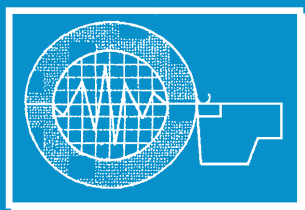


ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия
Прогрессивные технологии
в машиностроении

16+

№ 8 (315)
2026

Главный редактор научного журнала
«Известия Волгоградского государственного технического университета»
академик РАН, профессор, доктор химических наук
И. А. НОВАКОВ

Редакционная коллегия:

- Брискин Е. С.** – д-р физ.-мат. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград
- Буренин А. А.** – чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре
- Витязь П. А.** – академик Национальной академии наук Беларуси (НАНБ), Институт порошковой металлургии, г. Минск, Республика Беларусь
- Голованчиков А. Б.** – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград
- Заякин О. В.** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, Институт металлургии им. Н. А. Ватолина УрО РАН, г. Екатеринбург
- Злотин С. Г.** – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН, г. Москва
- Иванов В. К.** – академик РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, г. Москва
- Ингеманссон А. Р.** – д-р техн. наук, АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград
- Калита В. И.** – д-р техн. наук, профессор, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, г. Москва
- Коберник Н. В.** – д-р техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва
- Колмаков А. Г.** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, г. Москва
- Королев А. В.** – д-р техн. наук, профессор, Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов
- Красиков А. В.** – д-р техн. наук, АО «Волжский трубный завод», г. Волжский Волгоградская обл.
- Кудряков О. В.** – д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
- Кузьмин С. В.** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград
- Кураев А. А.** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь
- Левашов Е. А.** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор НИТУ «МИСиС», г. Москва
- Лысак В. И.** – академик РАН, д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград
- Макаров А. В.** – академик РАН, Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
- Максимов А. Л.** – академик РАН, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, г. Москва
- Малолетов А. В.** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Университет Иннополис, г. Иннополис, Республика Татарстан
- Навроцкий А. В.** – чл.-корр. РАН, д.х.н., профессор ВолгГТУ, г. Волгоград
- Пай В. В.** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск
- Первухин Л. Б.** – д-р техн. наук, ООО «Битруб Интернэшнл», г. Красноармейск, Московская обл.
- Пустовойт В. Н.** – д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
- Пышминцев И. Ю.** – д-р техн. наук, доцент, Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск
- Русинов В. Л.** – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор УрФУ, г. Екатеринбург
- Трифонов А. А.** – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, г. Москва
- Шолохов М. А.** – д-р техн. наук, профессор, Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
- Шурыгин В. А.** – академик РАН, д-р техн. наук, генеральный конструктор АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград

Серия
«ПРОГРЕССИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Чигиринский Ю. Л., д.т.н., проф.
ВолгГТУ

Носенко В. А., д.т.н., проф. ВПИ
(филиал) ВолгГТУ (зам. науч. редак-
тора) (г. Волжский)

Ардашев Д. В., д.т.н., доцент ЮУрГУ
(НИУ) (г. Челябинск)

Багайсков Ю. С., д.т.н., проф. ВПИ
(филиал) ВолгГТУ, (г. Волжский)

Бочкарев П. Ю., д.т.н., проф. КТИ
(филиал) ВолгГТУ, (г. Камышин)

Братан С. М., д.т.н., проф. СевНТУ
(г. Севастополь)

Зубарев Ю. М., д.т.н., проф., ГУМРФ
им.адмирала С.О. Макарова
(г. Санкт-Петербург)

Ингеманссон А. Р., д.т.н., зам. ген.
директора – технический директор
АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады»
(г. Волгоград)

Крюков С. А., д.т.н., доцент ВПИ
(филиал) ВолгГТУ (г. Волжский)

Сидякин Ю. И., д.т.н., проф. ВолгГТУ

Тамаркин М. А., д.т.н., проф. ДГТУ
(г. Ростов-на-Дону)

Ответственный секретарь
Макарова О. А., к.т.н., доц.
Тел. 8-937-723-33-93

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
«Пресса России» – 80811
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/](https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Тел. издательства ВолгГТУ:
8-(8442) 24-84-05
8-(8442) 24-84-08
zavrio@vstu.ru

Научный журнал
Издается с января 2004 г.
Выходит двенадцать раз в год

№ 8 (315) Сентябрь 2026

УЧРЕДИТЕЛЬ:

ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Адрес редакции:

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: ianovakov@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

**Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,
на отдельные статьи – сохраняется за автором**

*Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического
университета» категорически запрещена без оформления договора
в соответствии с действующим законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского
государственного технического университета» обязательна*

Editor-in-Chief of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Dr. Sci. (Chemistry), VSTU

Editorial board:

Briskin E. S. – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., VSTU, Volgograd

Burinin A. A. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math), Institute of Machine Science and Metallurgy, Far Eastern Branch of the RAS, Komsomolsk-on-Amur

Vityaz P. A. – Academician of the NAS of Belarus, State Scientific Institution "Powder Metallurgy Institute", Minsk, Republic of Belarus

Golovanchikov A. B. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

Zayakin O. V. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

Zlotin S. G. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the RAS, Moscow

Ivanov V. K. – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), N. S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow

Ingemansson A. R. – Dr. Sci. (Engineering), JSC "FSC "Titan-Barrikady", Volgograd

Kalita V. I. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow

Kobernik N. V. – Dr. Sci. (Engineering), Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Kolmakov A. G. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow

Korolev A. V. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Saratov State Technical University Ju. A. Gagarin, Saratov

Krasikov A. V. – Dr. Sci. (Engineering), Volzhsky Pipe Plant JSC, Volzhsky, Volgograd Region

Kudryakov O. V. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Don State Technical University, Rostov-on-Don

Kuzmin S. V. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

Kuraev A. A. – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Levashov E. A. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., NUST MISiS, Moscow

Lysak V. I. – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

Makarov A. V. – Academician of the RAS, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

Maksimov A. L. – Academician of the RAS, A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS, Moscow

Maloletov A. V. – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Innopolis University, Innopolis, Republic of Tatarstan

Navrotsky A. V. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), Prof., VSTU, Volgograd

Pai V. V. – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk

Pervukhin L. B. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., "Bitrub International" LLC, Krasnoarmeysk, Moscow Region

Pustovoit V. N. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Don State Technical University, Rostov-on-Don

Pyshmintsev I. Yu. – Dr. Sci. (Engineering), Ass. Prof., Russian Scientific Research Institute of the Tube and Pipe Industries, Chelyabinsk

Rusinov V. L. – Corresponding Member of the RAS, Ph. Dr. Sci. (Chemistry), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg

Trifonov A. A. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), Prof., A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the RAS, Moscow

Sholokhov M. A. – Dr. Sci. (Engineering), Prof. M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

Shurygin V. A. – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), JSC "FSC "Titan-Barrikady", Volgograd

SERIES
“ADVANCED
TECHNOLOGY IN
MACHINE BUILDING”

IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY

The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees

Editorial board:

Chairman

Tchigirinsky Ju.L., D. Sc.
(Engineering), Prof.

Nosenko V. A., D. Sc. (Engineering),
VPI (branch) VSTU (Deputy Scientific
Editor)

Ardashev D. V., D. Sc. (Engineering),
SUSU (National Research University)
Bagaiskov Yu. S., D. Sc. (Engineering),
VPI (branch) VSTU

Bochkarev P. Yu., D. Sc. (Engineering),
KTI (branch) VSTU

Bratan S. M., D. Sc. (Engineering),
(SEVSU, Sevastopol)

Zubarev Yu. M., D. Sc. (Engineering),
Admiral Makarov State University
Ingemansson A. R., D. Sc. (Engineering),
FRPC «Titan-Barricades» JSC

Kryukov S. A., D. Sc. (Engineering),
VPI (branch) VSTU

Sidyakin Yu. I., D. Sc. (Engineering),
VSTU

Tamarkin M. A., D. Sc. (Engineering),
DSTU

Executive secretary

Makarova O.A., Cand. Sc
Tel. 8-937-723-33-93

International index of the journal
ISSN 1990-5297.

The journal is distributed by sub-
scription.
Index of the magazine according to
the united catalog
“Press of Russia” – 80811.
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Tel. Of VSTU editorial office:

8-(8442) 24-84-05
8-(8442) 24-84-08
zavrio@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 8 (315) September 2026

FOUNDER:

**FSBEI of Higher Professional Education
“Volgograd State Technical University”**

Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

Tel.: Head Editor – (+7 8442) 24-80-00

E-mail: ianovakov@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication,
IT and Mass Communications (Roscomnadzor)

Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of
Volgograd State Technical University

***The copyright for the journal in general belongs to the Founder,
for separate articles – to authors.***

*Reprint from the journal “Izvestia VSTU” is strongly forbidden without conclusion of an
agreement in accordance with the legislation of the RF
When reprinting the materials, the citation to the journal “Izvestia VSTU” is obligatory*

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Авраменко В. В. 48
Алехин А. Г. 39
Банников А. И. 9
Барабанов В. Г. 43, 59
Бердников О. О. 16
Бондарев А. А. 13
Воротников К. М. 72
Габриэлян К. С. 29
Голованчиков А. Б. 76
Гордейчик Ю. Ю. 43
Данилина Е. С. 90
Добрынин М. А. 22, 25
Драпак К. А. 48, 86
Залипаева О. А. 81
Златкевич А. В. 9
Иванова В. В. 52
Ингеманссон А. Р. 13
Капалин Н. Ю. 16
Кожевникова А. А. 22, 25
Козловцева Н. В. 90
Кормилицин С. И. 33, 36
Косова Е. А. 55
Крайнев Д. В. 29
Кулишова А. А. 55
Кухтик М. П. 52, 86
Ларин А. А. 59
Лукин М. О. 64, 68
Макаров А. М. 64
Макарова О. А. 9
Машковская А. А. 72
Машковский И. А. 72
Мевша Н. А. 76, 81
Полунин В. В. 25
Поступаева С. Г. 55
Прохоренко Н. А. 76, 81
Реченко Д. С. 16
Ростовцева М. В. 29
Салех Ф. К. 86
Семибратова М. В. 68
Сергеев А. С. 68
Солодков В. А. 33, 36
Стручков С. А. 9
Тихонова Ж. С. 29
Федорова К. Р. 22, 25
Хамраев А. Ю. 90
Харламов А. Д. 22
Шемелюнас С. С. 72

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Банников А. И., Макарова О. А., Златкевич А. В., Стручков С. А.</i> Модернизация системы охлаждения установки закалки пил горячего резания.....	9
<i>Бондарев А. А., Ингеманссон А. Р.</i> Анализ факторов, определяющих нестабильность стойкости инструмента при обработке трубных заготовок на станках с ЧПУ.....	13
<i>Капалин Н. Ю., Бердников О. О., Реченко Д. С.</i> Влияние скорости и мощности лазерной резки на качество обработки титанового сплава ОТ4-1.....	16
<i>Кожевникова А. А., Федорова К. Р., Добрынин М. А., Харламов А. Д.</i> Автоматизированная система для уборки лубяных культур с помощью зерноуборочных комбайнов.....	22
<i>Кожевникова А. А., Федорова К. Р., Добрынин М. А., Полунин В. В.</i> Универсальная жатка для уборки лубяных культур, агрегатируемая с трактором.....	25
<i>Ростовцева М. В., Габриэлян К. С., Тихонова Ж. С., Крайнев Д. В.</i> Повышение качества пьезокерамических изделий за счет модернизации системы метрологического контроля.....	29
<i>Кормилицин С. И., Солодков В. А.</i> Влияние зернистости твердосплавных основ на работоспособность инструментов с покрытиями.....	33
<i>Кормилицин С. И., Солодков В. А.</i> Работоспособность инструментов с покрытиями при точении труднообрабатываемых материалов.....	36

Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<i>Алехин А. Г.</i> Метод наименьших квадратов в задаче нормирования трудоемкости сборки шкафов низковольтных комплектных устройств.....	39
<i>Гордейчик Ю. Ю., Барабанов В. Г.</i> Разработка системы управления насосной станцией на базе ПЛК ОВЕН 210 и HMI интерфейса Weintek.....	43
<i>Драпак К. А., Авраменко В. В.</i> Метод проектирования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления на основе анализа программного кода.....	48
<i>Иванова В. В., Кухтик М. П.</i> Разработка и исследование работы программы построения маршрута для автоматизированной системы управления роботом-грузчиком в складском помещении.....	52
<i>Кулишова А. А., Поступаева С. Г., Косова Е. А.</i> Модернизация системы управления газовой камерной печью с переводом горелок на импульсный режим.....	55
<i>Ларин А. А., Барабанов В. Г.</i> Разработка системы управления приточно-вытяжной вентиляцией на базе ПЛК ОВЕН 210 и HMI панели Weintek.....	59
<i>Лукин М. О., Макаров А. М.</i> Синтез процедуры выбора на основе функционально-ролевой классификации методов.....	64

<i>Лукин М. О., Семибратова М. В., Сергеев А. С.</i> Исследование и классификация методов выбора датчиков для систем вибродиагностики.....	68
<i>Машковский И. А., Машковская А. А., Воротников К. М., Шемелюнас С. С.</i> Построение и расчет кинематической схемы двухзвенной конечности для создания цифрового двойника мобильного шагающего робота.....	72
<i>Прохоренко Н. А., Голованчиков А. Б., Мевша Н. А.</i> Разработка и расчет автоматизированной конструкции бисерной мельницы....	76
<i>Прохоренко Н. А., Залипаева О. А., Мевша Н. А.</i> Разработка и расчет автоматизированной конструкции пневматической сушилки.....	81
<i>Салех Ф. К., Драпак К. А., Кухтик М. П.</i> Влияние параметров непрерывного армирования углеродным волокном на прочность при изгибе зубьев зубчатых колес из полиамидного композита.....	86
<i>Хамраев А. Ю., Данилина Е. С., Козловцева Н. В.</i> Разработка системы управления установкой очистки производственно-дождевых сточных вод.....	90
К сведению авторов.....	95

CONTENTS

Part 1. TECHNOLOGY OF MECHANICAL ENGINEERING

<i>Bannikov A. I., Makarova O. A., Zlatkevich A. V., Struchkov S. A.</i> Modernization of the cooling system of the hot-cutting saw quenching unit.....	9
<i>Bondarev A. A., Ingemansson A. R.</i> Analysis of factors causing instability of tool life when machining pipe blanks on CNC machines.....	13
<i>Kapalin N. Yu., Berdnikov O. O., Rechenko D. S.</i> The effect of laser cutting speed and power on the processing quality of titanium alloy OT4-1.....	16
<i>Kozhevnikova A. A., Fedorova K. R., Dobrynin M. A., Kharlamov A. D.</i> Automated system for harvesting bast crops using combine harvesters.....	22
<i>Kozhevnikova A. A., Fedorova K. R., Dobrynin M. A., Polunin V. V.</i> Universal harvester for harvesting bast crops, aggregated with a tractor.....	25
<i>Rostovtseva M. V., Gabrielyan K. S., Tikhonova Zh. S., Kraynev D. V.</i> Improving the quality of piezoceramic products by modernizing the metrological control system.....	29
<i>Kormilitsyn S. I., Solodkov V. A.</i> The effect of the grain size of carbide bases on the performance of coated tools.....	33
<i>Kormilitsyn S. I., Solodkov V. A.</i> Operability of coated tools when turning hard-to-process materials.....	36

Part 2. AUTOMATION OF PRODUCTION PROCESSES

<i>Alekhin A. G.</i> The least squares method in the problem of labour intensity standardisation for the assembly of low-voltage switchgear cabinets.....	39
<i>Gordeychik Yu. Yu., Barabanov V. G.</i> Development of a pump station control system based on the Owen 210 PLC and the Weintek HMI interface.....	43
<i>Drapak K. A., Avramenko V. V.</i> A method for designing algorithmic software for automated control systems based on program code analysis.....	48
<i>Ivanova V. V., Kukhtik M. P.</i> Development and research of the operation of a route planning program for an automated control system for a robot-loader in a warehouse.....	52
<i>Kulishova A. A., Postupaeva S. G., Kosova E. A.</i> Modernization of the control system of a gas-fired chamber furnace by converting burners to pulse operation mode.....	55
<i>Larin A. A., Barabanov V. G.</i> Development of a control system for supply and exhaust ventilation based on Owen 210 PLC and Weintek HMI panel.....	59
<i>Lukin M. O., Makarov A. M.</i> Synthesis of a selection procedure based on a functional-role classification of methods.....	64
<i>Lukin M. O., Semibratova M. V., Sergeev A. S.</i> Investigation and classification of methods for selecting sensors for vibration diagnostics systems.....	68

<i>Mashkovsky I. A., Mashkovskaya A. A., Vorotnikov K. M., Shemelyunas S. S.</i> Construction and calculation of the kinematic scheme of a two-link limb to create a digital twin of a mobile walking robot.....	72
<i>Prokhorenko N. A., Golovanchikov A. B., Mevsha N. A.</i> Development and calculation of an automated design of a bead mill.....	76
<i>Prokhorenko N. A., Zalipaeva O. A., Mevsha N. A.</i> Development and calculation of an automated design of a pneumatic dryer.....	81
<i>Salekh F. K., Drapak K. A., Kukhtik M. P.</i> Effect of continuous carbon fiber reinforcement parameters on flexural strength of teeth of polyamide composite gears.....	86
<i>Khamraev A. Yu., Danilina E. S., Kozlovtsava N. V.</i> Development of a control system for an industrial-rainwater treatment unit.....	90

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.774.352: 621.93.024.74
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-9-12

Научная статья
Original article

А. И. Банников¹, О. А. Макарова¹, А. В. Златкевич¹, С. А. Стручков²

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ УСТАНОВКИ ЗАКАЛКИ ПИЛ ГОРЯЧЕГО РЕЗАНИЯ

¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² АО «Корпорация Красный Октябрь», Волгоград, Россия

✉ Александр Владимирович Златкевич, rabota.rab2510@gmail.com

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования влияния давления подачи СОЖ на процесс закалки зубьев пильных дисков. Проведены экспериментальные исследования влияния давления подачи закалочной жидкости на процесс закалки зубьев пильных дисков. Выбран новый состав закалочной жидкости. Проведенные мероприятия позволили получить необходимую одинаковую твердость зубьев пильного диска в пределах 42–45 HRC.

