в таблице 1.

Привод устройства осуществляется от вала отбора мощности (ВОМ) и гидросистемы трактора, что обеспечивает передачу крутящего момента на насос сверхвысокого давления и привод головки распылителя. Головка распылителя состоит из ротационного блока с гидрораспределителем рабочей жидкости и масляного гидромотора. Для распыления рабочей жидкости используются четыре форсунки, вертикально установленные в корпусе головки распылителя (рис. 4).

При выполнении технологической операции удаления сорной растительности ротационный блок головки распылителя приводится в движение (вращение) двигателем от гидравлической системы трактора. Насос машины создает поток жидкости под высоким давлением в направлении сопла форсунок, которые, распыляя рабочую жидкость, оказывают механическое воздействие на сорную растительность и почву. Давление насоса регулируется скоростью вращения ВОМ, которое поддерживается на постоянной скорости от 500 до 600 об/мин. В случае избыточного давления в системе подачи форсунок кла-



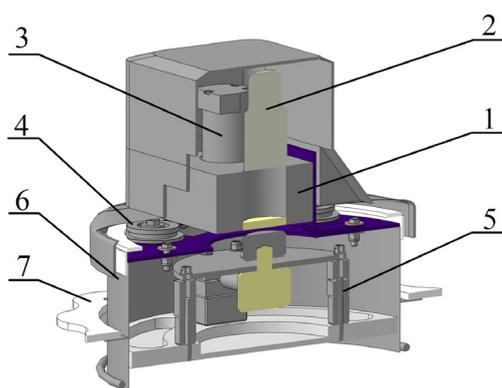
Р и с. 3. Устройство для гидравлического удаления сорной растительности: 1 – рама; 2 – бак для рабочей жидкости; 3 – направляющая выносной секции; 4 – привод вала отбора мощности (ВОМ); 5 – головка распылителя; 6 – защитный кожух гидронасоса с распределителем

F i g. 3. Device for the hydraulic removal of weeds: 1 – frame; 2 – tank for the working fluid; 3 – guide rail extension section; 4 – wheel drive PTO (PTO); 5 – head of the atomizer; 6 – the protective casing of the pump with dispenser

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Технические характеристики устройства для удаления сорной растительности
Technical characteristics of the device for weed removal

Параметр / Parameter	Значение / Value
Тип машины и агрегатирование / Machine type and aggregation	
Тип / Type	Прицепная / Trailer
Требование к ВОМ, мин ⁻¹ / Requirement for the PTO min ⁻¹	540
Дополнительное подключение / Additional connection	– гидросистема трактора / hydraulic system of the tractor; – электросистема трактора / tractor electrical system.
Гидравлика / Hydraulics	
Емкость бака, л / Tank capacity, l	2000
Система фильтрации / Filtration system	– фильтр грубой очистки / coarse filter; – фильтр тонкой очистки / fine filter.
Тип насоса / Pump type	Поршневой / Piston
Штатное рабочее давление, МПа / Standard operating pressure, MPa	100
Частота вращения вала насоса, мин ⁻¹ / Pump shaft speed, min ⁻¹	500–600
Расход насоса, л / Pump flow, l	13 (при 500 мин ⁻¹) / 13 (at 500 min ⁻¹)
Предохранительный клапан, МПа / Safety valve, MPa	125
Другие клапаны / Other valve	Перепускной с электрогидравлическим управлением и возможностью сброса давления в системе до нуля / Electro-hydraulic bypass with pressure relief to zero in the system
Управление / Controlling	
Тип / Type	Дистанционное – проводное / Remote-wired
Орган управления / Control	Выносная панель / Remote panel
Возможности управления / Control capability	– положение рабочей головки / position of the working head; – наклон рабочей головки / tilt of the working head; – подача питания / energizing; – включение/выключение подачи воды / water supply on/off; – управление вращением сопел / control of rotation of nozzles; – экстренное отключение / emergency shutdown.
Безопасность / Security	
Эксплуатационная / Operational	Бесконтактный переключатель с контролем угла наклона головки / Non-contact switch with head angle control
Защита растений / Plant protection	Механизм обхода растения рабочей головкой / Mechanism of plant bypass by the working head



Р и с. 4. Устройство головки распылителя: 1 – блок ротационного распределителя;
2 – гидрораспределитель рабочей жидкости; 3 – масляный гидромотор; 4 – ролик вращения;
5 – форсунки; 6 – защитный кожух; 7 – копир приствольной зоны

Fig. 4. Device atomizer heads: 1 – unit rotating dispenser; 2 – hydraulic fluid regulator; 3 – oil hydraulic motor; 4 – rotating roller; 5 – nozzle; 6 – cover; 7 – copier of stalk zone

пан сброса давления откалиброван на давление 1250 бар. В качестве рабочей жидкости используется чистая водопроводная вода. Подача рабочей жидкости осуществляется из бака с предварительной очисткой фильтром грубой очистки.

Регулировка вертикального и горизонтального положения головки распылителя осуществляется с помощью гидроцилиндров двойного действия, закрепленных на направляющей выносной секции устройства. С помощью пружины, закрепленной на направляющей, осуществляется обработка приствольной зоны путем огибания (вращения) головки распылителя вокруг ствола дерева и ее обратного возврата в рабочее положение после преодоления препятствия.

Рабочая головка имеет следующие ограничения в перемещении: высота от уровня опорной поверхности – не более 600 мм, вылет за поперечные габариты – не более 700 мм от исходного положения, угол поворота относительно опорной поверхности – до 65°, угол поворота относительно продольной оси – до 20° (рис. 5).

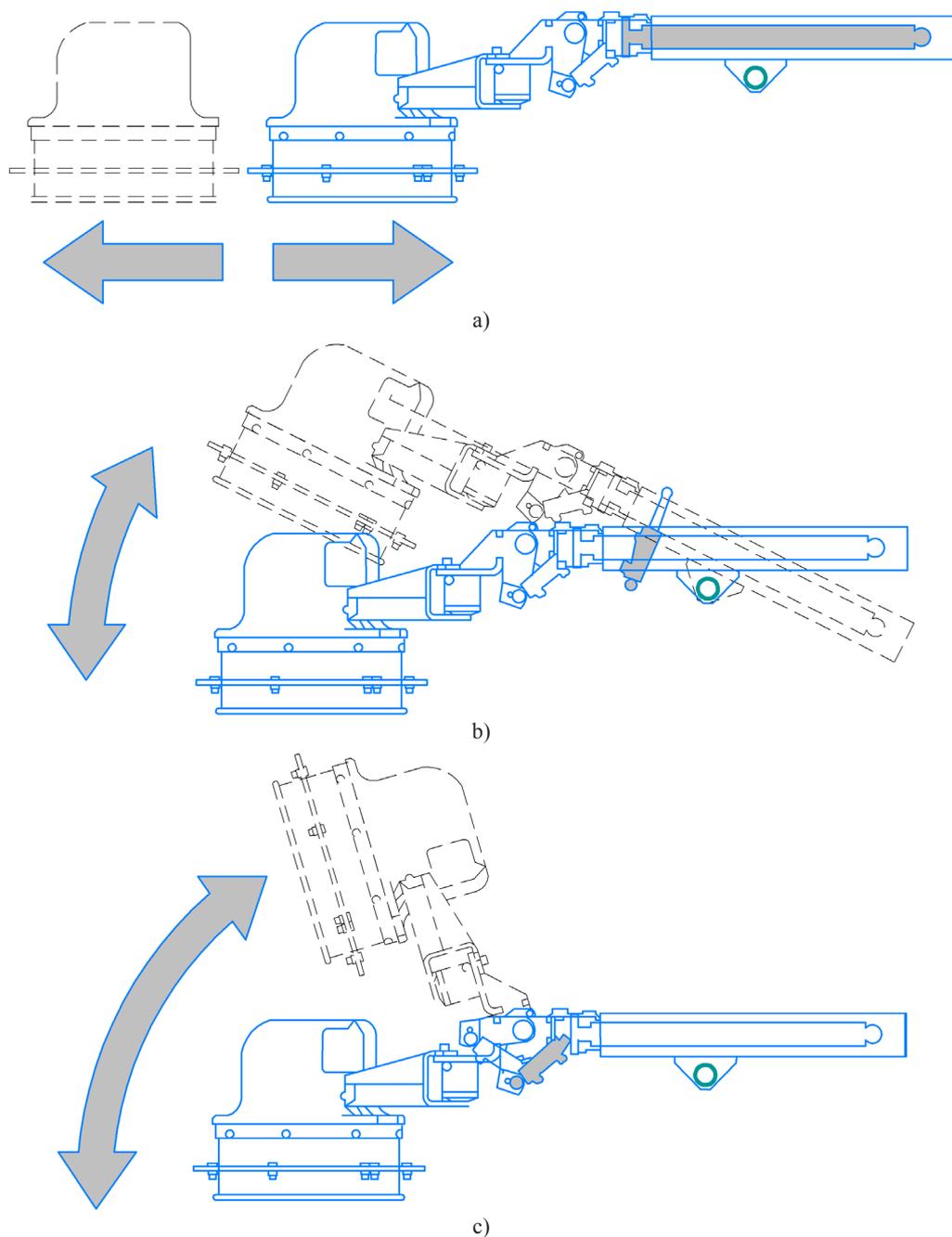
Прицепная машина оснащена электрической системой управления 12 В.

Электромагнитные клапаны, используемые в гидравлической системе управления движениями, имеют двухпозиционный тип (рис. 6).

Управление скоростью вращения головки осуществляется с помощью панели управления, которая располагается в зоне управления на тракторе. Возможно как ручное, так и автоматическое управление подачей рабочей жидкости.

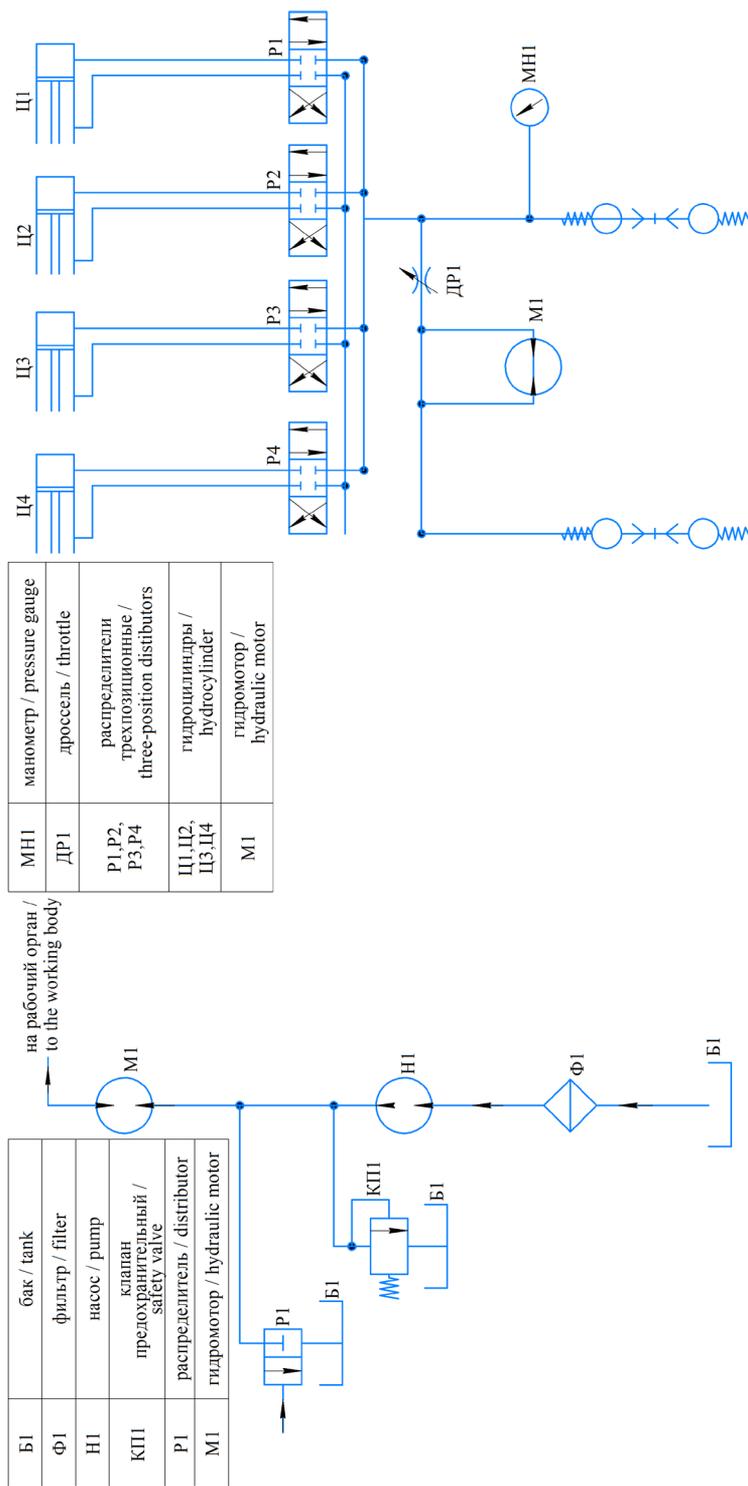
Расход воды, частота вращения ВОМ трактора и давление насоса контролируются поплавковым индикатором и информационным дисплеем пульта управления. Скорость движения контролируется по показаниям GPS спидометра, установленного в кабине трактора.