Ключевые слова: пильный диск, структура материала, температура закалки, отпуск, закалочная жидкость

Для цитирования: Банников А. И., Макарова О. А., Златкевич А. В., Стручков С. А. Модернизация системы охлаждения установки закалки пил горячего резания. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 9–12. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-9-12.

Информация об авторах:

Александр Иванович Банников – профессор, д-р техн. наук, кафедра ТМС ВолгГТУ
orcid.org/0000-0003-4655-3981
e-mail: Alc19@mail.ru

Ольга Александровна Макарова – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС ВолгГТУ
orcid.org/0000-0003-2672-136x
e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

Александр Владимирович Златкевич – аспирант кафедры ТМС ВолгГТУ
e-mail: rabota.rab2510@gmail.com

Сергей Александрович Стручков – директор по качеству АО «Корпорация Красный Октябрь»
e-mail: s_struchkov@vmkko.ru

Вклад авторов:

А. И. Банников – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

О. А. Макарова – определение цели работы, написание текста статьи, участие в обсуждении результатов.

А. В. Златкевич – обработка и анализ результатов исследования.

С. А. Стручков – участие в обсуждении результатов.

A. I. Bannikov¹, O. A. Makarova¹, A. V. Zlatkevich¹, S. A. Struchkov²

MODERNIZATION OF THE COOLING SYSTEM OF THE HOT-CUTTING SAW QUENCHING UNIT

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

² JSC “Krasny Oktyabr”, Volgograd, Russia

✉ Alexandr V. Zlatkevich, rabota.rab2510@gmail.com

Abstract. Experimental studies of the effect of coolant supply pressure on the process of quenching teeth of saw blades have been conducted. Experimental studies of the effect of quenching liquid supply pressure on the quenching process of saw blade teeth have been carried out. A new composition of the quenching liquid has been selected. The measures carried out made it possible to obtain the necessary uniform hardness of the teeth of the saw blade in the range of 42–45 HRC.

Keywords: saw blade, material structure, quenching temperature, tempering, quenching liquid

For citation: Bannikov A. I., Makarova O. A., Zlatkevich A. V., Struchkov S. A. Modernization of the cooling system of the hot-cutting saw quenching unit. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 9–12. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-9-12.

Information about the authors:

Alexandr I. Bannikov – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU

orcid.org/0000-0003-4655-3981

e-mail: Alc19@mail.ru

Olga A. Makarova – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU

orcid.org/0000-0003-2672-136x

e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

Alexandr V. Zlatkevich – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU

e-mail: rabota.rab2510@gmail.com

Sergey A. Struchkov – Director of Quality, JSC “Krasny Oktyabr”

e-mail: s_struchkov@vmkko.ru

Contribution of the authors:

Alexandr I. Bannikov – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

Olga A. Makarova – determined the purpose of the work, writing an article, participated in the discussion of the results.

Alexandr V. Zlatkevich – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

Sergey A. Struchkov – participated in the discussion of the results.

Использование дисковых пил для разделения горячих и холодных заготовок на металлургических и трубопрокатных предприятиях обусловлено высокой производительностью процесса резания, простотой технологической операции, а также дешевизной режущего диска [1]. На заводе АО «Корпорация Красный Октябрь» пила роторная горячей резки РР 2500/2000 устанавливается в линии заготовочного стана и предназначена для резки проката из углеродистых и легированных сталей в горячем состоянии. Инструментом служит пыльный диск с зубьями Ø2500 мм из стали 50ХГФА.

Используемые пыльные диски Ø2500 мм из стали 50ХГФА требуют твердости поверхности зубьев 45–55 HRC для обеспечения необходимой стойкости при резке горячего проката.

Сталь 50ХГФА относится к рессорно-пружинным сталям (табл. 1 и 2) и содержит хром (Cr), ванадий (V) и марганец (Mn), что повышает ее прокаливаемость и устойчивость к отпуску. Необходимая твердость достигается термобработкой, типовой режим которой включает закалку и отпуск [2, 3].

Таблица 1

Характеристика материала 50ХГФА

Марка	50ХГФА
Классификация	Сталь конструкционная рессорно-пружинная
Применение	Пружины особо ответственного назначения, рессоры легковых автомобилей

Таблица 2

Химический состав материала 50ХГФА ГОСТ 4543–71, в %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	Cu
0.48–0.55	0.17–0.37	0.8–1	до 0.25	до 0.025	до 0.025	0.95–1.2	0.15–0.25	до 0.2

На первом этапе производится закалка ТВЧ для получения структуры мартенсита – твердой, но хрупкой фазы. Пыльный диск нагревают до температуры 830–860 °С. Важно обеспечить равномерный нагрев, чтобы избежать коробления тонкого диска. Охлаждение этой стали обычно производят в масле. Масло обеспечивает достаточно высокую скорость охлаждения для получения мартенсита, но при этом

снижает риск растрескивания по сравнению с водой.

Для дисков большого диаметра иногда применяют ступенчатое охлаждение (спрейерное) или охлаждение в специальных штампах для сохранения геометрии.

Второй этап представляет собой средний отпуск, производимый для снятия внутренних закалочных напряжений, повышения вязкости

и пластичности стали, при этом твердость снижается до требуемого уровня.

Пильный диск нагревают до температуры 450–500 °С. В результате нагрева мартенсит распадается, и формируется структура троостита отпуска (сорбита) – мелкодисперсной смеси феррита и цементита. Эта структура обеспечивает высокий предел упругости и вязкости [2, 3].

Определение состава новой закалочной жидкости и стабилизация давления ее подачи

При отработке технологического процесса закалки и отпуска пильных дисков было произведено исследование влияния подачи закалочной жидкости на твердость зубьев пилы после термообработки. Контроль твердости производился с помощью динамического твердомера ТКМ-359С (рис. 1).

В ходе исследования выявлена пульсация давления закалочной жидкости в пределах 0,1 МПа и понижение давления ниже необходимых 0,15 МПа. Расход охлаждающей жидкости должен быть не менее 2,25 м³/ч.

Пульсация давления приводит к неравномерной закалке зубьев, недостаточной твердости и соответственно большому износу пилы. зафиксировано изменение твердости на зубьях пилы в пределах 38–50 HRC, что является слишком большим разбросом.



Рис. 1. Процесс замера твердости зуба пильного диска

Для устранения проблемы потребовались замена подающего насоса и установление манометра, позволяющие контролировать давление в системе охлаждения пильного диска. На основе конструкторской документации и с привязкой к существующему оборудованию разработана новая система охлаждения со специальными форсунками, представленная на рис. 2, которая обеспечивает необходимую равномерную скорость подачи закалочной жидкости и исключает пульсацию давления.

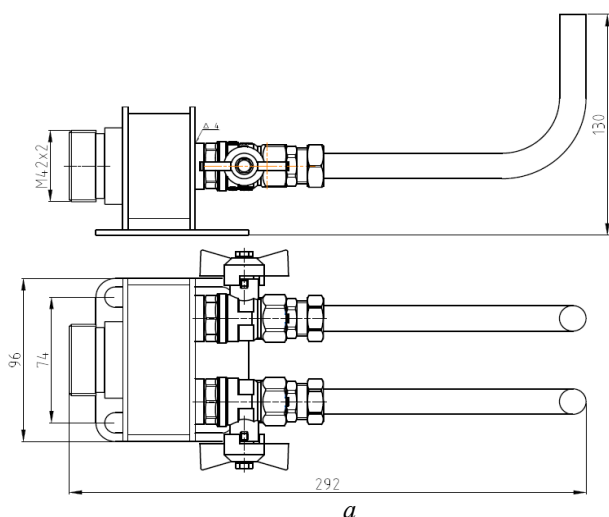


Рис. 2. Новая система охлаждения:
а – чертеж; б – исполнение

При отработке технологического процесса закалки и отпуска пильных дисков была произведена замена охлаждающей жидкости на основе минерального масла на охлаждающую жидкость на полимерной основе.

Известно, что закалка в масле имеет ряд негативных особенностей [4]. Для некоторых марок сталей наблюдается недостаточная интенсивность охлаждения. Закалочная жидкость на масляной основе при высоких температурах

может возгораться, что вызывает коксование на стенках системы охлаждения, а также выделение вредных веществ. Наблюдается большой расход масла вследствие хорошего смачивания поверхностей заготовок и испарения. Под воздействием высоких температур происходит изменение химического состава, что влияет на качество закалки. После закалки в масле возникает необходимость промывки заготовок с использованием моющих средств, а также дальнейшей регенерации смываемого масла.

Замена масла на полимерную закалочную жидкость позволяет точнее регулировать скорость охлаждения и исключить возгорание масла при высоких температурах нагрева. В качестве водо-полимерных сред применяются растворы на основе карбоксиметилцеллюлозы, полиакриламида, латекса и прочих органических полимеров.

Применение водо-полимерной среды имеет несколько положительных моментов [4]. Значительно снижается концентрация вредных составляющих, полностью исключается операция промывки после термообработки. Не требуется замена и очистка заготовок от продуктов разложения полимера. Добавление концентрата полимера или воды в значительном диапазоне регулирует скорость охлаждения.

В качестве полимерной среды исследовалось применение полиакриловой соли железа марки ПК-М.

Содержание химических компонентов в составе готовой эмульсии или раствора распределяется следующим образом:

85–97 % – вода;

2–10 % – полимеры – полиакриловая соль железа марки ПК-М;

0,5–1,5 % – эмульгаторы (ПАВ);

0,1–0,3 % – противозадирные присадки (ЕР);

0,2–0,5 % – ингибиторы коррозии (щелочи).

Основной объем эмульсии занимает вода. Полимеры обеспечивают смазывающие свойства или контроль теплоотвода. Эмульгаторы (ПАВ) удерживают смесь в однородном состоянии. В качестве противозадирных присадок (ЕР) для защиты режущей кромки используются соединения серы или фосфора.

В качестве ингибиторов коррозии применяют: кальцинированную соду (Na_2CO_3) и нитрит натрия (NaNO_2). Эти компоненты поддерживают необходимый уровень pH 9,5–10,5. В 2026 году большинство предприятий перешли на синтетические безнитритные составы,

которые более безопасны для оператора и не требуют ручного смешивания компонентов.

Проведенные мероприятия позволили получить необходимую одинаковую твердость зубьев пильного диска в пределах 42–45 HRC, что подтверждается замерами (см. рис. 1) с помощью динамического твердомера ТКМ-359С.

Выводы

Проведенные мероприятия позволили исключить пульсацию давления и обеспечить необходимую равномерную скорость подачи закалочной жидкости.

Минеральное масло заменено на современную полимерную охлаждающую жидкость марки ПК-М. Применение полимерной среды позволяет точнее регулировать скорость охлаждения.

Получена одинаковая твердость зубьев пильного диска в пределах 42–45 HRC, что позволяет обеспечить необходимую стойкость пильного диска.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Банников, А. И. Теоретические основы модернизации термофрикционных пил для резки горячего трубопровода : монография / А. И. Банников ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – 135 с.
2. Смирнов, М. А. Основы термической обработки стали / М. А. Смирнов, В. М. Счастливцев, Л. Г. Журавлев. – М. : Наука и технологии, 2002. – 519 с.
3. Головин, Г. Ф. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Г. Ф. Головин, Н. В. Зимин. – Л. : Машиностроение, 1979. – 11 с.
4. Исследования влияния параметров закалочной среды в процессе термообработки мелющих шаров из рельсовой стали на качество их микроструктуры и твердость / А. А. Уманский, А. С. Симачев, Л. В. Думова, С. О. Сафонов // Черные металлы. – 2023. – № 9. – С. 54–59. – DOI 10.17580/chm.2023.09.09. – EDN TIXLPU.

REFERENCES

1. Bannikov, A. I. Theoretical foundations of modernization of thermal friction saws for cutting hot rolled products: monograph / A. I. Bannikov ; VSTU. – Volgograd, 2014. – 135 p.
2. Smirnov, M. A. Fundamentals of heat treatment of steel / M. A. Smirnov, V. M. Shchastyantsev, L. G. Zhuravlev. – M. : Science and Technology, 2002. – 519 p.
3. Golovin, G. F. Technology of heat treatment of metals using induction heating / G. F. Golovin, N. V. Zimin – L. : Mashinostroenie, 1979. – 11 p.
4. Studies of the influence of quenching medium parameters in the process of heat treatment of grinding balls made of rail steel on the quality of their microstructure and hardness/ A. A. Umansky, A. S. Simachev, L. V. Dumova, S. O. Sazonov// Ferrous Metals. – 2023. – No. 9. – pp. 54-59. – DOI 10.17580/chm.2023.09.09. – EDN TIXLPU.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 621.9

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-13-16

Научная статья

Original article

*А. А. Бондарев¹, А. Р. Ингеманссон²***АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ
СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ
ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ**¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия² «Федеральный научно-производственный центр “Титан-Баррикады”», Волгоград, Россия

✉ Александр Александрович Бондарев, alexander_bondarev@mail.ru

Аннотация. В работе исследованы факторы неустойчивости стойкости режущего инструмента при токарной обработке конических поверхностей трубных заготовок на станках с ЧПУ. Установлено, что разброс стойкости обусловлен совместным влиянием вариации механических свойств обрабатываемого материала (предела текучести, временного сопротивления) и колебаний химического состава в нормативных пределах. На основе статистического анализа определены количественные зависимости между распределением свойств заготовок и коэффициентом вариации стойкости для различных групп прочности API.

Ключевые слова: стойкость инструмента, обточка конуса, группы прочности API, CVD-покрытие, коэффициент вариации, износ резца, адаптивное управление

Для цитирования: Бондарев А. А., Ингеманссон А. Р. Анализ факторов, определяющих неустойчивость стойкости инструмента при обработке трубных заготовок на станках с ЧПУ. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 13–16. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-13-16.

Информация об авторах:**Александр Александрович Бондарев** – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-0645-5634

e-mail: alexander_bondarev@mail.ru

Александр Рональдович Ингеманссон – заместитель генерального директора – технический директор д-р техн. наук, «Федеральный научно-производственный центр “Титан-Баррикады”»

orcid.org/0000-0002-7963-393X

e-mail: aleing@yandex.ru

Вклад авторов:**А. А. Бондарев** – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.**А. Р. Ингеманссон** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.*A. A. Bondarev¹, A. R. Ingemansson²***ANALYSIS OF FACTORS CAUSING INSTABILITY OF TOOL
LIFE WHEN MACHINING PIPE BLANKS ON CNC MACHINES**¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia² "Federal Scientific and Production Centre "Titan-Barrikady," , Volgograd, Russia

✉ Alexander A. Bondarev, alexander_bondarev@mail.ru

Abstract. The paper investigates the factors causing instability in cutting tool life during CNC turning of conical surfaces on oil and gas grade pipes. The scatter in tool life is shown to result from the combined influence of mechanical property variability (yield strength, tensile strength), chemical composition fluctuations within regulatory tolerances. Statistical analysis yielded quantitative relationships between workpiece property distribution and the tool life coefficient of variation for different API strength groups.

Keywords: tool life, taper turning, API strength groups, CVD coating, coefficient of variation, tool wear, adaptive control

For citation: Bondarev A. A., Ingemansson A. R. Analysis of factors causing instability of tool life when machining pipe blanks on CNC machines. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 13–16. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-13-16.

Information about the authors:**Alexander A. Bondarev** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU

orcid.org/0000-0002-0645-5634

e-mail: alexander_bondarev@mail.ru

Alexander R. Ingemansson – Deputy General Director – Technical Director Doctor of Technical Sciences, "Federal Scientific and Production Centre "Titan-Barrikady,"

orcid.org/0000-0002-7963-393X

e-mail: aleing@yandex.ru

Contribution of the authors:

Alexander A. Bondarev – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

Alexander R. Ingemansson – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

Введение

В нефтегазовом машиностроении надежность резьбовых соединений труб в значительной мере определяется качеством механической обработки, ключевой операцией которой является обточка конуса (конусность 1:16 по API 5B) [1]. Точность геометрии конуса, параметры шероховатости и состояние поверхностного слоя непосредственно влияют на формирование резьбового профиля и герметичность соединения.

При переходе к трубам высоких групп прочности (Q125 и выше) с пределом текучести до 1100–1200 МПа [1] и повышенным содержанием легирующих элементов возникает комплекс проблем: интенсивный абразивный и адгезионный износ, высокая тепловая нагрузка, склонность к вибрациям. В условиях серийного производства вариация свойств заготовок приводит к колебаниям стойкости инструмента в 2–3 раза, обуславливая внеплановые замены инструмента и рост брака.

В литературе достаточно изучены закономерности износа твердосплавного инструмента при точении высокопрочных сталей [2, 3], тепловые процессы в зоне резания [4–7] и роль CVD/PVD-покрытий [8–10]. Влияние технологической наследственности на обрабатываемость рассматривалось в работах [11, 12]. Вместе с тем совместное воздействие вариации механических свойств, колебаний химического состава в пределах стандартных допусков и динамических факторов на стабильность стойкости при контурной обработке труб остается недостаточно исследованным.

Цель работы – провести комплексный количественный анализ факторов нестабильности стойкости инструмента при обточке конуса труб высоких групп прочности.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на бесшовных горячедеформированных трубах диаметром 198–245 мм, толщиной стенки 8–15 мм, групп прочности по API [1]: N80 ($\sigma_{0,2} = 552\text{--}655$ МПа), Q125 ($\sigma_{0,2} = 862\text{--}1034$ МПа).

Обточка конуса выполнялась на токарном станке с ЧПУ «MAZAK» мод. «Slant Turn Nexus 500M» с закреплением в трехкулачковом пневматическом патроне. Режимы резания: скорость $V = 120\text{--}180$ м/мин (дифференцировано по группам прочности); подача $S_o = 0,8\text{--}1,5$ мм/об; глубина резания $t = 1,2\text{--}1,5$ мм (предварительная); $t = 0,5\text{--}1,0$ мм (чистовая); охлаждение – эмульсия 5–8 %.

Применялись сменные многогранные пластины (СМП) квадратной формы из вольфрам-мотитанокобальтового твердого сплава с многослойным CVD-покрытием, группы применения P20 и P25 (ISO 513). Геометрия инструмента: $\phi = 23^\circ$, $r = 1,0$ мм, $\gamma = 20^\circ$, $\alpha = 7^\circ$.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний образцов на растяжение по характеристикам временного сопротивления σ_b и предела текучести $\sigma_{0,2}$ (табл. 1) показывают, что разброс абсолютных значений составляет 10–15 %, при этом коэффициент вариации C_v не более 5 %, что позволяет сделать вывод о статистической однородности партий. Однако этот разброс может оказывать влияние на процесс резания. Согласно классическим зависимостям теории резания [5–7], с увеличением абсолютных значений предела текучести обрабатываемого материала возрастает его сопротивление пластической деформации и процессу снятия стружки, что ведет к росту главной составляющей силы резания P_z , температуры в зоне резания и, как следствие, интенсификации диффузионного и механического износа.

Таблица 1

Коэффициенты вариации механических свойств обрабатываемых материалов

Группа прочности	Разброс $\sigma_{0,2}$, МПа (диапазон)	$C_v(\sigma_{0,2})$, %	Разброс σ_b , МПа (диапазон)	$C_v(\sigma_b)$, %
N80	552–655 (103)	3,2	655–758 (103)	3,0
Q125	862–1034 (172)	4,8	931–1034 (103)	4,2

В пределах исследуемых групп прочности фактическая стойкость инструмента имеет об-

ратную зависимость с величиной предела текучести $\sigma_{0,2}$ и временного сопротивления σ_b (табл. 2).

Это может говорить о том, что механические свойства остаются значимым фактором нестабильности для механообрабатывающего производства, несмотря на достаточную однородность для процессов изготовления трубных заготовок.

Содержание легирующих элементов в допустимых пределах API 5CT [1] изменяется в широком диапазоне, особенно для высокопрочных групп. Совместное действие этих фак-

торов может усиливать чувствительность процесса к колебаниям химического состава, являясь дополнительным источником разброса фактической стойкости.

На основе экспериментальных данных для каждой группы прочности были определены параметры стойкости одной режущей грани (количество обработанных конусов, шт.) и коэффициент вариации C_v (табл. 2).

Таблица 2

Средняя стойкость и коэффициент вариации для пластин P20 и P25

Группа прочности	Пластина P20		Пластина P25	
	Стойкость, шт.	C_v , %	Стойкость, шт.	C_v , %
N80	132	12,3	145	11,9
Q125	52	31,0	64	25,2

Для группы N80 коэффициент вариации составляет 12 %, что соответствует стандартной технологической стабильности. Для группы Q125 C_v достигает 25–31 %, превышая допустимый уровень в 2 раза. Визуальный анализ пластин подтверждает различие механизмов

износа: при обработке сталей N80 наблюдается равномерный износ по задней поверхности (рис. 1); при обработке сталей Q125 фиксируются множественные сколы режущей кромки, выкрашивание покрытия и хрупкое разрушение режущего клина в точке контакта (рис. 2).



Рис. 1. Фотография износа пластины при обработке стали группы N80



Рис. 2. Фотография износа пластины при обработке стали группы Q125

Причинами такого характера разрушения может быть сочетание высокой прочности обрабатываемого материала, наличие твердых карбидных включений (Cr, Mo, V) и динамическая нестабильность технологической системы вследствие овальности и разностенности труб.

Выводы

1. Подтверждается актуальность проблемы обеспечения технологической стабильности операции внешней обточки конуса под резьбу в процессе обработки трубных заготовок на станках с ЧПУ.

2. Определены факторы, которые могут оказывать преобладающее влияние на нестабильность стойкости режущего инструмента: разброс механических характеристик трубных

заготовок, отклонения химического состава, которые укладываются в допустимые пределы для металлургического производства, но оказывают существенное влияние на механическую обработку.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. API Specification 5CT. Specification for Casing and Tubing. 11th ed. – Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2023. – 262 p.
2. ISO 3685:1993. Tool-life testing with single-point turning tools. – Geneva: ISO, 1993. – 48 p.
3. Stahl, J.-E. Metal Cutting – Theories and models. Lund University, 2012. – 580 p.
4. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
5. Зорев, Н. Н. Развитие науки о резании материалов / Н. Н. Зорев. – М. : Машиностроение, 1967. – 416 с.

6. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
7. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высшая школа, 1985. – 352 с.
8. Vereshaka, A., Grigoriev S. et al. Investigation of wear dynamics for cutting tools with multilayer composite nanostructured coatings in turning constructional steel // *Wear*. – 2019. – Vol. 420–421. – P. 17–37.
9. Bouzakis, K.-D., Michailidis N., Skordaris G. et al. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization // *CIRP Annals*. – 2012. – Vol. 61, No. 2. – P. 703–723.
10. Klocke, F., Krieg T. Coated tools for metal cutting – features and applications // *CIRP Annals*. – 1999. – Vol. 48, No. 2. – P. 515–525.
11. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 2002. – 684 с.
12. Дальский, А. М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев и др. – М. : Изд-во МАИ, 2000. – 360 с.
2. ISO 3685:1993. Tool-life testing with single-point turning tools. – Geneva : ISO, 1993. – 48 p.
3. Stahl J.-E. Metal Cutting – Theories and models. Lund University, 2012. – 580 p.
4. Reznikov, A. N. Thermophysics of Mechanical Material Processing. – Moscow : Mashinostroenie, 1981. – 279 p.
5. Zorev, N. N. Development of the Science of Material Cutting. – Moscow : Mashinostroenie, 1967. – 416 p.
6. Bobrov, V. F. Fundamentals of the Theory of Metal Cutting. – Moscow : Mashinostroenie, 1975. – 344 p.
7. Granovsky, G. I., Granovsky V.G. Metal Cutting. – Moscow : Vysshaya Shkola, 1985. – 352 p.
8. Vereshaka, A., Grigoriev S., et al. Investigation of wear dynamics for cutting tools with multilayer composite nanostructured coatings in turning constructional steel // *Wear*. – 2019. – Vol. 420–421. – P. 17–37.
9. Bouzakis, K.-D., Michailidis N., Skordaris G., et al. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization // *CIRP Annals*. – 2012. – Vol. 61, No. 2. – P. 703–723.
10. Klocke, F., Krieg T. Coated tools for metal cutting – features and applications // *CIRP Annals*. – 1999. – Vol. 48, No. 2. – P. 515–525.
11. Suslov, A.G., Dal'sky A.M. Scientific Foundations of Mechanical Engineering Technology. – Moscow : Mashinostroenie, 2002. – 684 p.
12. Dal'sky, A.M., Bazrov B.M., Vasiliev A.S., et al. Technological Heredity in Mechanical Engineering Production. – Moscow : MAI, 2000. – 360 p.

REFERENCES

1. API Specification 5CT. Specification for Casing and Tubing. 11th ed. – Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2023. – 262 p.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026
The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 621.791.94, 621.373.8
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-16-21

Научная статья
Original article

Н. Ю. Капалин, О. О. Бердников, Д. С. Реченко

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ И МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4-1

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Россия

✉ Николай Юрьевич Капалин, kapanick@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния основных параметров лазерной резки – мощности резки (излучения) и скорости обработки – на качество реза титанового сплава ОТ4-1 толщиной 1 мм. В работе исследуются измененный слой (ИС) и шероховатость обработанной поверхности, которые являются ключевыми показателями качества при обработке материалов, применяемых в авиастроении.

Экспериментальные исследования выполнены на установке Lasertec 20 с использованием азота в качестве вспомогательного газа при давлении 7 бар. Проведены две серии экспериментов: первая – с варьированием мощности резки при постоянной скорости перемещения лазерной головки, вторая – с варьированием скорости при фиксированной мощности.

Установлено, что изменение мощности резки оказывает нелинейное влияние на толщину измененного слоя: при средних значениях мощности наблюдается минимизация термического влияния (ИС), тогда как при высоких значениях происходит ее рост вследствие перегрева материала. Аналогично увеличение скорости резки способствует снижению теплового воздействия и уменьшению толщины ИС, однако чрезмерное увеличение скорости приводит к ухудшению качества реза и росту шероховатости обработанной поверхности.

В результате анализа экспериментальных данных определены рациональные технологические параметры, обеспечивающие минимальную шероховатость обработанной поверхности и стабильный процесс резания. Полученные результаты могут использоваться при разработке и оптимизации технологических процессов лазерной обработки титановых сплавов в высокотехнологичных отраслях промышленности.

Ключевые слова: лазерная резка, титановый сплав ОТ4-1, мощность лазера, скорость резки, измененный слой, шероховатость поверхности

Для цитирования: Капалин Н. Ю., Бердников О. О., Реченко Д. С. Влияние скорости и мощности лазерной резки на качество обработки титанового сплава OT4-1. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 16–21. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-16-21.

Информация об авторах:

Николай Юрьевич Капалин – аспирант, Омский государственный технический университет (ОмГТУ)
orcid.org/0009-0001-5985-9296

e-mail: kapanick@mail.ru

Олег Олегович Бердников – аспирант, Омский государственный технический университет (ОмГТУ)
orcid.org/0009-0008-0201-2116

e-mail: oleg-berdnikow@mail.ru

Денис Сергеевич Реченко – д-р техн. наук, доцент профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Омский государственный технический университет (ОмГТУ)

orcid.org/0000-0002-6776-6452

e-mail: rechenko-denis@mail.ru

Вклад авторов:

Н. Ю. Капалин – постановка цели и задач исследования, проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных данных, подготовка текста статьи.

О. О. Бердников – научное консультирование, анализ результатов исследования, участие в формировании выводов и редактировании статьи.

Д. С. Реченко – участие в проведении экспериментов, обработка экспериментальных данных, подготовка графического и табличного материала.

N. Yu. Kapalin, O. O. Berdnikov, D. S. Rechenko

**THE EFFECT OF LASER CUTTING SPEED AND POWER
ON THE PROCESSING QUALITY OF TITANIUM ALLOY OT4-1**

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, Russia

✉ Nikolay Yu. Kapalin, kapanick@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the effect of the main parameters of laser cutting – cutting power (radiation) and processing speed – on the cutting quality of titanium alloy OT4-1 with a thickness of 1 mm. The paper examines the modified layer (IP) and the roughness of the treated surface, which are key quality indicators in the processing of materials used in the aircraft industry.

Experimental studies were performed on a Lasertec 20 installation using nitrogen as an auxiliary gas at a pressure of 7 bar. Two series of experiments were carried out: the first was with varying the cutting power at a constant speed of movement of the laser head, and the second was with varying the speed at a fixed power.

It has been found that a change in cutting power has a nonlinear effect on the thickness of the modified layer: at average power values, thermal effects (IC) are minimized, whereas at high values, it increases due to overheating of the material. Similarly, increasing the cutting speed helps to reduce heat exposure and reduce the thickness of the IC, but an excessive increase in speed leads to a deterioration in cutting quality and an increase in the roughness of the treated surface.

As a result of the analysis of experimental data, rational technological parameters have been determined that ensure minimal roughness of the treated surface and a stable cutting process. The results obtained can be used in the development and optimization of technological processes for laser processing of titanium alloys in high-tech industries.

Keywords: laser cutting, titanium alloy OT4-1, laser power, cutting speed, modified layer, surface roughness

For citation: Kapalin N. Yu., Berdnikov O. O., Rechenko D. S. The effect of laser cutting speed and power on the processing quality of titanium alloy OT4-1. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 16–21. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-16-21.

Information about the authors:

Nikolay Yu. Kapalin – postgraduate student, Omsk State Technical University (OmSTU)
orcid.org/0009-0001-5985-9296

e-mail: kapanick@mail.ru

Oleg O. Berdnikov – postgraduate student, Omsk State Technical University (OmSTU)
orcid.org/0009-0008-0201-2116

e-mail: oleg-berdnikow@mail.ru

Denis S. Rechenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department. "Metal Cutting machines and Tools", Omsk State Technical University (OmSTU)

orcid.org/0000-0002-6776-6452

e-mail: rechenko-denis@mail.ru

Contribution of the authors:

Nikolay Yu. Kapalin – setting the goals and objectives of the study, conducting experimental research, processing and analyzing the data obtained, and preparing the text of the article.