Для выявления наиболее эффективных режимов работы машины для гидравлического уничтожения сорной растительности на промышленной плантации яблоневое сада возрастом 5 лет в научно-производственном отделе испытаний ФГБНУ «Всероссийский селекционно-технологический институт садоводства и питомниководства» (Московская обл., Ленинский район, поселок Булатниково) проведен факторный эксперимент (рис. 7).



Р и с. 5. Степени свободы рабочей головки распылителя: а) поперечное перемещение; б) угловое перемещение; в) наклон относительно продольной оси машины

Fig. 5. Degree of freedom of sprayer working head: a) lateral displacement; b) angular displacement; c) slope relative to the longitudinal axis of the machine



Р и с. 6. Гидравлические схемы привода подачи рабочей жидкостью и привода рабочих органов:

a) гидравлическая схема привода подачи рабочей жидкостью; б) гидравлическая схема привода рабочих органов
 F i g. 6. Hydraulic diagrams of working fluid and working device tools: a) hydraulic scheme of the supply drive of working fluid;
 b) hydraulic diagram of the drive of the working tools



Р и с. 7. Выполнение устройством технологической операции гидравлического удаления сорной растительности

F i g. 7. The device performs a technological operation of hydraulic removal of weeds

Параметры насаждений представлены в таблице 2.

В качестве изменяемых факторов выбраны давление подачи рабочей жидкости, расстояние до поверхности

почвы и скорость движения агрегата. Интервал варьирования факторов установлен исходя из предварительных полевых испытаний машины. Эксперимент проведен в двукратной повторно-

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

**Параметры насаждений промышленной плантации
Parameters of industrial plantation plantations**

Наименование показателей / Name of indicators	Значение показателей / Value of indicator
Культура, сорт / Culture, variety	Яблоня, «Мелба» / Apple, “Melba”
Состав агрегата / Assembly composition	МТЗ-82.1 + Устройство для ГУСП / MTZ-82.1 + Device for GWSR
Возраст насаждений, лет / Age of plantings, years	5,0
Расстояния между деревьями, м / The distance between trees, m	2,0
Отклонение штамба от осевой линии ряда, см / Deviation of the stem from the axial line of the series, cm	5,3
Высота сорной растительности, см / The height of the weeds, cm	12,0
Тип почвы / Soil type	Дерново-подзолистые почвы / Sod-podzolic soils
Название по механическому составу / Name by mechanical composition	Суглинистая / Loamy
Предшествующая обработка – глубина обработки, см / Prior to processing – depth of treatment, cm	Культивация (ранняя весна), 6 / Cultivation (early spring), 6
Угол наклона рельефа, градусы / The angle of elevation, degrees	Ровный склон, до 0,3 / Smooth slope, up to 0.3

сти, задействовано 16 рядков садовых насаждений по 100 м. Факторный план эксперимента с параметрами работы машинно-тракторного агрегата представлен в таблице 3.

В качестве выходного фактора принят коэффициент эффективности удаления сорной растительности κ_3 ,

найденный как процентное отношение площади участков почвы с сохранившимися растениями к общей площади обработанного участка (рис. 8):

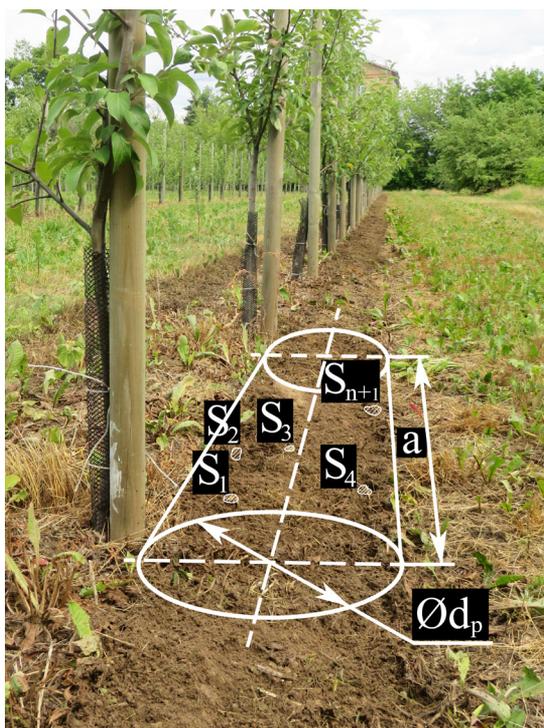
$$\kappa_3 = \frac{\sum_{i=1}^n S_n}{S_{yc}}, \quad (1)$$

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Условия планирования факторного эксперимента
Conditions for planning a factor experiment

	Нижний уровень (-1) / Lower level (-1)	Основной уровень (0) / Basic level (0)	Верхний уровень (+1) / Top level (+1)	Интервал варьирования / Variable interval	Наименование фактора / Name of factor
x1:	600	800	1000	200	Давление, бар / Pressure, bar
x2:	10	20	30	10	Расстояние, см / Distance, cm
x3:	2	4	6	2	Скорость движения, км/ч / Speed, km/h



Р и с. 8. Схема определения эффективности удаления сорной растительности

F i g. 8. Scheme for determining the effectiveness of weed removal

где $\sum_{i=1}^n S_n$ – суммарная площадь отдельных участков обработанной поверхности с сохранившимися растениями и их корневой системой; $S_{yc} = ad_p$ – общая площадь обработанного участка.

Учет площади участков почвы с сохранившимися растениями проведен трехкратно инструментальным способом. Проходя по линии обработанного участка, на отмеченных местах накладывалась прямоугольная рамка площадью 0,25 м² (со сторонами 0,5 x 0,5 м). Результаты подсчета всех повторностей проведенных замеров по рамке последовательно заносились в колонку ведомости первичного учета. После окончания обследования участка по ведомости вычислена средняя площадь участков почвы с сохранившимися растениями.

Статистическая обработка полученных результатов эксперимента про-

ведена с помощью математического моделирования методом планирования полевых экспериментов, с использованием программы PlanExp v.1.0 [10]. План факторного эксперимента с кодированным значением входных и выходных факторов приведен в таблице 4.

При обработке данных и расчете натуральных значений факторов использовались стандартные методы: линейная интерполяция, проверка адекватности моделей по критерию Стьюдента – Фишера и дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах.

Согласно нормативным документам крошение почвы до прохода машины и не ранее чем через 1 час после проведения технологической операции удаления сорной растительности определено по пробам, отбираемым в четырех точках участка. Размер учетной площадки для отбора пробы – 0,25 м²

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

**Планирование трехфакторного эксперимента
Planning a three-factor experiment**

Номер опыта / Experience number	Матрица планирования / Planning matrix			Значения переменных / Variable values		
	x1	x2	x3	Давление, бар / Pressure, bar	Расстояние, см / Distance, cm	Скорость движения, км/ч / Speed of movement, km/h
1	-1	-1	-1	600	10,0	2,00
2	+1	-1	-1	1000	10,0	2,00
3	-1	+1	-1	600	30,0	2,00
4	-1	-1	+1	600	10,0	6,00
5	-1	0,19	0,19	600	21,9	4,38
6	0,19	-1	0,19	838	10,0	4,38
7	0,19	0,19	-1	838	21,9	2,00
8	-0,29	+1	+1	742	30,0	6,00
9	+1	-0,29	+1	1000	17,1	6,00
10	+1,	+1	-0,29	1000	30,0	3,42

на глубину обработки¹. Отобранные пробы разделены при помощи комплекта решет в порядке уменьшения отверстий. Влажность почвы определена с помощью электронного измерителя РН300, твердость почвы определена с помощью Твердомера ИП-232.

Результаты исследования

Перед экспериментом проведена оценка величины давления воды, создаваемой водяным насосом машины, в зависимости от частоты вращения ВОМ трактора. Полученный график представлен на рисунке 9.

Установлен диапазон требуемых оборотов двигателя для соблюдения режимов работы для проведения эксперимента.

Внешний вид обработанных приствольных зон до и после однократного прохода агрегата представлен на рисунке 10.

Основные показатели полученных в результате статистической обработки данных представлены в таблице 5.

Таблица 5

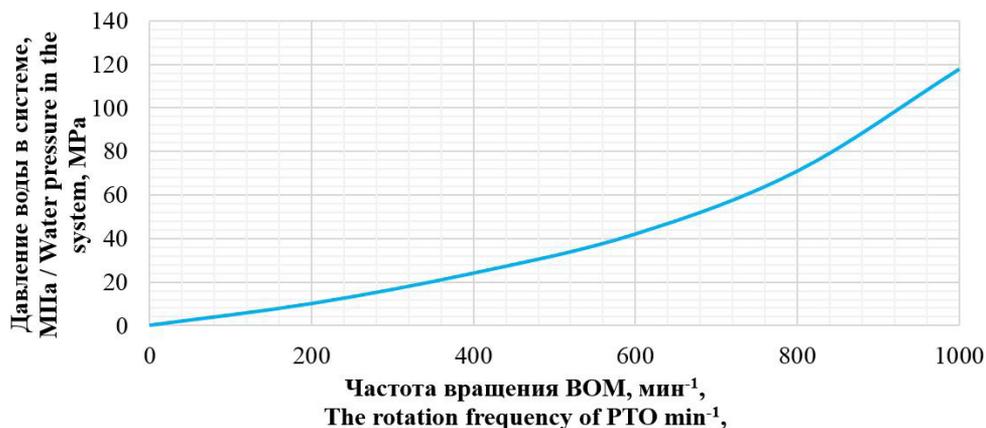
Table 5

Результаты статистической обработки полученных данных

The results of statistical processing of data

Показатель / Indicator	Значение / Value
Степень свободы / Degree of freedom	10,00
Значение критерия Стьюдента / Value of Student's criterion	2,23
Степень свободы при значимых коэффициентах / Degree of freedom with significant coefficients	1,00
Табличное значение критерия Фишера / Table value of Fisher's criterion	4,96
Расчетное значение критерия Фишера / Estimated value of the Fisher's criterion	2,19