Oleg O. Berdnikov – scientific consulting, analysis of research results, participation in the formation of conclusions and editing of the article.

Denis S. Rechenko – participation in conducting experiments, processing experimental data, preparation of graphic and tabular material.

Введение

Современное авиастроение предъявляет повышенные требования к качеству обработки конструкционных материалов, среди которых особое место занимают титановые сплавы. Сплав ОТ4-1 широко используется благодаря высокой прочности, жаростойкости и коррозионной стойкости при относительно малой плотности. Однако данные преимущества сопровождаются существенными технологическими трудностями при механической обработке, что относит данный материал к категории труднообрабатываемых [1–3].

В этой связи лазерная резка является одним из наиболее перспективных методов обработки титановых сплавов, который обеспечивает высокую точность, минимальную деформацию заготовки и возможность автоматизации процесса. Тем не менее качество лазерной резки в значительной степени определяется режимами обработки, среди которых ключевыми являются мощность резки (лазерного излучения) и скорость перемещения лазерной головки.

При лазерной резке происходит локальное плавление и частичное испарение материала, сопровождаемое интенсивным тепловым воздействием. Это приводит к формированию измененного слоя, который может ухудшать эксплуатационные характеристики изделия. Кроме

того, важным параметром является шероховатость поверхности реза, влияющая на усталостную прочность и необходимость последующей обработки [4–6].

Несмотря на значительное количество исследований в данной области, вопрос выбора рациональных режимов обработки для конкретных материалов и толщин остается актуальным. В частности, недостаточно изучено совместное влияние мощности и скорости на формирование качества реза при обработке тонколистовых титановых сплавов [7, 8].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния мощности и скорости перемещения лазерной головки на параметры качества обработки (толщину ИС и шероховатость) для сплава ОТ4-1 толщиной 1 мм, а также определение рациональных технологических режимов обработки. Результаты лазерной резки при эксперименте 1 приведены в табл. 1.

Анализ результатов показывает, что при увеличении мощности наблюдается сложная нелинейная зависимость толщины ИС: минимальные значения (5...29 мкм) достигаются при мощности 1100–1200 Вт; при мощности выше 1300 Вт происходит увеличение максимальной толщины слоя (до 58 мкм); разброс значений возрастает, что указывает на нестабильность процесса.

Таблица 1

Результаты 1-го эксперимента (влияние мощности)

№ образца	Мощность P , Вт	Скорость V , мм/мин	ИС h , мкм	Среднее значение ИС h , мкм	Шероховатость R_a , мкм	Среднее значение R_a , мкм
1	1000	500	9...33	21	6,161...4,739	5,450
2	1100	500	7..29	18	6,344...3,702	4,023
3	1200	500	5..49	27	4,276...2,633	3,454
4	1300	500	8..58	33	5,004...5,297	5,150
5	1400	500	20...35	27,5	2,683...6,838	4,760
6	1500	500	11...47	29	3,746...4,758	4,252

На рисунке 1 представлены зависимости влияния мощности лазерной резки на толщину ИС.

Шероховатость обработанной поверхности также демонстрирует зависимость от мощности: лучшие показатели (2,6...3,7 мкм) достигаются при 1200 Вт; при 1000 Вт наблюдается недостаточная энергия для стабильного реза; при 1400–1500 Вт проявляются признаки перегрева и оплавления кромки.

На рисунке 2 представлены зависимости влияния мощности лазерной резки на шероховатость обработанной поверхности.

Рациональная мощность обеспечивает баланс между достаточным плавлением материала и минимальным тепловым воздействием. Избыточная мощность приводит к увеличению ИС.

Результаты лазерной резки при эксперименте 2 приведены в табл. 2.

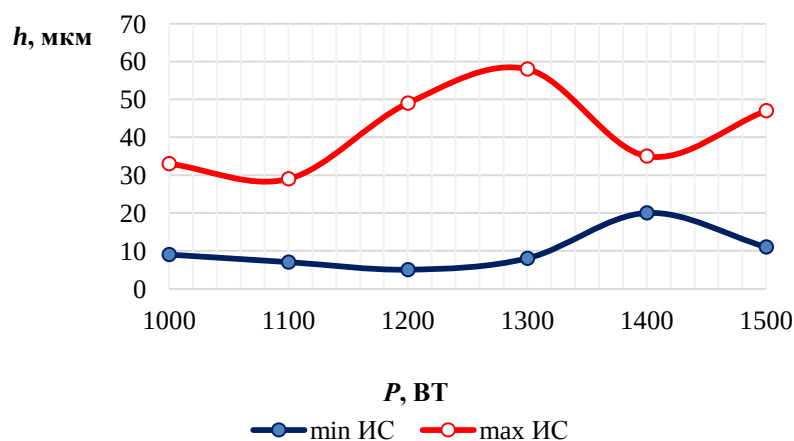


Рис. 1. График сравнения ИС от мощности резки

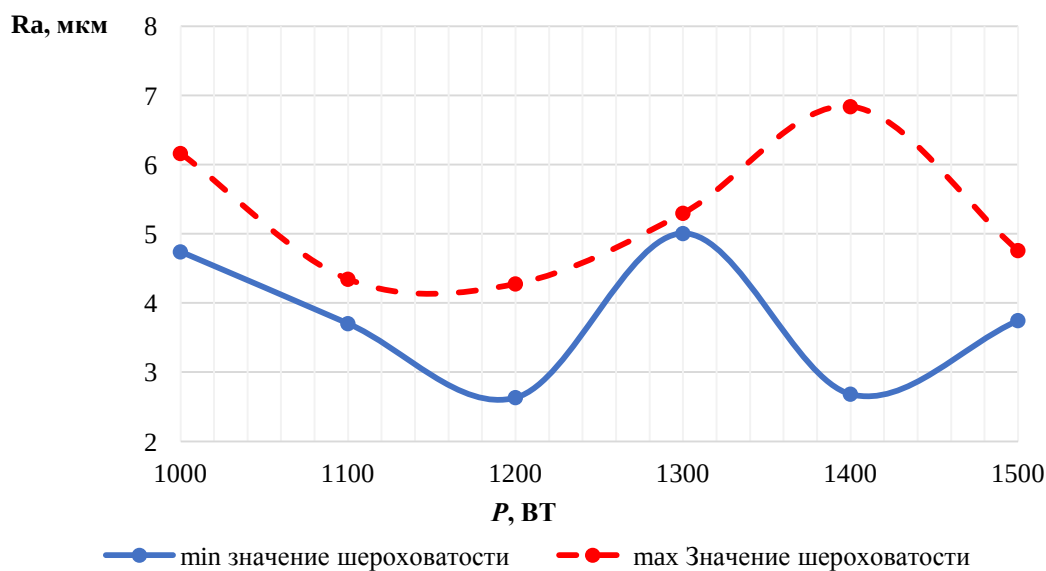


Рис. 2. График сравнения шероховатости поверхности от мощности резки

С увеличением скорости резки наблюдается тенденция к снижению минимальных значений (до 5 мкм); наиболее стабильный диапазон дос-

тигается при 900–1000 мм/мин; при низкой скорости (600 мм/мин) ИС достигает 45 мкм, что может свидетельствовать о перегреве.

Таблица 2

Результаты 2-го эксперимента (влияние скорости)

№ образца	Мощность P, Вт	Скорость V, мм/мин	Измененный слой h, мкм	Среднее значение ИС h, мкм	Шероховатость Ra, мкм	Среднее значение Ra, мкм
1	1500	600	10...45	27,5	5,409...6,080	5,755
2	1500	700	10...32	21	5,471...6,703	6,087
3	1500	800	10...48	29	3,029...7,412	5,220
4	1500	900	5...32	18,5	6,813...3,202	5,007
5	1500	1000	14...30	22	7,349...3,298	5,323
6	1500	1100	10...39	24,5	6,943...4,541	5,742
7	1500	1500	7...32	19,5	6,035...9,449	7,742

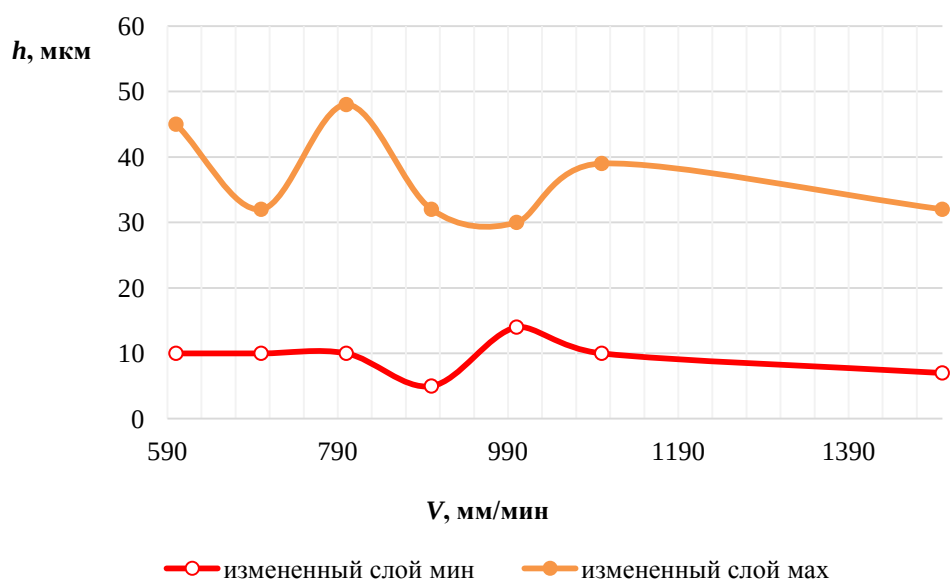


Рис. 3. График сравнения ИС от скорости перемещения лазерной режущей головки

На рисунке 3 представлены зависимости влияния перемещения лазерной режущей головки на толщину ИС.

Минимальные значения шероховатости обработанной поверхности (3...4 мкм) наблюдаются при скорости 800–1000 мм/мин при скорости 1500 мм/мин шероховатость резко воз-

растает (до 9,449 мкм), это, возможно, связано с недостаточным временем взаимодействия лазерного луча с материалом.

На рисунке 4 представлены зависимости влияния перемещения лазерной режущей головки на шероховатость обработанной поверхности.

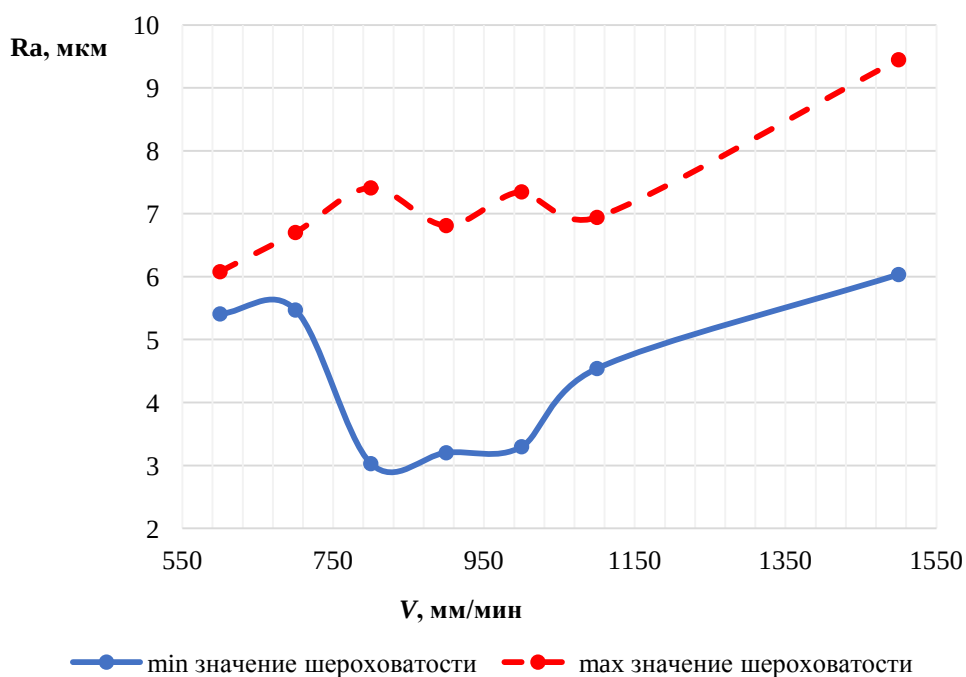


Рис. 4. График зависимости шероховатости обработанной поверхности от скорости перемещения лазерной режущей головки

Скорость определяет время теплового воздействия. При увеличении скорости уменьшается тепловое воздействие, однако при чрезмерно высоких значениях ухудшается стабильность процесса при резании.

Выводы

Мощность лазера оказывает нелинейное влияние на толщину ИС. Рациональный диапазон мощности $P = 1100\text{--}1300$ Вт, так как в данном интервале обеспечиваются минимальные значения толщины ИС (5–29 мкм) и шероховатость обработанной поверхности (2,6...3,7 мкм). Увеличение скорости способствует снижению толщины ИС. Рациональный диапазон скорости составляет $V = 900\text{--}1100$ мм/мин. Минимальные значения шероховатости достигаются при определенном соотношении мощности и скорости. Полученные экспериментальные зависимости могут быть использованы при разработке и оптимизации технологических процессов лазерной резки титановых сплавов, применяемых в авиационной и машиностроительной промышленности с целью повышения качества обработки и снижения последующих операций механической доработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Закалюкина Л. А. Виды и параметры процесса лазерной резки / Л. А. Закалюкина, В. Я. Баннов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 19. – 2016. – С. 163–167.
2. Капалин, Н. Ю. Влияние скорости перемещения лазерной режущей головки при обработке сплава 12X18H10T на качество получаемой поверхности / Н. Ю. Капалин, О. О. Бердников, Д. С. Реченко, Б. А. Лопатин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2026. – Т. 26, № 1. – С. 78–86. – DOI 10.14529/engin260107.
3. Alsaadawy, M., Dewidar M., Said A. A Comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology, 2023, 130(4), pp. 1039–1074. doi:10.1007/s00170-023-12768-1.

4. Steen, W. M., Mazumder J. Laser Material Processing. Springer, 2010. 558 p.

5. Yilbas, B. Laser Cutting of Thick Sheet Metal: Surface Plasma Characteristics and Cutting Quality Assessment. Advanced Materials Research. 2011. 264–265. pp. 1944–1953. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.1944.

6. Ready, J. F. Effects of High-Power Laser Radiation. Academic Press, 1997.

7. Данилов, В. И. Особенности лазерной резки листовой стали и мониторинг качества образцов после лазерного воздействия / В. И. Данилов, Л. Б. Зуев // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 4(278). – С. 176–184.

8. Григорьянц, А. Г. Лазерная резка металлов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. – М. : Высш. шк., 1988.

REFERENCES

1. Zakalyukina, L. A., Bannov V. Ya. Types and parameters of the laser cutting process // New information technologies in automated systems, 19, 2016. pp. 163-167.
2. Kapalin, N. Yu., Berdnikov O. O., Rechenko D. S., Lopatin B. A. Influence of the speed of movement of the laser cutting head during processing of alloy 12X18H10T on the quality of the surface obtained // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical engineering. – 2026. – Vol. 26, No. 1. – Pp. 78–86. – DOI 10.14529/engin260107.
3. Alsaadawy, M., Dewidar M., Said A. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 130(4), pp. 1039–1074. doi:10.1007/s00170-023-12768-1.
4. Steen, W. M., Mazumder J. Laser Material Processing. Springer, 2010. 558 p.
5. Yilbas, B. Laser Cutting of Thick Sheet Metal: Surface Plasma Characteristics and Cutting Quality Assessment. Advanced Materials Research. 2011. 264–265. Pp. 1944–1953. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.1944.
6. Ready, J. F. Effects of High-Power Laser Radiation. Academic Press, 1997.
7. Danilov, V. I., Zuev L. B. Features of laser cutting of sheet steel and monitoring of sample quality after laser exposure // Applied mechanics and technical physics. 2006. Vol. 47, No. 4(278). Pp. 176–184.
8. Grigoryants, A. G., Sokolov A. A. Laser cutting of metals. Moscow : Higher School, 1988.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026
The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 631.358:633.522:621-52
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-22-25

Научная статья
Original article

А. А. Кожевникова, К. Р. Федорова, М. А. Добрынин, А. Д. Харламов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УБОРКИ ЛУБЯНЫХ КУЛЬТУР С ПОМОЩЬЮ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Ксения Романовна Федорова, ks_fedorova@icloud.com

Аннотация. В статье разработана автоматизированная система уборки лубяных культур на базе зерноуборочных комбайнов, обеспечивающая раздельный сбор генеративной и стеблевой частей растений за один проход. Предлагаемое решение позволяет повысить производительность уборки, уровень автоматизации и эффективность использования существующего парка комбайнов.