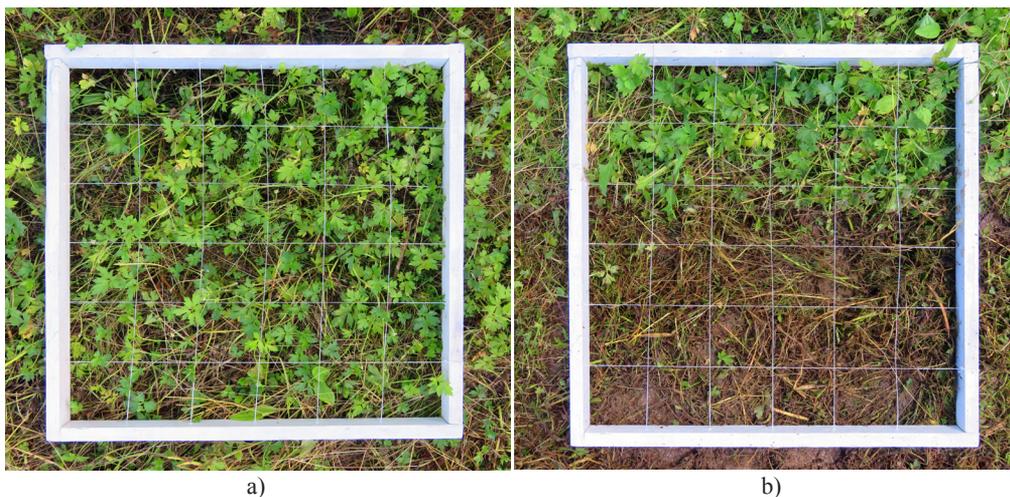
По результатам анализа полученных данных рассчитаны коэффициенты математической модели. Найдена функция отклика, уравнение математической модели:



Р и с. 9. Зависимость давления воды в системе машины от оборотов ВОМ

F i g. 9. Dependence of water pressure in the machine system on PTO speed

¹ СТО АИСТ 4.1-2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и орудия для глубокой обработки почвы. Методы оценки функциональных показателей. М., 2011. 36 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005416677> (дата обращения: 20.11.2019); СТО АИСТ 4.4-2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и орудия для обработки почвы в садах, виноградниках, хмельниках и ягодниках. Методы оценки функциональных показателей. М., 2011. 39 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/555623673> (дата обращения: 20.11.2019); СТО АИСТ 4.3-2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и орудия для обработки пропашных культур. Методы оценки функциональных показателей. М., 2011. 38 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/555623672> (дата обращения: 20.11.2019).



Р и с. 10. Внешний вид приствольных зон:
а) до прохода агрегата; б) после однократного прохода агрегата

F i g. 10. Appearance of stalk zone:
a) before the unit pass; b) after a single pass of the unit

$$y = (0,025) + (0,003) \cdot x_1 + (0,018) \cdot x_2 + (0,019) \cdot x_3 + (0,013) \cdot x_1^2 + (0,022) \cdot x_2^2 + (0,013) \cdot x_3^2 + (-0,013) \cdot x_1 \cdot x_2 + (0,003) \cdot x_1 \cdot x_3 + (-0,008) \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2)$$

По критерию Фишера математическая модель признана адекватной ($F = 2,19 < F_{табл.} = 4,96$).

В результате преобразования получены три варианта математической модели: $y = f(x_2, x_3)$ при $x_1 = \text{const}$, $y = f(x_1, x_3)$ при $x_2 = \text{const}$ и $y = f(x_1, x_2)$ при $x_3 = \text{const}$. Уравнения математической модели с учетом постоянного фактора:

при $x_1 = \text{const}$:

$$y = (0,025) + (0) + (0,018) \cdot x_2 + (0,019) \cdot x_3 + (0) + (0,022) \cdot x_2^2 + (0,013) \cdot x_3^2 + (0) \cdot x_2 + (0) \cdot x_3 + (-0,008) \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (3)$$

при $x_2 = \text{const}$:

$$y = (0,025) + (0,003) \cdot x_1 + (0) + (0,019) \cdot x_3 + (0,013) \cdot x_1^2 + (0) + (0,013) \cdot x_3^2 + (0) \cdot x_1 + (0,003) \cdot x_1 \cdot x_3 + (0) \cdot x_3; \quad (4)$$

при $x_3 = \text{const}$:

$$y = (0,025) + (0,003) \cdot x_1 + (0,018) \cdot x_2 + (0) + (0,013) \cdot x_1^2 + (0,022) \cdot x_2^2 + (0) + (-0,013) \cdot x_1 \cdot x_2 + (0) \cdot x_1 + (0) \cdot x_2. \quad (5)$$

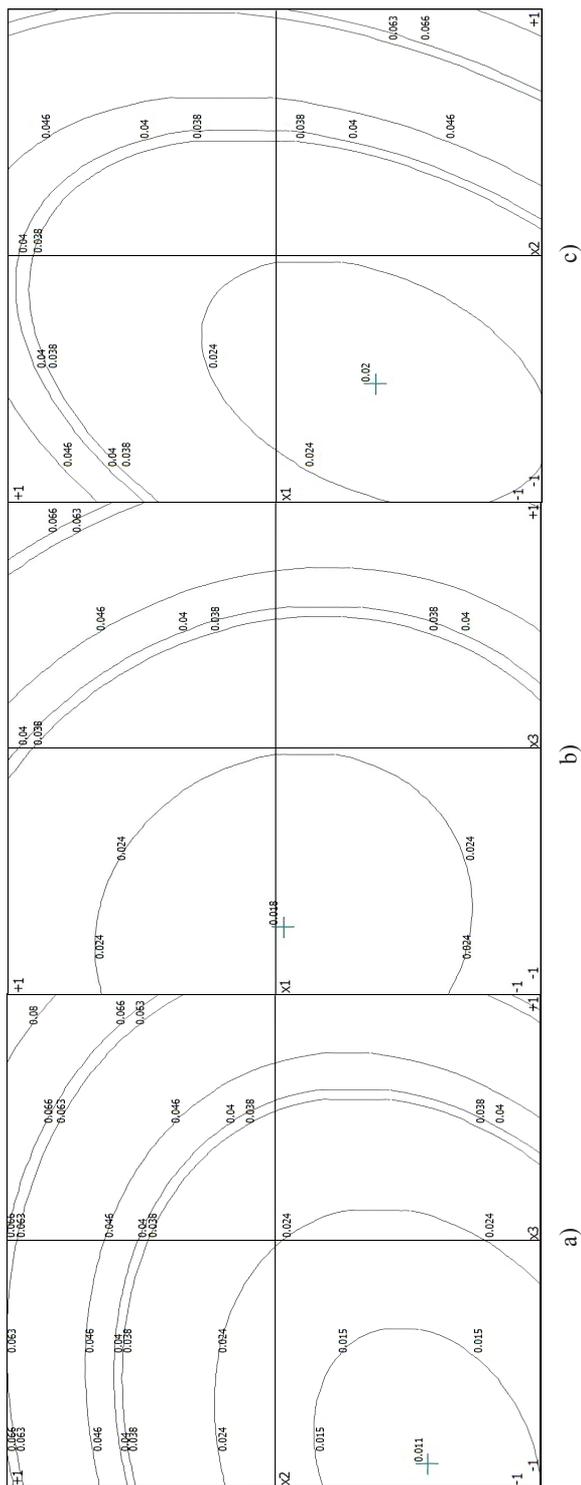
В результате проведенных исследований установлено что экстремум функции отклика находится в пределах варьирования факторов. Построена графическая интерпретация функции трех переменных и диаграмма проекции трехмерных поверхностей отклика на плоскости (рис. 11).

В таблице 6 приведены значения экстремума функции отклика и соответствующие ему значения факторов в кодированном и натуральном виде

Проведена оценка рыхления почвы приствольной зоны и глубины проникновения струй.

Статический режим обработки для оценки глубины проникновения струй с экспозициями 10, 5 и 3 с. показал глубину проникновения соответственно 62, 34 и 12 мм. Диаметры следа составили: в первом случае 350 мм внешний

Процессы и машины агроинженерных систем



Р и с. 11. График сечения поверхности функции отклика по оптимуму:
 а) $y = f(x_2, x_3)$ при $x_1 = \text{const}$; б) $y = f(x_1, x_3)$ при $x_2 = \text{const}$; с) $y = f(x_1, x_2)$ при $x_3 = \text{const}$
 F i g. 11. The graph of the surface section of the optimum response function:
 а) $y = f(x_2, x_3)$ at $x_1 = \text{const}$; б) $y = f(x_1, x_3)$ at $x_2 = \text{const}$; с) $y = f(x_1, x_2)$ at $x_3 = \text{const}$

Т а б л и ц а 6
T a b l e 6

Значения экстремума функции отклика и соответствующие ему значения факторов
Values of the extrema response function and the corresponding values of factors

Экстремум функции отклика / Extreme response function	Давление в кодированном (натуральном виде), бар / Pressure coded (natural), bar	Расстояние в кодированном (натуральном виде), см / Distance coded (natural form), cm	Скорость движения в кодированном (натуральном виде), км/ч / Movement speed in coded (natural form), km/h
$Y_{\text{опт.}} = 0,011;$	$x1 = 0; (800);$	$x2 = -0,574; (14,26);$	$x3 = -0,907; (2,186);$
$Y_{\text{опт.}} = 0,491;$	$x1 = -0,031 (793,8);$	$x2 = 0; (20);$	$x3 = -0,727 (2,546);$
$Y_{\text{опт.}} = 0,32;$	$x1 = - 0,375; (725);$	$x2 = -0,52; (14,8);$	$x3 = 0; (4);$

и 330 мм внутренний (ширина реза 24 мм); во втором и третьем – 340 мм для внешнего и 328 мм для внутреннего (ширина реза 16 мм).

Обсуждение и заключение

В результате проведенного эксперимента установлено, что машина способна обеспечить качественную обработку приствольной зоны при использовании воды центрального водоснабжения (рис. 12). Расход воды на погонный метр составил 0,9 литра.

Статистический анализ данных факторного эксперимента показал, что для выполнения технологической операции

гидравлического удаления сорной растительности наиболее эффективными являются следующие режимы работы устройства:

- расстояние между почвой и распыляющей головкой – 14,5 см;
- давление подачи рабочей жидкости – 759 бар;
- скорость движения – 2,4 км/ч.

В результате проведенных исследований выявлено, что качественное рыхление почвы на глубину 10 мм обеспечивается при скорости движения агрегата 2,5 км/ч. Оценка твердости, влажности и крошения почвы в при-



Р и с. 12. Внешний вид приствольных зон

F i g. 12. Appearance of stalk zone

ствольной зоне до и после проведения технологической операции гидравлического удаления сорной растительности представлена в таблице 7.

В результате двукратного выполнения технологической операции гидравлического удаления сорной растительности в приствольной зоне процентное содержание сорной растительности не превышает 12,1 %. После прохода агрегата при изначально 90-процентном покрытии поверхности сорной растительностью остается только 20–30 % видимой зеленой массы, остальное перемешано с почвой. При двукратном проходе агрегата неповрежденной корневая система

сорной растительности осталась на 10–13 % площади. Расчетная производительность агрегата составила 3,12 га/см. Твердость почвы в слоях от 5 до 20 см уменьшилась до 71,4 %. Содержание эрозионноопасных частиц не превышает 7,6 %.

Таким образом, приведенный выше анализ результатов работы устройства для гидравлического удаления сорной растительности свидетельствует, что устройство удовлетворяет требованиям технологической операции удаления сорной растительности в приствольной зоне без использования гербицидов при достаточно высоких технологических показателях.

Т а б л и ц а 7

Table 7

Характеристики экспериментального участка до и после проведения технологической операции

Characteristics of the experimental site before and after the technological operation

Наименование показателей / Name of indicators	Значение показателей до проведения технологической операции удаления сорной растительности / Value of the indicators before the technological operation of removal of weeds	Значение показателей после проведения технологической операции удаления сорной растительности / Value of the indicators after the technological operation of removal of weeds
Влажность почвы на различной глубине, % / Soil moisture at different depths, %		
– от 0 до 5 см / 0 to 5 cm:	8,1	37,5
– свыше 5 до 10 см / over 5 to 10 cm:	13,4	28,4
– от 10 до 20 см / from 10 to 20 cm:	16,2	21,3
Твердость почвы, МПа, в слоях / Soil hardness, MPa, in layers		
– от 0 до 5 см / from 0 to 5 cm:	0,7	0,2
– свыше 5 до 10 см / over 5 to 10 cm:	1,5	0,6
– от 10 до 20 см / from 10 to 20 cm:	2,2	1,2
Крошение почвы, по фракциям, % / The crumbling of the soil fractions, %		
– более 50 мм / more than 50 mm:	41,2	16,4
– 25–30 мм / 25–30 mm:	18,9	21,2
– 10–25 мм / 10–25 mm:	13,6	20,9
– 4–11 мм / 4–11 mm:	11,5	17,3
– 1,5–4 мм / – 1.5–4 mm:	7,7	16,6
Содержание эрозионно опасных частиц, % / Erosive particle content, %:	7,1	7,6
Удаление сорной растительности в приствольной зоне, % / Removal of weeds in stalk zone, %	–	87,9

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Abouzienna H. F., Hagaag W. M.** Weed Control in Clean Agriculture: A Review // *Planta Daninha*. 2016. Vol. 34. Issue 2. Pp. 377–392. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582016340200019>
2. **Hatcher P. E., Melander B.** Combining Physical, Cultural and Biological Methods: Prospects for Integrated Non-Chemical Weed Management Strategies // *Weed Research*. 2003. Vol. 43, Issue 5. Pp. 303–322. DOI: <http://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00352.x>
3. **Schütte G.** Herbicide Resistance: Promises and Prospects of Biodiversity for European Agriculture // *Agriculture and Human Values*. 2003. Vol. 20, Issue 3. Pp. 217–230. DOI: <http://doi.org/10.1023/A:1026108900945>
4. **Bond W., Grundy A. C.** Non-Chemical Weed Management in Organic Farming Systems // *Weed Research*. 2001. Vol. 41, Issue 5. Pp. 383–405. DOI: <http://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00246.x>
5. **Latsch R., Anken T., Herzog C., Sauter J.** Controlling Rumex Obtusifolius by Means of Hot Water // *Weed Research*. 2017. Vol. 57, Issue 1. Pp. 16–24. DOI: <http://doi.org/10.1111/wre.12233>
6. **Baerveldt S., Ascard J.** Effect of Soil Cover on Weeds // *Biological Agriculture and Horticulture*. 1999. Vol. 17, Issue 2. Pp. 101–111. DOI: <https://doi.org/10.1080/01448765.1999.9754830>
7. **Blackshaw R. E., Anderson R. L., Lemerle D.** Cultural Weed Management // In: *Non-Chemical Weed Management: Principles, Concepts And Technology*. 1 ed. Wallingford, England: CABI, 2007. Pp. 35–47. URL: <https://researchoutput.csu.edu.au/en/publications/cultural-weed-management> (дата обращения: 20.11.2019).
8. Effectiveness of Hot Water, Infrared and Open Flame Thermal Units for Controlling Weeds / T. Astatkie [et al.] // *Biological Agriculture and Horticulture*. 2007. Vol. 25, Issue 1. Pp. 1–12. DOI: <http://doi.org/10.1080/01448765.2007.10823205>
9. **Popay I., Field R.** Grazing Animals as Weed Control Agents // *Weed Technology*. 1996. Vol. 10, Issue 1. Pp. 217–231. DOI: <http://doi.org/10.1017/S0890037X00045942>
10. **Доспехов В. А.** Методика полевого опыта. 3-е изд. М.: Колос, 1985. 336 с. URL: https://mf.bmstu.ru/info/faculty/lt/caf/lt1/soil_books/uchebnik9.pdf (дата обращения: 20.11.2019).

Поступила 20.02.2019; принята к публикации 11.04.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Измайлов Андрей Юрьевич, заведующий кафедрой общенаучных и специальных дисциплин, директор ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), академик РАН, доктор технических наук, ResearcherID: H-4602-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>, vim@vim.ru

Хорт Дмитрий Олегович, заведующий отделом технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), кандидат сельскохозяйственных наук, ResearcherID: Q-2695-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, vim_sad@mail.ru

Смирнов Игорь Геннадьевич, ученый секретарь ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), кандидат сельскохозяйственных наук, ResearcherID: K-5623-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9992-1261>, vim_sad@mail.ru

Филиппов Ростислав Александрович, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), кандидат сельскохозяйственных наук, ResearcherID: Q-2722-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3586-3634>, vim_sad@mail.ru

Кутырёв Алексей Игоревич, научный сотрудник отдела технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: I-3699-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-775X>, alexeykutyrrev@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

А. Ю. Измайлов – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи; Д. О. Хорт – сбор и анализ литературных данных, участие в исследованиях, критический анализ, редактирование; И. Г. Смирнов – определение методологии исследования, постановка задачи; Р. А. Филиппов – литературный и патентный анализ, участие в теоретическом исследовании, верстка и редактирование текста; А. И. Кутырёв – участие в исследованиях, подготовка начального текста с последующей доработкой, компьютерное моделирование.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Abouziena H.F., Hagaag W.M. Weed Control in Clean Agriculture: A Review. *Planta Daninha*. 2016; 34(2):377-392. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582016340200019>
2. Hatcher P.E., Melander B. Combining Physical, Cultural and Biological Methods: Prospects for Integrated Non-Chemical Weed Management Strategies. *Weed Research*. 2003; 43(5):303-322. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00352.x>
3. Schütte G. Herbicide Resistance: Promises and Prospects of Biodiversity for European Agriculture. *Agriculture and Human Values*. 2003; 20(3):217-230. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1023/A:1026108900945>
4. Bond W., Grundy A.C. Non-Chemical Weed Management in Organic Farming Systems. *Weed Research*. 2001; 41(5):383-405. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00246.x>
5. Latsch R., Anken T., Herzog C., Sauter J. Controlling Rumex Obtusifolius by Means of Hot Water. *Weed Research*. 2017; 57(1):16-24. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1111/wre.12233>
6. Baerveldt S., Ascard J. Effect of Soil Cover on Weeds. *Biological Agriculture and Horticulture*. 1999; 17(2):101-111. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/01448765.1999.9754830>
7. Blackshaw R.E., Anderson R.L., Lemerle D. Cultural Weed Management. In: *Non-Chemical Weed Management: Principles, Concepts And Technology*. 1 ed. Wallingford, England, CABI; 2007. p. 35-47. Available at: <https://researchoutput.csu.edu.au/en/publications/cultural-weed-management> (accessed 20.11.2019). (In Eng.)
8. Astatkie T., Rifai M.N., Havard J., et al. Effectiveness of Hot Water, Infrared and Open Flame Thermal Units for Controlling Weeds. *Biological Agriculture and Horticulture*. 2007; 25(1):1-12. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1080/01448765.2007.10823205>
9. Popay I., Field R. Grazing Animals as Weed Control Agents. *Weed Technology*. 1996; 10(1):217-231. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1017/S0890037X00045942>
10. Dospekhov V.A. Field Experience Methods. 3rd ed. Moscow: Kolos; 1985. 336 p. Available at: https://mf.bmstu.ru/info/faculty/lt/caf/lt1/soil_books/uchebnik9.pdf (accessed 20.11.2019). (In Russ.)

Received 20.02.2019; revised 11.04.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Andrey Yu. Izmaylov, Head of Chair of General Science and Special Disciplines, Director of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1 Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), ResearcherID: H-4602-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>, vim@vim.ru

Dmitriy O. Khort, Head of Department of Technology and Machinery for Horticulture, Viticulture and Nursery, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1 Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Agriculture), ResearcherID: Q-2695-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, vim_sad@mail.ru

Igor G. Smirnov, Academic Secretary of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1 Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Agriculture), ResearcherID: K-5623-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9992-1261>, vim_sad@mail.ru

Rostislav A. Filippov, Leading Researcher of Department of Technologies and Machinery for Horticulture, Viticulture and Nursery, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1 Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Agriculture), ResearcherID: Q-2722-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3586-3634>, vim_sad@mail.ru

Alexey I. Kutyrev, Researcher of Department of Technologies and Machinery for Horticulture, Viticulture and Nursery, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1 Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: I-3699-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-775X>, alexeykutyrev@gmail.com

Contribution of the authors:

A. Yu. Izmaylov – scientific supervision, formulation of the basic concept of research and the structure of the article; D. O. Khort – collection and analysis of literature, research participation, critical analysis, editing; I. G. Smirnov – scientific supervision, determination of the study methodology, problem definition; R. A. Filippov – literature and patent analysis, participation in theoretical study, word processing and text editing; A. I. Kutyrev – research participation, preparation of the initial text with further refinement, computer modeling.

All authors have read and approved the final manuscript.



Совершенствование технологии уборки веничного сорго

А. И. Ряднов¹, В. Ф. Федоренко², О. А. Федорова¹,
Н. П. Мишуров^{2*}, С. А. Давыдова³

¹ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (г. Волгоград, Россия)

²ФГБНУ «Росинформагротех» (р. п. Правдинский, Россия)

³ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Россия)

*mishurov@rosinformagrotech.ru

Введение. Обеспечение высокого качества уборки веничного сорго при минимизации затрат труда возможно путем совершенствования существующих, а также разработки новых технологий и технических средств уборки. Новые решения должны обеспечивать сокращение доли или полное исключение ручного труда. Цель работы – совершенствование технологии уборки веничного сорго на основе комплексного критерия эффективности.

Материалы и методы. Методической базой выбора эффективной технологии уборки веничного сорго стала теория эффективности технических систем, в соответствии с которой результативность систем оценивается по величине комплексного критерия, включающего в себя совокупность частных показателей и их относительную важность.

Результаты исследования. Предложено оценивать эффективность технологии уборки сорго по комплексному критерию, учитывающему частные показатели и их относительную важность. Разработана технология уборки веничного сорго, включающая в себя: обмолот сорго на корню прямоточной выносной молотильной камерой соргоуборочного комбайна с одновременным скашиванием обмолоченных растений, сбором обмолоченных и скошенных растений в тракторный прицеп, а зерна – в бункер; транспортировку срезанных растений к месту хранения; скирдование их с подсушиванием активным вентилированием. На основе экспериментальных исследований определены значения всех изучаемых частных показателей и коэффициенты относительной важности, рассчитан комплексный критерий эффективности для существующей и предлагаемой технологии уборки веничного сорго.

Обсуждение и заключение. Расчетные значения коэффициентов K_1^* и K_2^* для существующей и предлагаемой технологии уборки веничного сорго использованы для определения комплексного критерия эффективности, который равен для существующей $\varphi(W_1) = 15,54$, а для предлагаемой – $\varphi(W_2) = 2588,75$ соответственно. По комплексному критерию предлагаемая технология уборки эффективнее применяемой в настоящее время более чем в 160 раз.