Ключевые слова: сельскохозяйственные машины, лубяные культуры, зерноуборочный комбайн, механизированная уборка, универсальная жатка, автоматизированная система управления

Для цитирования: Кожевникова А. А., Федорова К. Р., Добрынин М. А., Харламов А. Д. Автоматизированная система для уборки лубяных культур с помощью зерноуборочных комбайнов. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 22–25. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-22-25.

Информация об авторах:

Алла Александровна Кожевникова – старший преподаватель кафедры ТМС ВолгГТУ

e-mail: a_kozhevnikova@vstu.ru

Ксения Романовна Федорова – студент кафедры ТМС ВолгГТУ

orcid.org/0009-0007-0652-2773

e-mail: ks_fedorova@icloud.com

Матвей Анатольевич Добрынин – студент кафедры ТМС ВолгГТУ

orcid.org/0009-0006-3687-3331

e-mail: matvey.dobrynin.2020@mail.ru

Алексей Дмитриевич Харламов – студент кафедры ТМС ВолгГТУ

orcid.org/0009-0000-3479-2219

e-mail: harlamovaleschcka@yandex.ru

Вклад авторов:

А. А. Кожевникова – научное руководство исследованием, постановка задач и научное консультирование.

К. Р. Федорова – разработка конструкции универсальной жатки и выполнение инженерных расчетов.

М. А. Добрынин – разработка структурной схемы управления, обработка результатов исследования и оформление статьи.

А. Д. Харламов – проведение анализа существующих технических решений и подготовка материалов статьи.

A. A. Kozhevnikova, K. R. Fedorova, M. A. Dobrynin, A. D. Kharlamov

AUTOMATED SYSTEM FOR HARVESTING BAST CROPS USING COMBINE HARVESTERS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Ksenia R. Fedorova, ks_fedorova@icloud.com

Abstract. The article develops an automated system for harvesting crops based on combine harvesters, which provides separate harvesting of generative and stem parts of plants in one pass. The proposed solution makes it possible to increase the productivity of harvesting, the level of automation and the efficiency of using the existing fleet of combine harvesters.

Keywords: agricultural machinery, bast crops, combine harvester, mechanized harvesting, universal harvester, automated control system

For citation: Kozhevnikova A. A., Fedorova K. R., Dobrynin M. A., Kharlamov A. D. Automated system for harvesting bast crops using combine harvesters. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 22–25. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-22-25.

Information about the authors:

Alla A. Kozhevnikova – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU

e-mail: a_kozhevnikova@vstu.ru

Ksenia R. Fedorova – Student, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU

orcid.org/0009-0007-0652-2773

e-mail: ks_fedorova@icloud.com

Matvey A. Dobrynin – Student, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU
orcid.org/0009-0006-3687-3331

e-mail: matvey.dobrynin.2020@mail.ru

Alexey D. Kharlamov – Student, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU
orcid.org/0009-0000-3479-2219

e-mail: harlamovaleschcka@yandex.ru

Contribution of the authors:

Alla A. Kozhevnikova – scientific management of the research, setting tasks and scientific advice.

Ksenia R. Fedorova – development of the universal header design and engineering calculations.

Matvey A. Dobrynin – development of a structural control scheme, processing of research results and design of the article.

Alexey D. Kharlamov – analysis of existing technical solutions and preparation of the materials of the article.

Введение

Уборка лубяных культур требует разделения цветочно-семенной и стеблевой частей. Традиционные технологии предполагают использование специализированных машин, обладающих высокой стоимостью и ограниченной доступностью для большинства сельскохозяйственных предприятий. Перспективным направлением решения данной проблемы является использование серийных зерноуборочных комбайнов в качестве универсальной платформы для размещения специализированных жатвенных модулей. Такой подход позволяет использовать существующий парк техники без приобретения дорогостоящих специализированных комплексов.

Целью исследования является разработка автоматизированной системы уборки лубяных культур на базе зерноуборочных комбайнов, обеспечивающей раздельную уборку различных частей растения за один проход машины.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования проведен анализ существующих технических решений, применяе-

мых для механизированной уборки технической конопли на базе зерноуборочных комбайнов. В качестве объектов исследования выбраны отечественный кормоуборочный комбайн RSM F 2450 HEMP и зарубежная система для уборки технической конопли CANN DoubleCut DC4510 на базе зерноуборочных комбайнов JohnDeere T6/W6.

RSM F 2450 HEMP реализует одноуровневую схему уборки, ориентированную на упрощение конструкции, снижение массы и повышение надежности за счет единого технологического потока обработки растения.

CANN DoubleCut DC4510 использует двухуровневую систему уборки, обеспечивающую раздельный срез и формирование двух технологических потоков, что позволяет повысить качество разделения урожая и адаптивность к различным условиям уборки при усложнении конструкции.

На рисунке 1 представлена конструктивная схема коноплеуборочного комплекса CANN DoubleCut DC4510 [3, 4].

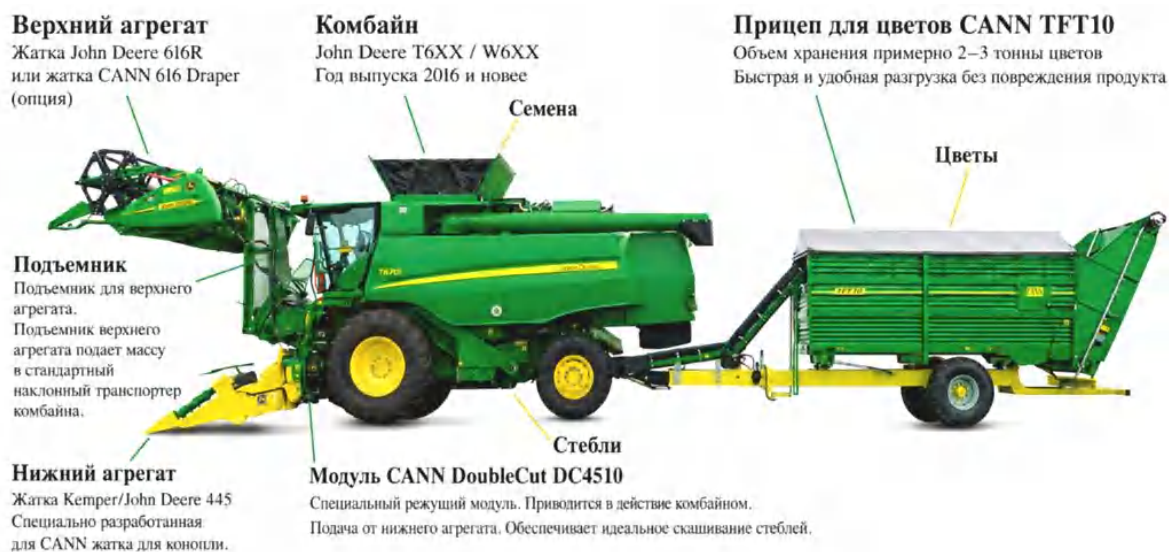


Рис. 1. Конструктивная схема коноплеуборочного комплекса CANN DoubleCut DC4510

На основании полученных результатов разработан универсальный жатвенный модуль для установки на зерноуборочные комбайны различных производителей. При проектировании использовались методы инженерного моделирования, функционального анализа и структурного синтеза технических систем.

Результаты исследования и их обсуждение

В рамках работы спроектирован универсальный жатвенный модуль, адаптированный к работе с широкой номенклатурой зерноуборочных комбайнов различных производителей, представленный на рис. 2, конструктивное исполнение которого представляет собой единый жатвенный модуль, смонтированный на общем несущем каркасе.

Принципиальным отличием от зарубежных комплексов подобного назначения типа CANN DoubleCut DC4510, архитектура которых базируется на нескольких разрозненных рабочих модулях со специальными промежуточными адаптерами, является то, что предлагаемое решение формирует единую технологическую систему, что упрощает монтаж, обслуживание и эксплуатацию отечественного комплекса.

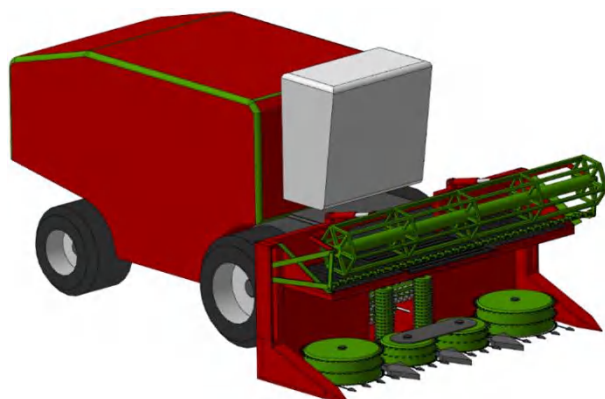


Рис. 2. Универсальный жатвенный модуль для установки на зерноуборочные комбайны различного типа

Жатвенный модуль обеспечивает синхронизацию процессов отделения верхней фракции растения и уборки стеблевой массы за один технологический проход комбайна. Централизованная несущая система в виде общего каркаса обеспечивает повышенную конструктивную жесткость системы, редукцию стыковочных узлов и соединительных элементов, стабильность взаимной геометрии режущих аппаратов в условиях динамических нагрузок, что минимизирует риск разрегулировки рабо-

чих органов в процессе эксплуатации. На рис. 3 представлена структурная схема управления жатвенным модулем на базе комбайна [5].

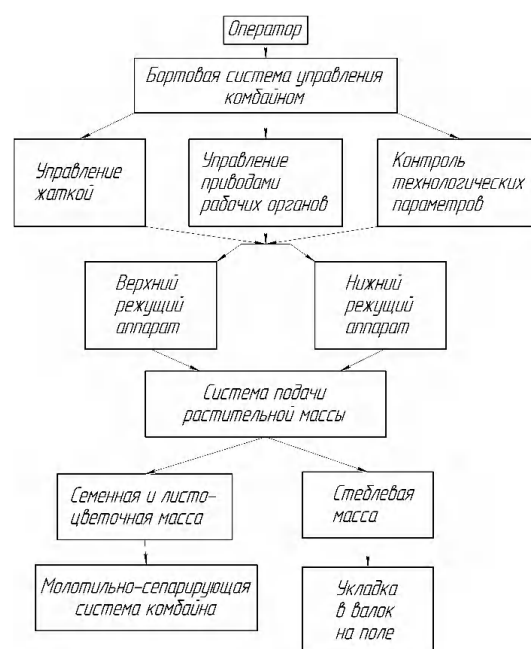


Рис. 3. Структурная схема управления жатвенным модулем на базе зерноуборочного комбайна

Совокупность предлагаемых технических решений реализует концепцию универсальной технологии уборки лубяных культур, базирующуюся на оснащении сформированного к настоящему моменту парка сельскохозяйственной техники разработанными жатвенными модулями, трансформирующими любой серийный трактор или комбайн в эффективное средство уборки технической конопли, что снимает инвестиционный барьер в виде дорогостоящей узкопрофильной техники зарубежного производства (самоходные уборочные комплексы) и снижает порог входа в технологию. Особую значимость данное решение приобретает в условиях российского агропромышленного комплекса, поскольку использование целевых модулей совместно с имеющейся техникой, напрямую ведет к сокращению инвестиционных издержек и повышению экономической отдачи производства.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана автоматизированная система уборки лубяных культур на базе зерноуборочных комбайнов, обеспечивающих выполнение нескольких технологических операций за один проход машины. Предлагаемая конструкция

универсальной жатки позволяет осуществлять раздельный сбор генеративной и стеблевой частей растений, что способствует повышению производительности уборочного процесса и снижению потерь урожая. Использование единого жатвенного модуля вместо многокомпонентных зарубежных систем обеспечивает упрощение конструкции, повышение надежности и снижение затрат на обслуживание оборудования. Внедрение разработанной системы позволяет повысить уровень автоматизации процессов уборки лубяных культур, расширить функциональные возможности существующего парка зерноуборочных комбайнов и снизить потребность в приобретении специализированной импортной техники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов, Р. А. Результаты полевых исследований уборки технической конопли по различным технологиям / Р. А. Попов, И. В. Бакулова // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 7. – С. 108–112. – DOI 10.28983/asj.y2022i7pp108-112. – EDN CTFYAT.
2. Косилка-измельчитель самоходная RSM F 2450 HEMP. – Текст : электронный // Ростсельмаш : [сайт]. – URL: <https://rostselmash.com/products/self-propelled-mowers/f-2450-hemp> (дата обращения: 07.06.2026).
3. T6 800 Combine. – Текст: электронный // John Deere: [сайт]. – URL: <https://www.deere.com/en/harvesting/t6800-combine/> (дата обращения: 07.06.2026).
4. DOUBLECUT DC4510. – Текст : электронный // CANN - Brochure Doublecut spreads_ : [сайт]. – URL: https://ss-usa.s3.amazonaws.com/c/311033856/media/594264623c1854d7188633302250177/CANN%20-%20Brochure%20Doublecut%20spreads_ENG.pdf (дата обращения: 07.06.2026).

[usa.s3.amazonaws.com /c/311033856/media/594264623c1854d7188633302250177/CANN%20-%20Brochure%20Doublecut%20spreads_ENG.pdf](https://ss-usa.s3.amazonaws.com/c/311033856/media/594264623c1854d7188633302250177/CANN%20-%20Brochure%20Doublecut%20spreads_ENG.pdf) (дата обращения: 07.06.2026).

5. Теория автоматического управления : учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2 ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.] ; под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 367 с., ил.

REFERENCES

1. Popov, R. A. Results of field research on harvesting technical cannabis using various technologies / R. A. Popov, I. V. Bakulova // Agrarian Scientific Journal. – 2022. – No. 7. – Pp. 108-112. – DOI 10.28983/asj.y2022i7pp108-112. – EDN CTFYAT.
2. Self-propelled shredder mower RSM F 2450 HEMP. – Text : electronic // Rostselmash : [website]. – URL: <https://rostselmash.com/products/self-propelled-mowers/f-2450-hemp> (date of access: 07.06.2026).
3. T6 800 Combine. – Text : electronic // John Deere : [website]. – URL: <https://www.deere.com/en/harvesting/t6800-combine/> (date of access: 07.06.2026).
4. DOUBLECUT DC4510. – Text : electronic // CANN - Brochure Doublecut spreads_ : [website]. – URL: https://ss-usa.s3.amazonaws.com/c/311033856/media/594264623c1854d7188633302250177/CANN%20-%20Brochure%20Doublecut%20spreads_ENG.pdf (accessed: 07.06.2026).
5. Theory of automatic control: Textbook. For universities on spec. "Automation and telemechanics". In 2 parts of Part I. Theory of linear automatic control systems / N. A. Babakov, A. A. Voronov, A. A. Voronova et al.; Edited by A. A. Voronov. – 2nd ed., revised. Moscow: Higher School of Economics, 1986. 367 p., ill.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026
The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 631.358:633.522:621-52
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-25-29

Научная статья
Original article

А. А. Кожевникова, К. Р. Федорова, М. А. Добрынин, В. В. Полунин
УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЖАТКА ДЛЯ УБОРКИ ЛУБЯНЫХ КУЛЬТУР,
АГРЕГАТИРУЕМАЯ С ТРАКТОРОМ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Ксения Романовна Федорова, ks_fedorova@icloud.com

Аннотация. Рассматривается возможность использования серийных тракторов в качестве энергетической базы для механизированной уборки лубяных культур. Разработана конструкция универсальной жатки, обеспечивающей раздельный сбор генеративной и стеблевой частей растений за один технологический проход.