Ключевые слова: технологии уборки веничного сорго, соргоуборочный комбайн, частные показатели, комплексный критерий эффективности уборки веничного сорго

Для цитирования: Совершенствование технологии уборки веничного сорго / А. И. Ряднов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 4. С. 635–651. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.635-651>

© Ряднов А. И., Федоренко В. Ф., Федорова О. А., Мишуров Н. П., Давыдова С. А., 2019



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

Improvements in Broom Corn Harvesting Process

A. I. Rjadnov^a, V. F. Fedorenko^b, O. A. Fedorova^a,
N. P. Mishurov^{b*}, S. A. Davydova^c

^aVolgograd State Agrarian University (Volgograd, Russia)

^bRosinformagrotekh (Pravdinskiy, Russia)

^cFederal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russia)

*mishurov@rosinformagrotech.ru

Introduction. Solving the problem of harvesting broom corn (*Sorghum vulgare* var. *technicum*) with minimal expenditure of labor and resources, and high quality is possible through improving existing or developing new processes and equipment for harvesting. At the same time, the proposed new processes and equipment should ensure the reduction or complete elimination of the share of manual labor. The purpose of the work is to improve the process for harvesting of broom corn based on a complex performance criterion.

Materials and Methods. The methodological basis for choosing an effective process for harvesting broom corn was the theory of efficiency of technical systems. According to it, the latter is estimated using the value of a complex criterion that includes a set of particular indicators and their relative importance.

Results. It is proposed to evaluate the efficiency of the broom corn harvesting process according to a complex criterion that takes into account particular indicators and their relative importance. A developed process for harvesting broom corn includes: threshing of standing broom corn in the direct flow offset threshing chamber of a combine harvester with simultaneous mowing of the threshed plants using the combine harvester thresher; collecting the threshed and mown plants in the tractor trailer and the threshed grain in the hopper; transportation of threshed and cut plants to the place of storage; and stacking of threshed plants with drying them using active ventilation. Based on experimental studies, the values of all the studied particular indicators and their coefficients of relative importance were determined; a comprehensive performance criterion for the existing process for broom corn harvesting and the proposed process was calculated.

Discussion and Conclusion. The calculated values of coefficients K_1^* and K_2^* for the existing and proposed processes for harvesting broom corn were used to determine the complex performance criterion, which is $\varphi(W_1) = 15.54$ for the existing process and $\varphi(W_2) = 2588.75$ for the proposed one respectively. According to the complex criterion, the proposed harvesting process is more efficient than that currently used more than 160 times.

Keywords: broom corn harvesting process, broom corn combine harvester, particular indicators, a complex criterion of broom corn harvesting

For citation: Rjadnov A.I., Fedorenko V.F., Fedorova O.A., et al. Improvements in Broom Corn Harvesting Process. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):635-651. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.635-651>

Введение

Обеспечение высокого качества уборки веничного сорго при минимизации затрат труда возможно путем совершенствования существующих, а также разработки новых технологий и технических средств уборки. Новые технологические и технические решения должны обеспечивать сокращение

доли или полное исключение ручного труда. Важность роста эффективности уборки веничного сорго обусловлена тем, что существующие технологии уборки и рабочие органы для их реализации не отвечают агротехническим требованиям по качеству обмолота метелок. В них остается до 3 % необмолоченного зерна, обламываются ветви

высшего порядка, метелка сохраняется не более чем на 90 %, уборка требует значительных трудозатрат.

Цель работы: совершенствование технологии уборки веничного сорго на основе комплексного критерия эффективности.

Обзор литературы

Усовершенствованная технология уборки веничного сорго должна обеспечивать получение высококачественного сырья для производства веников, щеток и т. п. и семян или зерна для технических целей или на фураж.

Особенностью веничного сорго при уборке, выполняемой при полной спелости зерна, является то, что листовая масса имеет высокую влажность, равную 65–70 %. Поэтому для сохранения элементов метелки в процессе ее обмолота необходимо применять специальные машины. Однако промышленность такие машины не выпускает. В связи с этим в хозяйствах приспособляют существующие молотильные устройства. При этом требуется подсушка растений до влажности 25–30 %.

Обмолот веничного сорго в основном проводится на стационаре, но с существенными затратами труда.

До настоящего времени в хозяйствах, возделывающих веничное сорго, применяются следующие технологии уборки и послеуборочной обработки [1]:

1. Скашивание растений, уборка с поля, скирдование, сушка растений в скирдах активной вентиляцией, обмолот;

2. Скашивание растений, досушивание растений, уложенных на поле, скирдование, хранение, обмолот;

3. Скашивание растений, досушивание растений, уложенных на поле, транспортировка на стационар, обмолот, хранение в скирдах;

4. Скашивание растений, формирование из них снопов, транспортировка снопов на стационар, обмолот снопов, досушивание обмолоченных растений, скирдование, хранение;

5. Подсушивание путем десикации, скашивание растений с последующим формированием снопов, вывоз с поля снопов на стационар, обмолот снопов, хранение обмолоченных растений в скирдах.

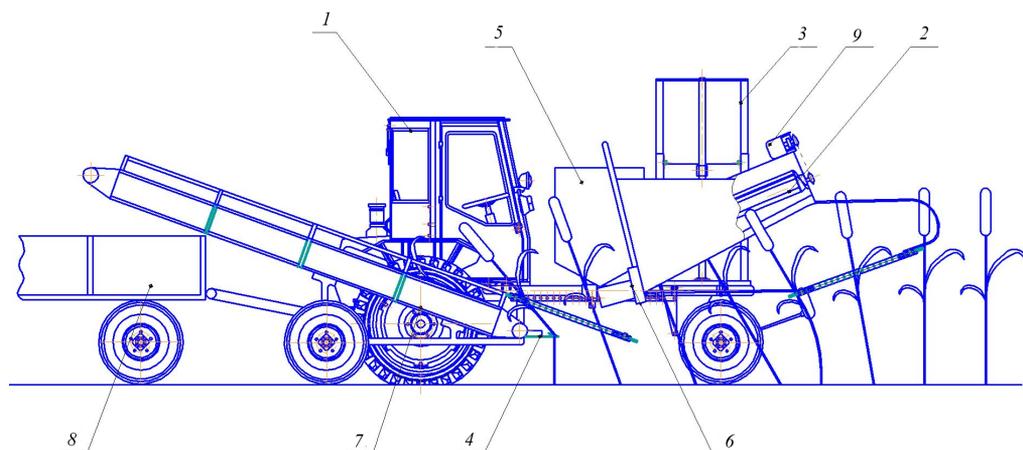
Если для уборки зернового сорго могут применяться современные очесывающие жатки [2], то для уборки веничного сорго прямым комбайнированием промышленность России и зарубежные страны не выпускают машин, поэтому в условиях Волгоградской области чаще всего применяется технология, включающая в себя следующие операции: скашивание растений, досушивание растений, уложенных на поле, транспортировка на стационар, обмолот, хранение в скирдах.

В ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» разработан принципиально новый инерционно-очесный способ обмолота метелочных культур. Данный способ реализован в молотильно-сепарирующем устройстве (МСУ) комбайна для уборки сорго и других метелочных культур.

Разработаны технологические схемы комбайнов с МСУ инерционно-очесного типа для уборки на корню веничного и зернового сорго, проса и других метелочных культур [1]. При этом запатентованы навесные одно- и многомодульный (рис. 1–4) и прицепной многомодульный комбайны для уборки сорго (рис. 5) [3–5].

Технологический процесс уборки зерновых колосовых и метелочных культур разработанными навесными комбайнами для уборки метелочных культур осуществляется следующим образом.

При уборке сорго растения подхватывает так называемый нормализатор 10 (рис. 3) модуля 8 МСУ и отклоняет их, устанавливая перпендикулярно к плоскости битеров, размещенных в прямоточной выносной молотильной камере (ПВМК) 9, где растения обмолачиваются. Вымолоченное зерно



Р и с. 1. Схема одномодульного навесного комбайна для уборки метелочных культур:

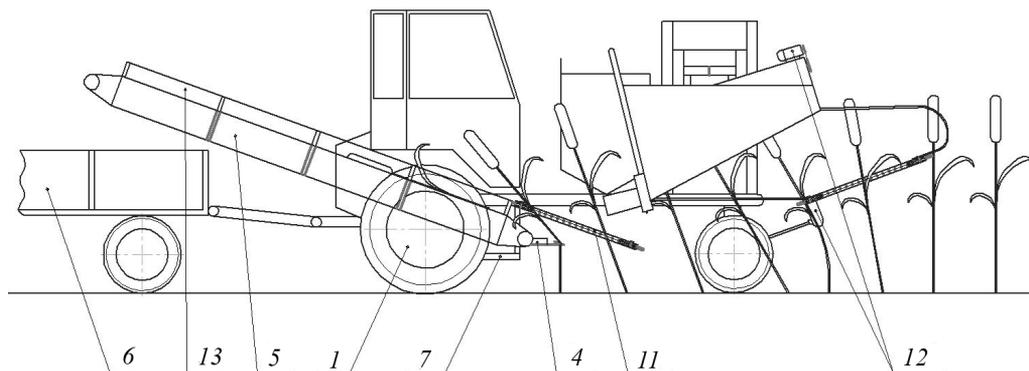
- 1 – самоходное шасси; 2 – модуль; 3 – навесное устройство; 4 – жатка;
- 5 – зерновой бункер; 6 – система транспортировки зерна; 7 – транспортер растений;
- 8 – тракторная тележка; 9 – электрооборудование и сигнализация

Fig. 1. Scheme of a single-module mounted combine harvester for harvesting panicles:
1 – self-propelled chassis; 2 – module; 3 – mounted device; 4 – thresher; 5 – grain tank; 6 – grain transport system; 7 – plant conveyor; 8 – tractor car; 9 – electrical equipment and alarm system

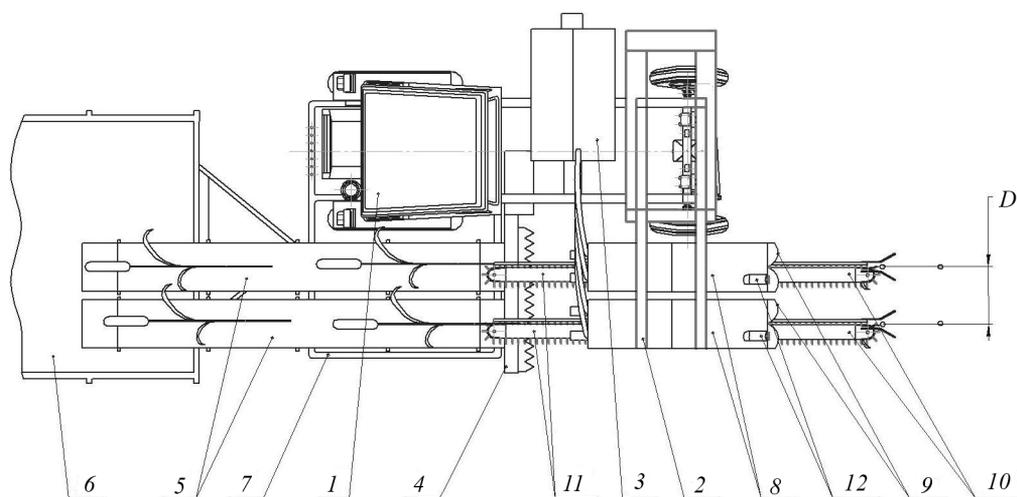


Р и с. 2. Макет одномодульного навесного комбайна для уборки метелочных культур

Fig. 2. Prototype of single-module mounted combine harvester for harvesting panicles



а) Вид сбоку
a) Side view



б) Вид сверху
b) Top view

Р и с. 3. Схема двухмодульного навесного комбайна для уборки метелочных культур:
1 – самоходное шасси; 2 – гидравлическая навесная система; 3 – зерновой бункер;
4 – жатка; 5 – транспортер растений; 6 – прицеп; 7 – рама; 8 – модуль; 9 – прямооточная выносная
молотильная камера; 10 – нормализатор; 11 – промежуточный транспортер;
12 – синхронизирующая передача; 13 – борт

Fig. 3. Scheme of two-module mounted combine harvester for harvesting panicles:
1 – self-propelled chassis; 2 – hydraulic mounted system; 3 – grain hopper;
4 – threshing chamber; 5 – plant conveyor; 6 – trailer; 7 – frame; 8 – module; 9 – direct flow offset
threshing chamber; 10 – normalizer; 11 – intermediate conveyor; 12 – timing drive; 13 – guards



Р и с. 4. Макет двухмодульного навесного комбайна для уборки метелочных культур
 F i g. 4. Pototype of double-module mounted combine harvester for harvesting panicultates

направляется в зерносорбник, затем вентилятором засасывается в циклон, в котором отделяются пыль и легкие примеси. Зерно под действием силы тяжести падает из циклона вниз в емкость, перекрываемую заслонкой, в случае открытия которой зерно поступает в бункер 3 комбайна.

Воздух с отделенными от зерна пылью, легкими примесями и полевой поступает в вентилятор, очищается от пыли с помощью фильтра, установленного на выходе вентилятора, и выбрасывается наружу.

Обмолоченные растения сорго срезаются жаткой 4 и под действием инерционных сил укладываются на транспортер 5, который перемещает их в прицепную тракторную тележку 6. Гидравлическая навеска 2 позволяет устанавливать ПВМК 9 на необходимую высоту.

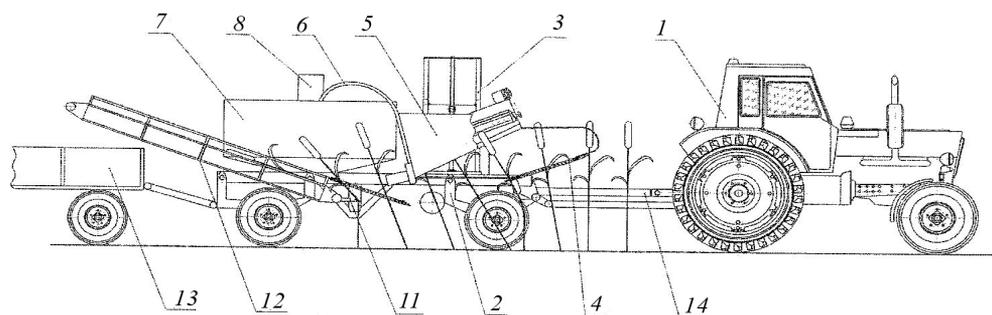
Энергетическим средством одно- и двухмодульного навесного соргоуборочного комбайна является самоходное шасси Т-16М.

Важнейшим условием при разработке устройств, реализующих инерционно-очесный способ обмолота мете-

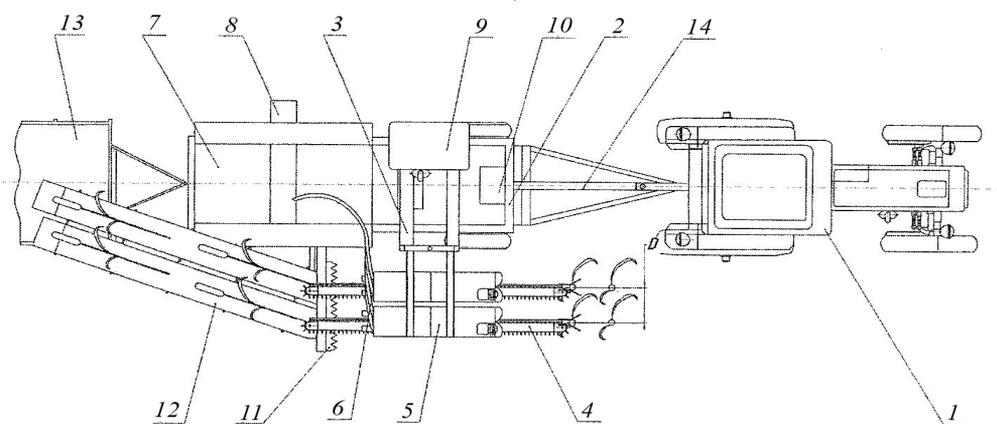
лочных культур, является возможность применения их в комбайнах с высокой производительностью и заданным качеством уборки. Высокая производительность комбайнов обеспечивается применением прицепного многомодульного комбайна на базе мощных тракторов, например, тяговых классов 3,0, 4,0 и 5,0.

Энергетическим средством прицепного комбайна для уборки метелочных культур могут быть не только трактор или самоходное шасси, но и автомобиль или другое тяговое средство.

Рабочие органы прицепного комбайна для уборки метелочных культур (рис. 5), такие как нормализатор 4, ПВМК 5, устройство подачи зерна 6, выгрузной механизм 8, жатка 11, транспортер растений 12 приводятся в действие кинематической связью от распределительного устройства 10, энергия к которому подводится или передается от вала отбора мощности (при его наличии) энергетического средства 1 через карданную передачу 14 или от автономного двигателя 9. Кинематическая связь может осуществляться с применением, например, ременных,



а) Вид сбоку
a) Side view



б) Вид сверху
b) Top view

Р и с. 5. Схема двухмодульного прицепного комбайна для уборки метелочных культур: 1 – энергетическое средство; 2 – прицепная колесная рама; 3 – гидравлическая навеска; 4 – нормализатор; 5 – ПВМК; 6 – устройство подачи зерна; 7 – бункер; 8 – выгрузной механизм; 9 – автономный двигатель; 10 – распределительное устройство; 11 – жатка; 12 – транспортер растений; 13 – прицеп; 14 – карданная передача

Fig. 5. Scheme of a double-module trailed combine harvester for harvesting panicalates: 1 – power plant; 2 – hook-on wheel frame; 3 – hydraulic mounted device; 4 – normalizer; 5 – direct flow offset threshing chamber (DFOTC); 6 – grain feeder; 7 – hopper; 8 – unloader; 9 – self-contained engine; 10 – distributor; 11 – thresher; 12 – plant conveyor; 13 – trailer; 14 – universal-joint drive

цепных и других механических передач, гидромоторов или электрических двигателей. При использовании в качестве энергетического средства *1* маломощных тракторов привод одного или нескольких рабочих органов может осуществляться от вала отбора мощности трактора, а остальных – от

автономного двигателя *9*. При использовании энергетического средства *1*, не имеющего вала отбора мощности, привод всех рабочих органов осуществляется от автономного двигателя *9*, а в качестве энергетического средства *1* мощного трактора – привод всех рабочих органов может осуществляться от

вала отбора мощности трактора. Переключение потока мощности к рабочим органам от автономного двигателя комбайна 9 и от вала отбора мощности осуществляется распределительным устройством 10, которое представляет собой двухпозиционную муфту, например, кулачковую, планетарную или фрикционную.

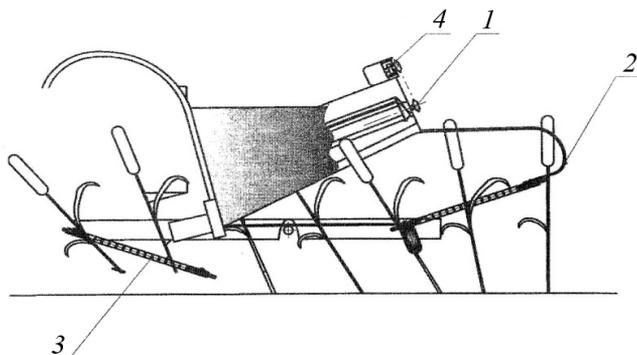
Все модели разработанных комбайнов оборудованы специальными модулями (рис. 6).

Основными рабочими органами ПВМК являются битеры. В МСУ исследуемых комбайнов были установлены щелевые битеры с транспортирующей пластиной (рис. 7) с постоянной кривизной лопасти.

Модуль комбайна, изготовленного по патенту РФ № 2199203 [6], обмолачивает растения на корню одного ряда, а модуль комбайна, изготовленного по патенту РФ № 2535255 [7], – два ряда растений.

Авторами А. И. Рядновым и О. А. Федоровой выполнена работа по обоснованию числа модулей комбайна с молотильно-сепарирующим устройством инерционно-очесного типа. При оптимизации числа модулей за ее критерий принята максимальная производительность соргоуборочного комбайна при допустимом уровне потерь урожая.

Зерно, обмолоченное ПВМК, может подаваться в бункер метателями вентиляторного типа, пневматическим



Р и с. 6. Схема модуля комбайна для уборки метелочных культур:
1 – ПВМК; 2 – нормализатор; 3 – промежуточный транспортер; 4 – синхронизирующая передача

F i g. 6. Scheme of a combine harvester module for harvesting panicles:
1 – direct flow offset threshing chamber (DFOTC); 2 – normalizer; 3 – intermediate conveyor;
4 – timing drive



Р и с. 7. Щелевые битеры с транспортирующей пластиной
Fig. 7. Slotted beaters with a transporting plate

устройством или винтовым конвейером. А. И. Рядновым обоснована конструктивно-технологическая схема пневмотранспортера зерна комбайна для уборки метелочных культур.

В связи с существенным варьированием высоты растений сорго различных видов и сортов и необходимостью обеспечения высокой надежности технологического процесса уборки, а следовательно, снижения потерь урожая комбайн оборудован многоступенчатым телескопическим навесным устройством.

До настоящего времени разработана теоретическая модель обмолота метелочных культур инерционно-очесного МСУ [8], оптимизированы параметры МСУ [9], изучены пути повышения производительности соргоуборочного комбайна, дана оценка пропускной способности рабочих органов, качества обмолота МСУ и показателей надежности систем соргоуборочного комбайна.

Так как в комбайне впервые использовано МСУ инерционно-очесного типа, то при его изучении учитывались результаты исследований ряда научных работ, в которых представлены результаты исследований очесного [9; 10–12] и инерционного [13; 14] способов обмолота, режимов работы [15], степени использования уборочных машин [16] по объему выполняемых работ [17], по влиянию сроков уборки на физико-механические характеристики сорго, в частности, на содержание полифенолов и флавоноидов [18]. Рассмотрены также различные характеристики сорго, учитываемые при проектировании техники для уборки сорго [19; 20].

Материалы и методы

Методической базой выбора эффективной технологии уборки веничного сорго явилась теория эффективности

технических систем¹, в соответствии с которой разработан комплексный критерий, включающий в себя совокупность частных показателей и их относительную важность.

Первый этап выбора частных показателей – анализ факторов, влияющих на эффективность технологии уборки сорго, среди которых размерно-массовые характеристики растений и зерна, их влажность, густота и засоренность стеблестоя, равномерность созревания, варьирование высоты растений, технические характеристики и регулировки рабочих органов соргоуборочной машины и ее скоростной режим, уровень механизации, квалификация механизаторов, нагрузка на одну машину и другое.

Второй этап – опрос экспертов, ранжирование факторов по относительной важности, выбор частных показателей, имеющих максимальные значения коэффициентов относительной важности.

Выбраны следующие частные показатели эффективности технологии уборки веничного сорго:

1. Себестоимость уборки – определялась как сумма эксплуатационных затрат, приходящаяся на единицу уборочной площади;
2. Сохранность метелки – оценивалась косвенным путем по массе элементов метелки в зерновом ворохе;
3. Доля вымолоченного зерна – определялась как отношение массы вымолоченного зерна к сумме масс вымолоченного зерна и зерен, оставшихся на метелке;
4. Потери метелок – определялись с учетом количества метелок на поле после уборки и в момент изготовления веников;
5. Суммарные потери зерна – определялись по стандартной методике;
6. Производительность соргоуборочной машины – определялась площа-

¹ Надежность и эффективность в технике: справ. в 10 т. / Ред. совет: В. С. Абдуевский и др. М.: Машиностроение, 1986. Т. 3: Эффективность технических систем / Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. 328 с.