Ключевые слова: сельскохозяйственные машины, лубяные культуры, тракторная техника, механизированная уборка

Для цитирования: Кожевникова А. А., Федорова К. Р., Добрынин М. А., Полунин В. В. Универсальная жатка для уборки лубяных культур, агрегатируемая с трактором. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 25–29. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-25-29.

Информация об авторах:

Алла Александровна Кожевникова – старший преподаватель кафедры ТМС ВолгГТУ
e-mail: a_kozhevnikova@vstu.ru

Ксения Романовна Федорова – студент кафедры ТМС ВолгГТУ
orcid.org/0009-0007-0652-2773
e-mail: ks_fedorova@icloud.com

Матвей Анатольевич Добрынин – студент кафедры ТМС ВолгГТУ
orcid.org/0009-0006-3687-3331
e-mail: matvey.dobrynin.2020@mail.ru

Вячеслав Викторович Полунин – студент кафедры ТМС ВолгГТУ
orcid.org/0009-0002-9465-3821
e-mail: slava.polunin161@gmail.com

Вклад авторов:

А. А. Кожевникова – научное руководство исследованием, постановка задач и научное консультирование.

К. Р. Федорова – разработка конструкции универсальной жатки и выполнение инженерных расчетов.

М. А. Добрынин – разработка структурной схемы управления, обработка результатов исследования и оформление статьи.

В. В. Полунин – проведение анализа существующих технических решений и подготовка материалов статьи.

A. A. Kozhevnikova, K. R. Fedorova, M. A. Dobrynin, V. V. Polunin

**UNIVERSAL HARVESTER FOR HARVESTING BAST CROPS,
AGGREGATED WITH A TRACTOR**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Ksenia R. Fedorova, ks_fedorova@icloud.com

Abstract. The possibility of using serial tractors as an energy base for mechanized harvesting of bast crops is being considered. The design of a universal harvester and stem parts of plants in one technological pass.

Keywords: agricultural machinery, bast crops, tractor equipment, mechanized harvesting

For citation: Kozhevnikova A. A., Fedorova K. R., Dobrynin M. A., Polunin V. V. Universal harvester for harvesting bast crops, aggregated with a tractor. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 25–29. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-25-29

Information about the authors:

Alla A. Kozhevnikova – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU
e-mail: a_kozhevnikova@vstu.ru

Ksenia R. Fedorova – Student, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU
orcid.org/0009-0007-0652-2773
e-mail: ks_fedorova@icloud.com

Matvey A. Dobrynin – Student, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU
orcid.org/0009-0006-3687-3331
e-mail: matvey.dobrynin.2020@mail.ru

Vyacheslav V. Polunin – Student, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU
orcid.org/0009-0002-9465-3821
e-mail: slava.polunin161@gmail.com

Contribution of the authors:

Alla A. Kozhevnikova – scientific management of the research, setting tasks and scientific advice.

Ksenia R. Fedorova – development of the universal header design and engineering calculations.

Matvey A. Dobrynin – development of a structural control scheme, processing of research results and design of the article.

Vyacheslav V. Polunin – analysis of existing technical solutions and preparation of the materials of the article.

Введение

В современных условиях развития агропромышленного комплекса возрастает интерес к выращиванию лубяных культур, в частности, технической конопли, являющейся ценным источником волокнистого и семенного сырья.

Продукты переработки данной культуры находят применение в текстильной, строительной, химической, пищевой и целлюлозно-бумажной промышленности.

Одним из основных факторов, ограничивающих развитие отрасли, остается недостаточ-

ная обеспеченность хозяйств специализированными уборочными машинами. Большинство существующих технических решений характеризуются высокой стоимостью, сложностью конструкции и ограниченной универсальностью.

В связи с этим особый интерес представляет разработка технических средств, способных использовать существующий парк тракторов в качестве энергетической базы для выполнения уборочных операций.

Целью исследования является разработка универсальной жатки для уборки лубяных культур, агрегируемой с тракторами различных моделей и обеспечивающей раздельный сбор генеративной и стеблевой частей растений за один технологический проход.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования рассматриваются технические средства, предназначен-

ные для механизированной уборки лубяных культур на базе тракторной техники.

На первом этапе исследования был проведен анализ существующих решений для уборки технической конопли. В качестве референтного образца рассмотрен высокопроизводительный комплекс Hemp Bull, созданный на базе трактора CLAAS Xerion 4000 [1–3]. Внешний вид коноплеуборочного комплекса Hemp Bull на базе трактора CLASS Xerion 4000 представлен на рис. 1.

Особое внимание уделено исследованию возможности использования серийных тракторов в качестве универсальной платформы для размещения специализированного уборочного оборудования, выполнению анализа требований к мощности энергетического средства, характеристикам гидравлической системы и параметрам вала отбора мощности, необходимым для привода рабочих органов жатки.



Рис. 1. Внешний вид коноплеуборочного комплекса Hemp Bull на базе трактора CLASS Xerion 4000

На основании проведенного анализа разработана конструкция универсальной жатки, включающая два режущих аппарата, размещенных на общем несущем каркасе. Конструктивная схема разрабатывалась с учетом обеспечения технологической совместимости с широким спектром тракторов отечественного и зарубежного производства.

При проектировании жатвенных устройств применяются методы сравнительного технического анализа, структурно-функционального моделирования и инженерного проектирования сельскохозяйственных машин. Эффективность предлагаемых решений оценивается по критериям универсальности, технологической гибко-

сти, простоты конструкции и возможности выполнения нескольких операций за один проход агрегата по полю.

Результаты исследования и их обсуждение

Аналитический обзор существующих технических решений в области уборки технической конопли позволил выявить ключевые недостатки, лимитирующие эксплуатационную эффективность и экономическую доступность, характерные для современных специализированных комплексов. Основная часть зарубежных технических средств характеризуется высокой стоимостью владения, избыточной конструктивной сложностью, повышающей трудо-

емкость обслуживания, и ограниченной совместимостью с парком доступных уборочных средств. Дополнительным сдерживающим фактором выступает модульная архитектура суще-

ствующих решений, которая ведет к росту массы, габаритов и, как следствие, к увеличению стоимости оборудования и трудоемкости его обслуживания.

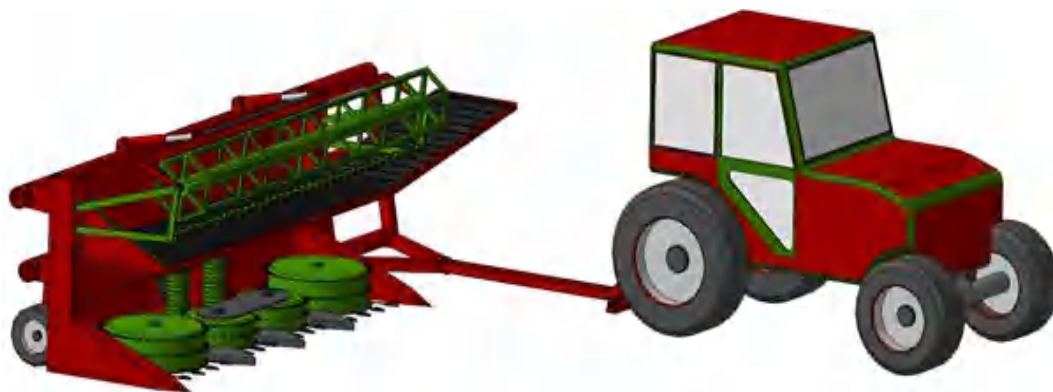


Рис. 2. Универсальная жатка для агрегатирования с трактором

С учетом выявленных ограничений и недостатков существующих систем была разработана универсальная жатка для агрегатирования с трактором, представленная на рис. 2. Конструктивное исполнение разработанной системы базируется на цельном несущем каркасе, на котором расположены два функционально взаимодополняющих режущих органа, образующих единый технологический тракт. Верхний режущий орган осуществляет срез семенной и цвето-лиственной частей растения, а нижний служит для скашивания стеблевой части. В отличие от существующих аналогов, в которых жатвенные блоки конструктивно разобщены, в предлагаемом решении оба режущих органа объединены в едином конструктивном модуле и функционируют в согласованном режиме, что обеспечивает совмещение нескольких технологических операций в рамках одного прохода. На рис. 3 представлена структурная схема управления жаткой на базе трактора [4].

Принципиальным отличием и конкурентным преимуществом данной разработки среди ее аналогов является ее технологическая универсальность. Конструкция жатвенного модуля предполагает интеграцию с обширной номенклатурой тракторов, оснащенных валом отбора мощности и гидросистемой требуемой производительности, что исключает потребность в применении дорогостоящих специализированных комплексов и формирует предпосылки для широкой диффузии технологии в хозяйствах разного размерного спектра.

Технологический процесс организован по двухпоточной системе: в процессе выполнения



Рис. 3. Структурная схема управления жаткой на базе трактора

уборочных операций верхняя фракция растения направляется в накопительный бункер или дополнительное транспортное средство типа прицеп для дальнейшей переработки, а стеблевая масса после среза распределяется по поверхности поля в виде валка для прохождения стадии росной мочки – биотехнологический этап, предшествующий выделению лубяного волокна.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана конструкция универсальной жатки

для уборки лубяных культур, предназначенная для агрегатирования с тракторами различных моделей. Предлагаемое техническое решение обеспечивает одновременный срез генеративной и стеблевой частей растений за один технологический проход, что способствует повышению производительности уборочных работ.

Конструктивной особенностью разработки является размещение двух режущих аппаратов на общем несущем каркасе, что позволяет упростить конструкцию, уменьшить количество отдельных узлов и повысить надежность системы по сравнению с многомодульными специализированными комплексами.

Использование серийных тракторов в качестве энергетической базы позволяет существенно снизить капитальные затраты на внедрение технологии уборки лубяных культур и повысить эффективность использования существующего машинно-тракторного парка хозяйств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hemp, from seed to end product. – Текст : электронный // DUNAGRO HEMP GROUP : [сайт]. – URL: <https://dunagrohempgroup.com/?um> (дата обращения: 07.06.2026).
2. Hemp & Speciality. – Текст : электронный // shelbourne reynolds : [сайт]. – URL: <https://www.shelbourne.com/>

com/harvest/stripper-header/hemp-range/ (дата обращения: 07.06.2026).

3. Model 460 pro. – Текст : электронный // kemper hero of harvest : [сайт]. – URL: <https://www.kemper-stadtlohn.de/en/produkte/maehvorsaeetze/grosstrommelseerie/modell-460pro> (дата обращения: 07.06.2026).

4. Теория автоматического управления : учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2 ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.] ; под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 367 с., ил.

REFERENCES

1. Hemp, from seed to end product. – Text : electronic // DUNAGRO HEMP GROUP : [website]. – URL: <https://dunagrohempgroup.com/?um> (accessed: 07.06.2026).
2. Hemp & Speciality. – Text : electronic // shelbourne reynolds : [website]. – URL: <https://www.shelbourne.com/harvest/stripper-header/hemp-range/> (accessed: 07.06.2026).
3. Model 460 pro. – Text : electronic // kemper hero of harvest : [website]. – URL: <https://www.kemper-stadtlohn.de/en/produkte/maehvorsaeetze/grosstrommelseerie/modell-460pro> (date of access: 07.06.2026).
4. Theory of automatic control: Textbook. For universities on spec. "Automation and telemechanics". In 2 parts of Part I. Theory of linear automatic control systems / N. A. Babakov, A. A. Voronov, A. A. Voronova et al.; Edited by A. A. Voronov. – 2nd ed., revised. Moscow: Higher School of Economics, 1986. 367 p., ill.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК: 539.261:620.187:691.75
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-29-33

Научная статья
Original article

М. В. Ростовцева¹, К. С. Габриэлян¹, Ж. С. Тихонова², Д. В. Крайнев²

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

¹ООО «Аврора-ЭЛМА», Волгоград, Россия

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Мария Видмантасовна Ростовцева, zikis_mv@mail.ru

Аннотация. В статье предложен комплекс мероприятий по повышению качества пьезокерамических изделий за счет модернизации системы метрологического контроля. Оценка эффекта от реализации мероприятий произведена на примере партии из 1000 пьезоэлементов на основе материала ЦТС-19. Установлено, что стабильное обеспечение качества производства пьезокерамики требует сочетания технологических, аналитических и организационных мероприятий.

Ключевые слова: пьезокерамика, метрологическое обеспечение, автоматический измеритель, комплексный адмиттанс, неопределенность измерений, приемочный контроль

Для цитирования: Ростовцева М. В., Габриэлян К. С., Тихонова Ж. С., Крайнев Д. В. Повышение качества пьезокерамических изделий за счет модернизации системы метрологического контроля. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 29–33. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-29-33.

Информация об авторах:

Мария Видмантасовна Ростовцева – заместитель главного бухгалтера ООО «Аврора-ЭЛМА»
e-mail: zikis_mv@mail.ru

Ксения Сергеевна Габриэлян – бухгалтер ООО «Аврора-ЭЛМА»

e-mail: ksgabrielyan@gmail.com

Жанна Сергеевна Тихонова – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС ВолгГТУ

orcid.org/0000-0001-5047-0244

e-mail: tikhonovazhs@yandex.ru

Дмитрий Вадимович Крайнев – доцент, д-р техн. наук, кафедра ТМС ВолгГТУ

orcid.org/0000-0001-8762-4251

e-mail: krainevdv@mail.ru

Вклад авторов:

М. В. Ростовцева – разработка концепции исследования, проведение анализа данных, подготовка и редактирование текста статьи.

К. С. Габриэлян – проведение лабораторных исследований, подготовка таблиц и графиков, участие в написании статьи.

Ж. С. Тихонова – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Д. В. Крайнев – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

M. V. Rostovtseva¹, K. S. Gabrielyan¹, Zh. S. Tikhonova², D. V. Kraynev²

**IMPROVING THE QUALITY OF PIEZOCERAMIC PRODUCTS
BY MODERNIZING THE METROLOGICAL CONTROL SYSTEM**

¹LLK “Aurora-ALMA”, Volgograd, Russia

²Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Maria V. Rostovtseva, zikis_mv@mail.ru

Abstract. The article proposes a set of measures to improve the quality of piezoceramic products by modernizing the metrological control system. The impact of the measures was assessed using the example of a batch of 1,000 piezoelectric elements based on the CTS-19 material. It has been established that stable quality assurance of piezoceramic production requires a combination of technological, analytical, and organizational measures.

Keywords: piezoceramics, metrological support, automatic meter, integrated admittance, measurement uncertainty, acceptance control

For citation: Rostovtseva M. V., Gabrielyan K. S., Tikhonova Zh. S., Kraynev D. V. Improving the quality of piezoceramic products by modernizing the metrological control system. *Izvestiya VSTU*. 2026; 8(315): 29–33. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-29-33

Information about the authors:

Maria V. Rostovtseva – Deputy Chief Accountant of LLK “Aurora-ALMA”

e-mail: zikis_mv@mail.ru

Ksenia S. Gabrielyan – Accountant of LLK “Aurora-ALMA”

e-mail: ksgabrielyan@gmail.com

Zhanna S. Tikhonova – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU

orcid.org/0000-0001-5047-0244

e-mail: tikhonovazhs@yandex.ru

Dmitry V. Kraynev – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology VSTU

orcid.org/0000-0001-8762-4251

e-mail: krainevdv@mail.ru

Contribution of the authors:

Maria V. Rostovtseva – development of the research concept, data analysis, preparation and editing of the article text.

Ksenia S. Gabrielyan – conducting laboratory research, preparing tables and graphs, and participating in the writing of the article.

Zhanna S. Tikhonova – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

Dmitry V. Kraynev – definition of the purpose of the work, participation in the discussion of the results.

Введение

В настоящее время развитие ряда отраслей, таких как автомобилестроение, энергетика, медицина, а также микроэлектроника и нанотехнологии стимулирует потребность в высоко-

точных и надежных пьезокерамических элементах. Прогрессирующий спрос отражается на динамике рынка пьезокерамики, который в 2025 году превысил 1,74 млрд долларов США и по прогнозам к 2035 году составит 3,27 млрд

долларов США [1]. Пьезокерамика используется от медицинских УЗИ-аппаратов и топливных форсунок в автомобилях до систем точного позиционирования, гидроакустических излучателей, датчиков вибрации и давления, резонаторов фильтров и преобразователей [2]. Высокая точность измерений, быстродействие, компактность решений, устойчивость к экстремальным условиям, энергоэффективность делают ее критически важным компонентом, а отказ или нестабильность работы может привести к аварии в таких отраслях как авиация или энергетика. Разнообразие областей применения и непрерывное совершенствование аппаратуры на базе пьезокерамики [3] формирует комплекс жестких требований и необходимость строгого контроля на всех этапах производства [4]. Условия санкционного давления и ограничения доступа к зарубежным технологиям и компонентам обосновывают направление совершенствования системы контроля качества пьезокерамики в качестве стратегической необходимости и определяют актуальность данной тематики.