дью сорго, убранный машиной в единицу времени;

7. Трудоемкость уборки – оценивалась суммой затрат труда на выполнение технологических операций с начала уборки до получения готового сырья для изготовления веников;

8. Удельная мощность машин, используемых на уборке сорго, – определялась как отношение суммы мощностей двигателей всех машин, используемых на уборке сорго, к убранный площади;

9. Материалоемкость машин, используемых на уборке, – оценивалась как отношение массы всех машин, используемых на уборке, к убранный площади сорго.

Третий этап – оценка частных показателей эффективности по результатам экспериментальных исследований.

Все экспериментальные исследования проводились на уборке веничного сорго на полях хозяйств Волгоградской области в течение пяти уборочных сезонов.

После обработки экспериментальных данных была дана оценка каждого частного показателя и с учетом значений коэффициентов их относительной важности рассчитан комплексный критерий эффективности для существующей и предлагаемой технологий уборки веничного сорго.

Результаты исследования

Предложено оценивать эффективность технологии уборки сорго не по отдельным частным показателям, а по комплексному критерию.

В соответствии с теорией эффективности технических систем² наиболее приемлемой при выборе технологии уборки веничного сорго из ряда возможных технологий является концепция оптимизации, при которой выбранная технология $u \in U$ должна обеспечивать максимальный эффект.

В этом случае функция агрегирования имеет вид:

$$\phi(W) = \frac{\prod_{i=1}^{m_1} W_i}{\prod_{i=m_1+1}^m W_i}, \quad (1)$$

где $i = \overline{1, m_1}$ – частные показатели, которые необходимо увеличивать, а $i = \overline{m_1 + 1, m}$ – уменьшать.

Числитель функции (1) можно отождествлять с целевым эффектом, а знаменатель – с затратами на его достижение.

Так как выбранные частные показатели эффективности, входящие в первую и вторую группы, неоднородны, имеют различные размерности и физический смысл, а функция агрегирования (1) является векторной величиной, то для приведения функции (1) к скалярному виду используем эквивалентное преобразование: вводим отношение фактических значений W_i к соответствующим требуемым W_i^t .

Тогда, функция (1) примет вид:

$$\phi(W) = \frac{\prod_{i=1}^{m_1} \frac{W_i}{W_i^t}}{\prod_{i=m_1+1}^m \frac{W_i}{W_i^t}}. \quad (2)$$

Обозначив:

$$\prod_{i=1}^{m_1} \frac{W_i}{W_i^t} = K_1, \quad \prod_{i=m_1+1}^m \frac{W_i}{W_i^t} = K_2, \quad (3)$$

получим:

$$\phi(W) = \frac{K_1}{K_2}. \quad (4)$$

В идеальном варианте $K_1 = 1$ и $K_2 = 1$.

Экспертная оценка показала, что выбранные частные показатели эффективности технологии уборки веничного

² Там же.

сорго неравнозначны, имеют различную относительную важность. Для учета степени влияния каждого отдельного частного показателя на величину комплексного критерия определены коэффициенты их относительной важности γ_i .

При этом $\gamma_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^m \gamma_i = 1$.

С учетом γ_i функция агрегирования, критерий эффективности (2), примет вид:

$$\phi(W) = \frac{\prod_{i=1}^m \gamma_i \frac{W_i}{W_i'}}{\prod_{i=m_1+1}^m \gamma_i \frac{W_i}{W_i'}} \quad (5)$$

а с учетом обозначений (3):

$$\phi(W) = \frac{K_1 \prod_{i=1}^{m_1} \gamma_i}{K_2 \prod_{i=m_1+1}^m \gamma_i} \quad (6)$$

Пусть:

$$K_1 \prod_{i=1}^{m_1} \gamma_i = K_1^* \quad \text{и} \quad K_2 \prod_{i=m_1+1}^m \gamma_i = K_2^* \quad (7)$$

тогда комплексный критерий эффективности:

$$\phi(W) = \frac{K_1^*}{K_2^*} \quad (8)$$

По значению комплексного критерия эффективности рассматриваемых технологий уборки веничного сорго можно определить наилучшую, с точки зрения их комплексной оценки по совокупности ряда частных показателей.

С учетом преимуществ и недостатков используемых в настоящее время технологий уборки веничного сорго, а также возможностей соргоуборочного комбайна, реализующего инерционно-

очесный способ обмолота метелочных культур, предложена новая технология уборки веничного сорго, включающая в себя следующие технологические операции:

1. Обмолот на корню веничного сорго с одновременным скашиванием обмолоченных растений жаткой комбайна;
2. Сбор скошенных и обмолоченных растений в тракторный прицеп;
3. Сбор вымолоченного зерна в бункер комбайна с последующей выгрузкой в транспортное средство;
4. Транспортировка обмолоченных и срезанных растений к месту хранения;
5. Скирдование обмолоченных растений с подсушиванием их активным вентилированием с последующим изготовлением веников, щеток и другого.

Фактические значения частных показателей эффективности существующей и предлагаемой технологий уборки веничного сорго определены экспериментальным или расчетным путем. Требуемые значения частных показателей эффективности принимались равными лучшим значениям, полученным при экспериментах с некоторыми допущениями.

Значения исследуемых частных показателей эффективности представлены в таблице 1.

Используя значения частных показателей эффективности, представленные в таблице 1, были определены

отношения $K_i = \frac{W_i}{W_i'}$ и значения коэффициентов K_1 и K_2 (табл. 2).

Определены коэффициенты важности всех частных показателей эффективности уборки веничного сорго γ_i (табл. 3).

По зависимости (7) рассчитаны значения коэффициентов K_1^* и K_2^* , а по зависимости (8) – комплексный критерий эффективности для существующей и предлагаемой технологий уборки веничного сорго.

По комплексному критерию эффективности предлагаемая техноло-

Таблица 1

Table 1

Значения частных показателей эффективности уборки
Values of particulate harvesting performance indicators

№ п / п No.	Частные показатели / Particular indicators	Технология уборки / Harvesting process		Требуемые значения частных показателей / Required values of particular indicators
		существующая / current technology	предлагаемая / proposed technology	
1	Себестоимость уборки C , тыс. руб/га / Cost of harvesting C , thousands rubles/ha	60,0	45,00	35,00
2	Сохранность метелки H , % / Broom integrity H , %	90,0	99,00	100,00
3	Доля вымолоченного зерна D , % / Share of threshed out corn D , %	97,0	98,60	99,00
4	Потери метелок (M), % / Loss of brooms M , %	15,0	5,00	5,00
5	Суммарные потери зерна S , % / Total corn loss S , %	2,9	1,00	1,00
6	Производительность соргоуборочной машины P , га/ч / Broom corn harvester performance P , ha/hr	0,1	0,34	0,34
7	Трудоемкость уборки (T), чел.-ч./га / Labor input of harvesting T , man-hr/ha	30,0	10,00	10,00
8	Удельная мощность машин, используемых на уборке сорго N , кВт/га / Specific power of harvesting machines N , kW/ha	21,4	20,00	20,00
9	Материалоемкость машин, используемых на уборке G , кг/ га / Materials intensity of harvesting machines G , kg/ha	1220,0	1110,00	1000,00

Таблица 2

Table 2

Расчетные значения K_i , K_1 и K_2
Calculated values of K_i , K_1 , and K_2

Технология уборки / Harvesting process	K_H	K_D	K_P	K_1	K_C	K_M	K_S	K_T	K_N	K_G	K_2
Существующая / Current technology	0,90	0,98	0,29	0,26	1,71	3,00	2,90	3,00	1,07	1,22	58,40
Предлагаемая / Proposed technology	0,99	0,99	1,00	0,99	1,29	1,00	1,00	1,00	1,00	1,11	1,43

Значение γ_i
 γ_i values

Частный показатель / Particular indicator	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>N</i>	<i>G</i>
γ_i	0,149	0,188	0,075	0,153	0,119	0,115	0,081	0,058	0,062

гия уборки эффективнее применяемой в настоящее время более чем в 160 раз.

Обсуждение и заключение

Предложенная технология уборки веничного сорго базируется на применении разработанного навесного соргоуборочного комбайна, оборудованного МСУ инерционно-очесного типа. Применение предложенной технологии позволит существенно снизить суммарные потери зерна (в 2,9 раза), потери метелок и трудоемкость работ (в 3 раза) и в 3,4 раза повысить производительность приме-

няемых машин. При этом расчетные значения коэффициентов K_1^* и K_2^* равны: для существующей технологии $K_1^* = 5,44 \cdot 10^{-4}$, $K_2^* = 0,35 \cdot 10^{-4}$ и предлагаемой $K_1^* = 20,71 \cdot 10^{-4}$, $K_2^* = 0,008 \cdot 10^{-4}$.

Комплексный критерий эффективности для существующей технологии $\varphi(W_i) = 15,54$, а для предлагаемой – $\varphi(W_i) = 2588,75$.

Таким образом, предложенная технология уборки веничного сорго существенно эффективнее применяемой в настоящее время.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ряднов А. И. Совершенствование технологии уборки веничного сорго комбайнами с инерционно-очесным способом обмолота // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 11. Ч. 1. С. 31–32. URL: <https://applied-research.ru/article/view?id=4301> (дата обращения: 21.10.2019).
2. Бурьянов А. И., Бурьянов М. А., Червяков И. В., Ковтунов В. В. Совершенствование технологии уборки сорго // Зерновое хозяйство России. 2017. № 4. С. 45–48. URL: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/84/85> (дата обращения: 21.10.2019).
3. Комбайн для уборки технических культур: пат. 2421974 Рос. Федерация. № 2010100341/21; заявл. 11.01.10; опубл. 27.06.11. Бюл. № 18. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2421974> (дата обращения: 21.10.2019).
4. Комбайн для уборки сорго: пат. 2498553 Рос. Федерация. № 2012103615/13; заявл. 10.06.12; опубл. 20.11.13. Бюл. № 32. URL: <https://findpatent.ru/patent/249/2498553.html> (дата обращения: 21.10.2019).
5. Прицепной комбайн для уборки метелочных культур: пат. 2496296 Рос. Федерация. № 2012109041/13; заявл. 11.03.12; опубл. 27.10.13. Бюл. № 30.
6. Щелевой битек молотильно-сепарирующего устройства: пат. 2199203 Рос. Федерация. № 2015140386/13; заявл. 22.09.2015; опубл. 27.10.2016. Бюл. № 30. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2601228C1_20161027.pdf (дата обращения: 21.10.2019).
7. Битек молотильно-сепарирующего устройства: пат. 2535255 Рос. Федерация. № 2013133173/13; заявл. 16.07.2016; опубл. 10.12.2014. Бюл. № 34. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2535255C1_20141210.pdf (дата обращения: 21.10.2019).

8. **Ряднов А. И., Федорова О. А.** Теоретическая модель обмола метелочных культур инерционно-очесным молотильно-сепарирующим устройством // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. Ч. 1. С. 253. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21393> (дата обращения: 21.10.2019).

9. **Кузнецов Н. Г., Шарипов Р. В., Федорова О. А.** Определение параметров молотильно-сепарирующего устройства инерционно-очесного типа // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 3. С. 190–195. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-molotilno-separiruyushego-ustroystva-inertsionno-ochesnogo-tipa> (дата обращения: 21.10.2019).

10. **Алдошин Н. В., Лылин Н. А., Мосяков М. А.** Уборка зернобобовых культур методом очеса // Дальневосточный аграрный вестник. 2017. № 1. С. 67–74. URL: http://www.vestnik.dalgau.ru/images/gurnal/vipusk_2017/nomer_1/Aldoshin.pdf (дата обращения: 21.10.2019).

11. **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. Вып. 2. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>

12. **Мкртчян С. Р., Игнатов В. Д., Жалнин Э. В., Стружкин Н. И.** Очесывающие жатки: состояние и перспективы развития // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 4. С. 18–21.

13. **Aldoshin N.** Methods of Harvesting of Mixed Crops // Proceeding of 6th International Conference on Trends in Agricultural Engineering. Part 1. Prague, Czech Republic: Czech University of Life Sciences Prague, 2016. Pp. 26–32. URL: <http://2016.tae-conference.cz/proceeding/TAE2016-004-N-Aldoshin.pdf> (дата обращения: 21.10.2019).

14. **Скворцов А. К., Иленёва С. В., Герман А. Л.** Достижения и перспективы в инерционно-очесном обмолае // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2006. № 3. С. 71–76.

15. **Иленёва С. В., Скворцов А. К., Герман А. Л.** Результаты обмола зерновых культур молотилкой инерционного воздействия // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2009. № 4. С. 96–99. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-obmolota-zernovyh-kultur-molotilkoy-inertsionnogo-vozddeystviya> (дата обращения: 21.10.2019).

16. **Masek J., Novak P., Jasinskas A.** Evaluation of Combine Harvester Operation Costs in Different Working Conditions // Engineering for Rural Development. 2017. № 16. Pp. 1180–1185. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N254>

17. **Mimra M., Kavka M.** Risk Analysis Regarding a Minimum Annual Utilization of Combine Harvesters in Agricultural Companies // Agronomy Research. 2017. Vol. 15, no. 4. Pp. 1700–1707. DOI: <http://dx.doi.org/10.15159/ar.17.022>

18. **Vasylieva N., Pugach A.** Economic Assessment of Technical Maintenance in Grain Production of Ukrainian Agriculture // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2017. Vol. 23, Issue 2. Pp. 198–203. URL: <https://www.agrojournal.org/23/02-04.html> (дата обращения: 21.10.2019).

19. Changes in Physicochemical Characteristics of Sorghum Among Different Varieties and at Different Harvest Stages after Heading / S. K. Kim [et al.] // Korean Journal of Food Science and Technology. 2018. Vol. 50, no. 3. Pp. 260–266. DOI: <https://doi.org/10.9721/KJFST.2018.50.3.260>

20. **Mathanker S. K., Hansen A. C.** Harvesting System Design and Performance // Engineering and Science of Biomass Feedstock Production and Provision. 2014. Pp. 85–139. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8014-4_5

Поступила 09.04.2019; принята к публикации 14.06.2019; опубликована онлайн 31.12.2019



Об авторах:

Ряднов Алексей Иванович, профессор кафедры эксплуатации и технического сервиса машин в АПК ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26), доктор сельскохозяйственных наук, ResearcherID: Y-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2364-4944>, alex.rjadnov@mail.ru

Федоренко Вячеслав Филиппович, научный руководитель ФГБНУ «Росинформагротех» (141261, Россия, р. п. Правдинский, ул. Лесная д. 60), академик РАН, доктор технических наук, профессор, ResearcherID: A-9022-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>, fedorenko@rosinformagrotech.ru

Федорова Ольга Алексеевна, профессор кафедры технических систем в АПК ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26), доктор технических наук, ResearcherID: Y-8291-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2615-1101>, foa_77@mail.ru

Мишуров Николай Петрович, заместитель директора по научной работе ФГБНУ «Росинформагротех» (141261, Россия, р. п. Правдинский, ул. Лесная д. 60), кандидат технических наук, ResearcherID: A-8970-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1058-6952>, mishurov@rosinformagrotech.ru

Давыдова Светлана Александровна, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский пр., д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: Y-7174-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>, davidova-sa@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. И. Ряднов – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, проведение экспериментальных исследований, критический анализ полученных результатов, подготовка начального варианта текста и формирование выводов; В. Ф. Федоренко – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов; О. А. Федорова – проведение экспериментальных исследований, критический анализ полученных результатов и доработка текста; Н. П. Мишуров – доработка текста; С. А. Давыдова – литературный и патентный анализ, проведение теоретических исследований.

Благодарности: Авторы благодарят доцента ФГБОУ ВО «Волгоградский ГАУ» Р. В. Шарипова за подготовку опытного соргоуборочного комбайна к экспериментальным исследованиям и оптимизацию конструктивных параметров рабочих органов молотильно-сепарирующего устройства инерционно-очесного типа.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Rjadnov A.I. Improving the Process for Harvesting Broom Corn Using Combine Harvester with an Inertial and Stripping Threshing Method. *Mezhdunarodnyiy zhurnal prikladnyih i fundamentalnyih issledovaniy* = International Journal of Applied and Fundamental Research. 2013; (11):31-32. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=4301> (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
2. Buryanov A.I., Buryanov M.A., Chervyakov I.V., Kovtunov V.V. Improvement of Harvesting Technology of Sorghum. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2017; (4):45-48. Available at: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/84/85> (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
3. Combine Harvester for Harvesting Industrial Crops: Patent 2421974 Russian Federation. No. 2010100341/21; appl. 11.01.2010; publ. 27.06.2011. Bulletin No. 18. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2421974> (accessed 21.10.2019). (In Russ.)

4. Combine Harvester for Harvesting Sorghum: Patent 2498553 Russian Federation. No. 2012103615/13; appl. 10.06.2012; publ. 20.11.2013. Bulletin No. 32. Available at: <https://findpatent.ru/patent/249/2498553.html> (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
5. Trailed Harvester for Harvesting Paniculates: Patent 2496296 Russian Federation. No. 2012109041/13; appl. 11.03.12; publ. 27.10.2013. Bulletin No. 30. (In Russ.)
6. Threshing-Separating Device Slotted Beater: Patent 2199203 Russian Federation. No. 2015140386/13; appl. 22.09.2015; publ. 27.10.2016. Bulletin No. 30. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2601228C1_20161027.pdf (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
7. Beater of Beating and Separating Device: Patent 2535255 Russian Federation. No. 2013133173/13; appl. 16.07.2016; publ. 10.12.2014. Bulletin No. 34. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2535255C1_20141210.pdf (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
8. Rjadnov A.I., Fedorova O.A. Theoretical Model for Threshing Paniculates with Inertial Stripping Threshing Separating Device. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education. 2015; (2):253. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21393> (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
9. Kuznetsov N.G., Sharipov R.V., Fedorova O.A. Determination of the Parameters of Inertial Stripping Threshing Separating Device. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2014. (3):190-195. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-molotilno-separiruyuschego-ustroystva-inertsionno-ochesnogo-tipa> (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
10. Aldoshin N.V., Lylin N.A., Mosyakov M.A. Legumes Harvesting with Combing (Stripping) Method. *Dalnevostochnyy agrarnyy vestnik* = Far East Agricultural Journal. 2017; (1)67-74. Available at: http://www.vestnik.dalgau.ru/images/gurnal/vipusk_2017/nomer_1/Aldoshin.pdf (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
11. Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. Improving the Design of the Combing Device for Harvesting of Leguminous Plants. *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>
12. Mkrtchyan S.R., Ignatov V.D., Zhalnin E.V., Struzhkin N.I. Combing Harvesters: State and Prospects of Development. *Selskohozyaystvennyye mashiny i tehnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2013; (4):18-21. (In Russ.)
13. Aldoshin N. Methods of Harvesting of Mixed Crops. In: Proceeding of 6th International Conference on Trends in Agricultural Engineering. Part 1. Prague, Czech Republic: Czech University of Life Sciences Prague; 2016. p. 26-32. Available at: <http://2016.tae-conference.cz/proceeding/TAE2016-004-N-Aldoshin.pdf> (accessed 21.10.2019). (In Eng.)
14. Skvortsov A.K., Ilenyova S.V., German A.L. Achievements and Prospects in the Inertial-Combing Type Threshing. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2006; (3):71-76. (In Russ.)
15. Ilenyova S.V., Skvortsov A.K., German A.L. Results of Threshing Grain Grind Inertial Impact. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2009; (4):96-99. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-obmolota-zernovyh-kultur-molotilkoy-inertsionnogo-vozdeystviya> (accessed 21.10.2019). (In Russ.)
16. Masek J., Novak P., Jasinskas A. Evaluation of Combine Harvester Operation Costs in Different Working Conditions. *Engineering for Rural Development*. 2017; 16:1180-1185. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N254>



17. Mimra M., Kavka M. Risk Analysis Regarding a Minimum Annual Utilization of Combine Harvesters in Agricultural Companies. *Agronomy Research*. 2017; 15(4):1700-1707. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.15159/ar.17.022>

18. Vasylieva N., Pugach A. Economic Assessment of Technical Maintenance in Grain Production of Ukrainian Agriculture. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2017; 23(2):198-203. Available at: <https://www.agrojournal.org/23/02-04.html> (accessed 21.10.2019). (In Russ.)

19. Kim S.K., Jung G.H., Lee J.E., et al. Changes in Physicochemical Characteristics of Sorghum Among Different Varieties and at Different Harvest Stages after Heading. *Korean Journal of Food Science and Technology*. 2018; 50(3):260-266. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.9721/KJFST.2018.50.3.260>

20. Mathanker S.K., Hansen A.C. Harvesting System Design and Performance. *Engineering and Science of Biomass Feedstock Production and Provision*. 2014; 85-139. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8014-4_5

Received 09.04.2019; revised 14.06.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Aleksey I. Rjadnov, Professor of Chair of Operation and Maintenance of Machines in the Agro-Industrial Complex, Volgograd State Agrarian University (26 Universitetsky Prospekt, Volgograd 400002, Russia), D.Sc. (Agriculture), ResearcherID: Y-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2364-4944>, alex.rjadnov@mail.ru

Vyacheslav F. Fedorenko, Scientific Director of Rosinformagrotech (60 Lesnaya St, Pravdinskiy 141261, Russia), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: A-9022-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>, fedorenko@rosinformagrotech.ru

Olga A. Fedorova, Professor of Chair of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex, Volgograd State Agrarian University (26 Universitetsky Prospekt, Volgograd 400002, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: Y-8291-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2615-1101>, foa_77@mail.ru

Nikolay P. Mishurov, Deputy Director for Research of Rosinformagrotech (60 Lesnaya St, Pravdinskiy 141261, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: A-8970-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1058-6952>, mishurov@rosinformagrotech.ru

Svetlana A. Davydova, Leading Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1 Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: Y-7174-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>, davidova-sa@mail.ru

Contribution of the authors:

A. I. Rjadnov – scientific guidance, formulation of the basic concept of the study, conducting experimental research, critical analysis of the results, writing the draft and drawing the conclusions; V. F. Fedorenko – scientific guidance, formulation of the basic concept of the study, writing the draft and drawing the conclusions; O. A. Fedorova – conducting experimental research, critical analysis of the results and revision of the text; N. P. Mishurov – revision of the text; S. A. Davydova – literary and patent analysis, theoretical studies.

Acknowledgements: The authors thank R. V. Sharipov, the Associate Professor of the Volgograd State Agrarian University, for preparation of the experimental broom corn combine harvester for studies and optimization of the tools.

All authors have 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 публикует материалы 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 publishes articles on 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 11.12.2019 г. Дата выхода в свет 31.12.2019 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 14,95.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 150 экз. Заказ № 2416. 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 11.12.2019. Date of publishing 31.12.2019.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 14,95.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 150 copies. Order no. 2416. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)