Материалы и методы исследования

Исходными данными послужили материалы производственного анализа ООО «Аврора-ЭЛМА». В качестве контролируемого объекта рассмотрена партия из 1000 пьезоэлементов на основе материала ЦТС-19 (цирконата-титаната свинца). Метод исследования включал расчет сравнительных показателей ручного и автоматизированного контроля; оценку неопределенности, повторяемости и воспроизводимости измерений.

Результаты исследования и их обсуждение

Реализуемый ООО «Аврора-ЭЛМА» технологический процесс производства пьезоэлементов на основе материала ЦТС-19 включает ряд последовательных этапов, взаимосвязанных между собой и необходимых для обеспечения требуемых электрофизических характеристик и стабильности. Так этап массозаготовления определяет равномерность распределения фаз в материале и стабилизацию свойств; прессование – плотность и равномерность распределения материала; отжиг – формирование кристаллической структуры и фазового состава; мехобработка – геометрические параметры пьезоэлемента; поляризация обеспечивает ориентацию доменов и формирование пьезоэлектрического эффекта.

Контроль на отдельных этапах производства пьезокерамики осуществляется выборочным методом, так как проверка технологических характеристик на каждом этапе требует высокочувствительных аналитических методов, включая масс-спектрометрию, рентгеноструктурный анализ, ИК-спектроскопию и другие [5, 6]. Установлено, что мониторинг и поддержание постоянства режимов обработки на каждом этапе производства пьезоэлементов на основе ЦТС-19 позволяют минимизировать разброс функциональных свойств и обеспечить их стабильность. Так, например, минимизация разброса размеров зерен пьезокерамики требует поддержания температуры отжига с точностью $\pm 5-10$ °С, а для высокоточных пьезоэлементов – $\pm 1-5$ °С.

Количественное сравнение действующей и автоматизированной схем контроля партии из 1000 пьезоэлементов

Показатель	Действующая схема	АИПП	Эффект
Время контроля партии, ч	40	16	Снижение на 60 %
Производительность, шт./ч	25,0	62,5	Рост на 150 %
Число измерителей, чел.	6	2	Снижение на 66,7 %
Трудоемкость, чел.-ч	240	32	Снижение на 86,7 %
Трудоемкость на 1 изделие, мин/шт.	14,4	1,92	Снижение в 7,5 раза
Годовая экономия ФОТ, руб.	–	1 680 000	Прямой эффект
Экономия на поверке, руб./год	–	31 300	Снижение затрат на парк СИ
Срок окупаемости при стоимости 800 тыс. руб.	–	≈5,6 мес.	Менее 6 месяцев

Ключевым элементом контроля готовой продукции остается измерение электрических параметров пьезокерамики, определяющих функ-

циональные характеристики [7–9]. Установлено, что использование автоматического измерителя пьезоэлектрических параметров (АИПП), разра-

ботанного НКТБ «Пьезоприбор» [10], снижает суммарную стандартную неопределенность результатов измерения за счет случайной и систематической погрешности, а также дисперсию результата измерения. Основным эффектом автоматизации выражается не только в сокращении времени контроля на 60 %, но и в снижении трудоемкости на 86,7 % (таблица).

Выводы

Таким образом, повышение качества пьезокерамики является комплексной проблемой, требующей развития и модернизации как средств производства и контроля, привлечения средств автоматизации и цифровизации, а также элементов системы управления качеством. Стабильное обеспечение качества производства пьезокерамики требует сочетания технологических, аналитических и организационных мероприятий.

Непрерывный характер и высокая производительность процессов на отдельных этапах (смешивание компонентов, синтез, спекание и т. д.) исключает сплошной контроль и вынуждает организовывать систему выборочного контроля. Повышение же стабильности производства и качества пьезоэлементов на основе ЦТС-19 определяется постоянством режимов обработки на каждом этапе, что может быть обеспечено применением средств автоматизации и адаптивных систем управления технологическими режимами.

Автоматизация приемочных измерений за счет применения автоматического измерителя пьезоэлектрических параметров (АИПП) позволяет сократить время и трудоемкость, а также снизить неопределенность и погрешность измерений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рынок пьезоэлектрической керамики [Электронный ресурс] / Research Nester. – [б. г.]. – Режим доступа: <https://www.researchnester.com/ru/reports/piezoelectric-ceramics-market/6748> (дата обращения: 04.02.2026).
2. Жуков, С. О пьезокерамике и перспективах ее применения / С. Жуков // Компоненты и технологии. – 2001. – № 1(10). – С. 48–51. – EDN MTWZSD.
3. Технология изготовления многослойных пьезоактуаторов для системы управления двигателями внутреннего сгорания / А. А. Трофимов, В. В. Кикот, С. А. Здобнов [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2024. – № 1(47). – С. 32–39. – DOI 10.21685/2307-5538-2024-1-4. – EDN NLWJUC.
4. Головин, В. А. Пьезоэлектрическая керамика: применение, производство, перспективы / В. А. Головин, И. А. Каплунов, О. В. Малышкина, Б. Б. Педько // Вестник

Тверского государственного университета. Серия: Физика. – 2010. – № 11. – С. 47–58.

5. Земляков, В. Л. Методы и средства технической диагностики пьезокерамических элементов / В. Л. Земляков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 10. – С. 61–65. – EDN MVZBJB.

6. Пьезокерамика: контроль характеристик, методы, стандарты [Электронный ресурс] // He Shuai. – [б. г.]. – Режим доступа: <https://www.he-shuai.ru/knowledge/vse-o-piezokeramike/piezokeramika-kontrol-harakteristik-metody-standarty/> (дата обращения: 06.02.2026).

7. О поляризации и определении эффективных характеристик пористой пьезокерамики / Г. Д. Вернигора, Т. Г. Лупейко, А. С. Скалиух, А. Н. Соловьев // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 4(55). – С. 462–469. – EDN OIBHHH.

8. Сравнение динамических характеристик пьезоэлектрических актуаторов, применяемых в вибродиагностике крупномасштабных конструкций / И. Н. Шардаков, А. П. Шестаков, И. О. Глот [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 376–386. – DOI 10.7242/1999-6691/2024.17.3.31. – EDN BNEFQF.

9. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – Москва: Техносфера, 2006. – 628 с. – (Мир электроники). – ISBN 5-94836-100-4. – EDN QMQMGR.

10. Автоматический измеритель пьезоэлектрических параметров [Электронный ресурс] // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. – URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mits/8b5c2665-f879-3ecb-3c88-edc4309d2a43> (дата обращения: 15.05.2026).

REFERENCES

1. Piezoelectric ceramics market [Electronic resource] / Research Nester. – [b. g.]. – Access mode: <https://www.researchnester.com/ru/reports/piezoelectric-ceramics-market/6748> (date of reference: 02.04.2026).
2. Zhukov, S. On piezoceramics and prospects for its application / S. Zhukov // Components and technologies. – 2001. – № 1(10). – Pp. 48–51. – EDN MTWZSD.
3. Technology of manufacturing multilayer piezoactuators for the control system of internal combustion engines / A. A. Trofimov, V. V. Kikot, S. A. Zdobnov [et al.] // Measurement. Monitoring. Management. Control. – 2024. – № 1(47). – Pp. 32–39. – DOI 10.21685/2307-5538-2024-1-4. – EDN NLWJUC.
4. Golovnin, V. A., Kaplunov I. A., Malyskhina O. V., Pedko B. B. Piezoelectric ceramics: application, production, prospects // Bulletin of Tver State University. Series: Physics. 2010. No. 11. Pp. 47–58.
5. Zemlyakov, V. L. Methods and means of technical diagnostics of piezoceramic elements / V. L. Zemlyakov // News of higher educational institutions. Instrument engineering. – 2010. – Vol. 53, No. 10. – Pp. 61–65. – EDN MVZBJB.
6. Piezoceramics: control of characteristics, methods, standards [Electronic resource] // He Shuai. – [b. g.]. – Access mode: <https://www.he-shuai.ru/knowledge/vse-o-piezokeramike/piezokeramika-kontrol-harakteristik-metody-standarty/> (date of access: 02.06.2026).
7. On polarization and determination of effective characteristics of porous piezoceramics / G. D. Vernigora, T. G. Lupenko, A. S. Skaliukh, A. N. Soloviev // Bulletin of the Don State Technical University. – 2011. – Vol. 11, No. 4(55). – Pp. 462–469. – EDN OIBHHH.

8. Comparison of dynamic characteristics of piezoceramic actuators used in vibration diagnostics of large-scale structures / I. N. Shardakov, A. P. Shestakov, I. O. Glot [et al.] // Computational mechanics of continuous media. – 2024. – Vol. 17, No. 3. – Pp. 376–386. – DOI 10.7242/1999-6691/2024.17.3.31. – EDN BNEFQF.

9. Sharapov, V. M. Piezoelectric sensors / V. M. Sharapov, M. P. Musienko, E. V. Sharapova. – Moscow: Technosp-

here Publ., 2006. – 628 p. (The World of Electronics). – ISBN 5-94836-100-4. – EDN QMQMGR.

10. Automatic piezoelectric parameter meter [Electronic resource] // Federal Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements. – URL: <https://fgis.gost.ru/fund-metrology/cm/mits/8b5c2665-f879-3ecb-3c88-edc4309d2a43> (date of request: 05.15.2026).

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 539.261, 620.187, 691.75
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-33-35

Научная статья
Original article

С. И. Кормилицин, В. А. Солодков

ВЛИЯНИЕ ЗЕРНИСТОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ОСНОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ С ПОКРЫТИЯМИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Владимир Анатольевич Солодков, v-a-solodkov@yandex.ru

Аннотация. Исследование влияния размера карбидных зерен на деформацию твердого сплава и работоспособность инструмента с износостойким покрытием.

Ключевые слова: твердый сплав, износостойкое покрытие, карбидные зерна, деформация твердого сплава

Для цитирования: Кормилицин С. И., Солодков В. А. Влияние зернистости твердосплавных основ на работоспособность инструментов с покрытиями. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 33–35. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-33-35

Информация об авторах:

Сергей Иванович Кормилицин – старший преподаватель кафедры ТМС ВолгГТУ

Scopus ID: 36702814300

e-mail: fpo@vstu.ru

Владимир Анатольевич Солодков – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС ВолгГТУ

Scopus ID: 55386949600

e-mail: v-a-solodkov@yandex.ru

Вклад авторов:

С. И. Кормилицин – определение цели работы, проведение исследований, участие в обсуждении результатов.

В. А. Солодков – обработка результатов исследования, написание текста статьи.

S. I. Kormilitsyn, V. A. Solodkov

THE EFFECT OF THE GRAIN SIZE OF CARBIDE BASES ON THE PERFORMANCE OF COATED TOOLS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Vladimir A. Solodkov, v-a-solodkov@yandex.ru

Abstract. Investigation of the effect of the size of carbide grains on the deformation of a hard alloy and the performance of a tool with a wear-resistant coating.

Keywords: hard alloy, wear-resistant coating, carbide grains, deformation of hard alloy

For citation: Kormilitsyn S. I., Solodkov V. A. The effect of the grain size of carbide bases on the performance of coated tools. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 33–35. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-33-35.

Information about the authors:

Sergey I. Kormilitsyn – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering VSTU

Scopus ID: 36702814300

e-mail: fpo@vstu.ru

Vladimir A. Solodkov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering VSTU

Scopus ID: 55386949600

e-mail: v-a-solodkov@yandex.ru

Contribution of the authors:

Sergey I. Kormilitsyn – defining the purpose of the work, conducting research, participating in the discussion of the results.

Vladimir A. Solodkov – processing the research results, writing the text of the article.

Улучшение режущих свойств инструментов с износостойкими покрытиями возможно не только за счет совершенствования самого покрытия, но и путем подбора оптимальных твердосплавных основ. Причем роль твердосплавных основ в повышении работоспособности инструментов с покрытиями возрастает с повышением прочностных свойств обрабатываемых материалов. В работе [1] показано, что покрытия при точении, обладая высокой износостойкостью, длительное время присутствуют на рабочих поверхностях режущих пластин. При этом рост площадки контакта на задней поверхности происходит за счет деформации твердосплавной основы. Чем выше скорость резания и твердость обрабатываемого материала, тем интенсивнее деформируется твердый сплав. Очевидно, что способность твердосплавных основ сохранять свою форму при резании имеет особо важное значение при обработке закаленных и высокопрочных сталей и сплавов.

В работах [1–5] определены основные параметры, влияющие на интенсивность деформации твердых сплавов. К ним относятся: объемное содержание и степень легирования связующей фазы, теплопроводность твердого сплава и зернистость карбидной составляющей.

В данной работе исследуется влияние зернистости твердого сплава на работоспособность инструментов с покрытиями при резании. Испытания проводились при точении сталей У7А, ШХ15 в состоянии поставки. Скорость резания составляла 2,3...3,3 м/с, подача – 0,3 мм/об, глубина резания – 1,5 мм. Использовались проходные резцы с механическим креплением пластинок 03111-1200408 ГОСТ 19049–80. Резцы в сборе обеспечивали следующую геометрию режущей части: $\gamma = -7^\circ$, $\alpha = 7^\circ$, $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, $r = 0,2$ мм. Испытывались сплавы марок ВК6М, ВК6, ВК6С, ВК6КС.

В качестве критерия интенсивности деформации твердого сплава была выбрана интенсивность роста площадки контакта на задней поверхности. Очевидно, что это возможно только в том случае, когда в течение всего опыта покрытие присутствует на задней поверхности пластины, т. е. площадка контакта образуется практически только за счет деформации твердого сплава. Поэтому стойкостные испытания проводили до ширины площадки контакта на задней поверхности, равной 0,3 мм. При дальнейшем резании происходит прорыв по-

крытия на задней поверхности и интенсивность роста площадки контакта определяется уже не только деформацией твердосплавной основы, но и ее износом.

О влиянии зернистости твердого сплава на интенсивность деформации инструмента при резании указывалось в работе [2], где было сказано, что деформация сплава тем больше, чем крупнее зерно карбидной фазы. О снижении предела текучести твердых сплавов с ростом зернистости и об увеличении их деформации при сжатии отмечалось также в работе [5]. Подробно процесс ползучести при изгибе и сжатии твердых сплавов исследовал Г. С. Креймер [3]. Он установил, что зависимость интенсивности ползучести от величины зерна карбидной фазы имеет экстремальный характер и существенно зависит от уровня приложенных напряжений. Например, при температуре 1070° К и напряжениях до 400...490 МПа увеличение зернистости вольфрамокобальтового сплава с 12 % Со приводит к уменьшению скорости ползучести. Однако при напряжениях более 400...490 МПа наблюдается противоположная зависимость: с ростом зерна карбидной фазы интенсивность ползучести увеличивается. Причем с увеличением температуры кривая «скорость деформации – размер зерна» меняет свой наклон при меньших значениях напряжений. При обработке конструкционных сталей нагрузки на переднюю поверхность составляют 800...1400 МПа [6], а при точении закаленных и высокопрочных сталей – 6000...10000 МПа [7]. Поэтому следует ожидать, что с увеличением размеров зерен карбидной фазы интенсивность деформации твердых сплавов будет возрастать.

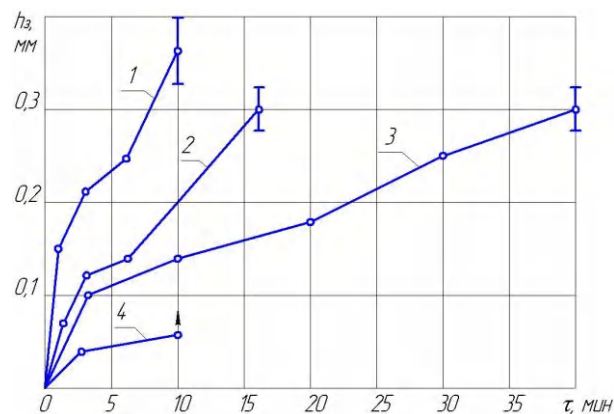


Рис. 1. Кривые роста площадок контакта на задней поверхности режущих пластин: 1 – ВК6КСТ1С; 2 – ВК6СТ1С; 3 – ВК6Т1С; 4 – ВК6МТ1С

В качестве подтверждения этого положения на рис. 1 представлены результаты стойкостных испытаний твердых сплавов различной зернистости, которые показывают, что деформация твердосплавной основы существенно растет с увеличением размеров зерна карбидной фазы.

Период стойкости пластин с увеличением размеров зерна с 1...2 до 2...5 мкм уменьшается в 5 раз. На рис. 2 представлены профилограммы рабочих поверхностей исследуемых пластин после 10 минут резания. Видно, что с ростом зернистости твердосплавной основы растет величина опускания передней поверхности и увеличиваются объемы, охваченные деформацией. У наиболее «пластичных» твердых сплавов ВК6КС и ВК6С наблюдается заметное выпучивание на задней поверхности.

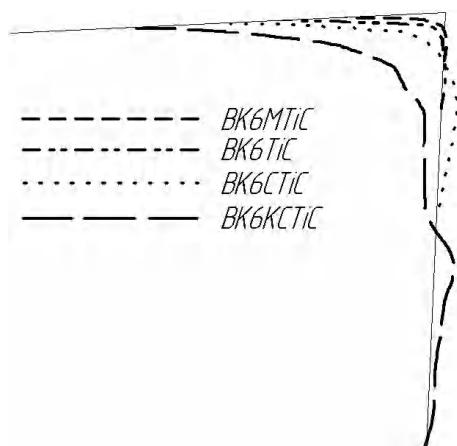


Рис. 2. Профилограммы рабочих поверхностей режущих пластин через 10 минут резания (×200)

Влияние зернистости твердого сплава на интенсивность его деформации, вероятно, связано с сокращением межзеренных границ и увеличением размеров кобальтовых прослоек. Уменьшение межзеренных границ ослабляет каркас, снижает его сопротивление деформиро-

ванию, а увеличение размеров кобальтовых прослоек увеличивает вклад более пластичного кобальта в деформацию твердого сплава.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Талантов, Н. В. Работоспособность твердосплавного инструмента с тугоплавкими покрытиями / Н. В. Талантов, Ю.М. Быков // Физические процессы при резании металлов. – Волгоград, 1984. – С. 37–46.
2. Куклин, Л. Г. Повышение прочности и износостойкости твердосплавного инструмента / Л. Г. Куклин. – М. : Машиностроение, 1968. – 140 с.
3. Креймер, Г. С. Прочность твердых сплавов / Г. С. Креймер. – М. : Metallurgiya, 1971. – 230 с.
4. Третьяков, В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов / В. И. Третьяков. – М. : Metallurgiya, 1976. – 528 с.
5. Ивсен, В. А. К вопросу о зависимости прочности сплавов WC-Co от величины зерна карбидной фазы / В. А. Ивсен // Твердые сплавы и тугоплавкие металлы. – М. : Metallurgiya, 1971. – С. 39–47.
6. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.
7. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – М. : Высшая школа, 1974. – 590 с.

REFERENCES

1. Talantov, N. V., Bykov Yu.M. Efficiency of a carbide tool with refractory coatings. – In collection: Physical processes in metal cutting. Volgograd, 1984, pp. 37–46.
2. Kuklin L.G. et al., Increasing the strength and wear resistance of carbide tools. Moscow: Mashinostroenie, 1968. – 140 p.
3. Kramer, G. S. The strength of hard alloys. Moscow : Metallurgiya, 1971. – 230 p.
4. Tretyakov, V. I. Fundamentals of metal science and technology of production of sintered hard alloys. Moscow: Metallurgiya, 1976. – 528 p.
5. Ivensen, V. A. On the dependence of the strength of WC-Co alloys on the grain size of the carbide phase. – In collection: Hard alloys and refractory metals. – М. : Metallurgy, 1971. – Pp. 39–47.
6. Loladze, T. N. Strength and wear resistance of cutting tools. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1982. – 320 p.
7. Poduraev, V. N. Cutting of hard-to-process materials. Moscow : Vysshaya shkola Publ., 1974. – 590 p.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 539.261, 620.187, 691.75
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-36-38

Научная статья
Original article

С. И. Кормилицин, В. А. Солодков

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ С ПОКРЫТИЯМИ ПРИ ТОЧЕНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Сергей Иванович Кормилицин, fpo@vstu.ru

Аннотация. Исследован механизм износа инструментов с покрытиями при точении труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: твердосплавный инструмент, износостойкое покрытие, труднообрабатываемые материалы, работоспособность инструмента

Для цитирования: Кормилицин С. И., Солодков В. А. Работоспособность инструментов с покрытиями при точении труднообрабатываемых материалов. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 36–38. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-36-38.

Информация об авторах:

Сергей Иванович Кормилицин – старший преподаватель кафедры ТМС ВолгГТУ

Scopus ID: 36702814300

e-mail: fpo@vstu.ru

Владимир Анатольевич Солодков – доцент, канд. техн наук, кафедра ТМС ВолгГТУ

Scopus ID: 55386949600

e-mail: v-a-solodkov@yandex.ru

Вклад авторов:

С. И. Кормилицин – определение цели работы, проведение исследований, участие в обсуждении результатов.

В. А. Солодков – обработка результатов исследования, написание текста статьи.

S. I. Kormilitsyn, V. A. Solodkov

OPERABILITY OF COATED TOOLS WHEN TURNING HARD-TO-PROCESS MATERIALS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Sergey I. Kormilitsyn, fpo@vstu.ru

Annotation. The mechanism of wear of coated tools during turning of hard-to-process materials is investigated.

Keywords: carbide tool, wear-resistant coating, hard-to-process materials, tool operability

For citation: Kormilitsyn S. I., Solodkov V. A. Operability of coated tools when turning hard-to-process materials. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 36–38. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-36-38.

Information about the authors:

Sergey I. Kormilitsyn – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering VSTU

Scopus ID: 36702814300

e-mail: fpo@vstu.ru

Vladimir A. Solodkov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering VSTU

Scopus ID: 55386949600

e-mail: v-a-solodkov@yandex.ru

Contribution of the authors:

Sergey I. Kormilitsyn – defining the purpose of the work, conducting research, participating in the discussion of the results.

Vladimir A. Solodkov – processing the research results, writing the text of the article.

Применение твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями при точении труднообрабатываемых материалов гораздо менее эффективно, чем при обработке конструкционных сталей [1, 2].

Исследования, приведенные в настоящей работе, посвящены изучению механизма износа инструментов с покрытиями при точении труднообрабатываемых материалов.

Обработка труднообрабатываемых матери-

алов характеризуется неустойчивостью процесса резания [3]. Частота неустойчивости растет по мере ухудшения обрабатываемости материалов. Колебания силы резания, температуры, скорости перемещения стружки должны увеличивать износ инструментов прежде всего за счет микросколов, выкрашиваний и отслаивания покрытий.

Для проверки этого положения проводились исследования работоспособности инструментов покрытиями при точении нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T и жаропрочной стали 4X12H8Г8МФБ (ЭИ 481) в диапазоне скоростей резания 1,0...3,0 м/с. В качестве матриц под покрытие применялись твердые сплавы групп ВК, ТК и ТТК. Пластины механически крепились к державке и в процессе резания имели следующую геометрию: $\gamma = -7^\circ$, $\alpha = 7^\circ$, $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, $r = 0,2$ мм. Многослойное покрытие TiC/TiCN/TiN для различных сравниваемых твердосплавных основ наносилось газозащитным методом (ГТ) в одном процессе.

При точении стали 12X18H10T покрытие с передней поверхности уносится в первые минуты резания. В местах отслоения покрытия происходит повышенный износ твердосплавной матрицы, и на передней поверхности инструмента появляются проточкины.

На задней поверхности покрытие сохраняется 10–30 % периода стойкости. Так при скорости резания 2,0 м/с частичное разрушение покрытия на задней поверхности инструмента начинается через 7–12 минут. Сначала покрытие отслаивается по краям контакта задней поверхности инструмента с поверхностью резания, где также образуются проточкины.

При продолжении резания покрытие уносится и с других участков задней поверхности,

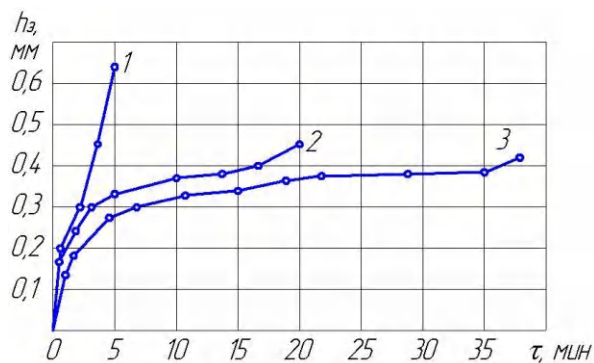


Рис. 1. Кривые роста контактных площадок по задней поверхности (сталь 12X18H10T, $V = 2,0$ м/с, $S = 0,3$ мм/об, $t = 1,5$ мм): 1 – BK6; 2 – BK6 TiC/TiCN/TiN; 3 – T14K8 TiC/TiCN/TiN

после чего с обрабатываемым материалом начинает контактировать твердосплавная матрица. Поэтому после разрушения покрытия на рабочих поверхностях инструмента большую стойкость будет иметь инструмент с более износостойкой матрицей, что подтверждается результатами стойкостных испытаний (рис. 1).

С увеличением скорости резания частота неустойчивости процесса стружкообразования увеличивается, и время, в течение которого покрытие сохраняется на контактных поверхностях инструмента, уменьшается. Поэтому с увеличением скорости резания разница в стойкости между инструментами с покрытием и без него уменьшается. Подтверждением этому служат кривые износа сплава T14K8 с покрытием и без него (рис. 2).

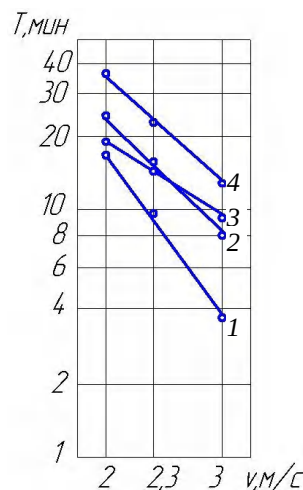


Рис. 2. Влияние скорости резания на стойкость режущих пластин (сталь 12X18H10T, $S = 0,3$ мм/об, $t = 1,5$ мм): 1 – BK6 TiC/TiCN/TiN; 2 – TT7K9 TiC/TiCN/TiN; 3 – T14K8; 4 – T14K8 TiC/TiCN/TiN

При точении стали ЭИ 481 частота возникающей неустойчивости процесса стружкообразования выше, чем при обработке нержавеющей стали 12X18H10T. Сила и температура резания изменяются в большей степени, поэтому разрушение покрытия на рабочих поверхностях инструмента, как на передней, так и на задней, происходит в начальный момент резания. Уже через 30 секунд точения покрытие уносится с контактных поверхностей, и с обрабатываемым материалом начинает контактировать твердосплавная матрица. Очевидно, что при таких условиях обработки покрытия не могут существенно влиять на изменение стойкости пластин. Об этом свидетельствуют данные стойкостных испытаний, представленные на рис. 3.

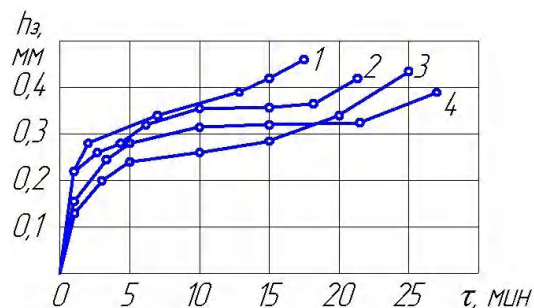


Рис. 3. Кривые роста контактных площадок по задней поверхности (сталь 4Х12Н8Г8МФБ (ЭИ 481), $V = 1,0$ м/с, $S = 0,3$ мм/об, $t = 1$ мм):
1 – BK6; 2 – BK6 TiC/TiCN/TiN; 3 – T14K8;
4 – T14K8 TiC/TiCN/TiN

Таким образом, роль покрытий при обработке нержавеющей и жаропрочных сталей сводится к защите твердосплавной матрицы от интенсивного износа в начальный момент резания. Очевидно, что чем дольше покрытие будет держаться на рабочих поверхностях инструмента, тем выше будет его стойкость.

В этих условиях приобретают определяющее значение повышенная прочность сцепле-

ния покрытия с матрицей, пластичность покрытия, а также износостойкость самой твердосплавной матрицы, так как она контактирует большую часть периода стойкости с обрабатываемым материалом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Торопченов, В. С. Режущие свойства твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями / В. С. Торопченов, Э. Ф. Эйхманс // Твердые сплавы, № 18. – М.: Металлургия, 1978. – С. 31–36.
2. Талантов, Н. В. Исследование и классификация видов неустойчивости процесса резания / Н. В. Талантов, Н. П. Черемушников // Технология машиностроения и автоматизация производственных процессов. – Волгоград, 1978. – С. 49–62.

REFERENCES

1. Toropchenov, V. S., Eikhmans E. F. Cutting properties of carbide plates with wear-resistant coatings. – In collection: Hard alloys, No. 18. Moscow, Metallurgy, 1978, pp. 31–36.
2. Talantov, N. V., Cheremushnikov N. P. Investigation and classification of types of instability of the cutting process. – In collection: Technology of machine building and automation of production processes. – Volgograd, 1978, pp. 49–62.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 658.53:621.316:519.237.8
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-39-43

Научная статья
Original article

А. Г. Алехин

МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ В ЗАДАЧЕ НОРМИРОВАНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ СБОРКИ ШКАФОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОМПЛЕКТНЫХ УСТРОЙСТВ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Алексей Геннадьевич Алехин, alekhin_edu@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается научно-методический подход к разработке математической модели оценки трудоемкости изготовления низковольтных комплектных устройств (НКУ) на стадии конструкторско-технологической подготовки производства. Обоснована актуальность перехода от эмпирического хронометража к статистическим методам прогнозирования. Предложена методика, базирующаяся на аппарате множественной линейной регрессии, реализованной методом наименьших квадратов (МНК) в матричной форме. Представлен алгоритм вычисления коэффициентов регрессии и практический пример валидации модели для типового шкафа управления. Проанализированы допущения и ограничения применения методики в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Ключевые слова: низковольтное комплектное устройство (НКУ), нормирование труда, метод наименьших квадратов, матричное исчисление, регрессионный анализ, технологическая трудоемкость

Для цитирования: Алехин А. Г. Метод наименьших квадратов в задаче нормирования трудоемкости сборки шкафов низковольтных комплектных устройств. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 39–43. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-39-43.

Информация об авторе:

Алексей Геннадьевич Алехин – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП ВолгГТУ
orcid.org/0000-0002-7258-6624
e-mail: alekhin_edu@mail.ru

A. G. Alekhin

THE LEAST SQUARES METHOD IN THE PROBLEM OF LABOUR INTENSITY STANDARDISATION FOR THE ASSEMBLY OF LOW-VOLTAGE SWITCHGEAR CABINETS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Aleksey G. Alekhin, alekhin_edu@mail.ru

Abstract. The article examines a scientific and methodological approach to developing a mathematical model for assessing the labour intensity of manufacturing low-voltage switchgear assemblies (LVSA) at the stage of design and technological preparation of production. The relevance of transitioning from empirical timekeeping to statistical forecasting methods is substantiated. A methodology is proposed, based on the apparatus of multiple linear regression implemented using the least squares method (LSM) in matrix form. An algorithm for calculating regression coefficients and a practical example of model validation for a standard control cabinet are presented. Assumptions and limitations of applying the methodology in single-unit and small-batch production environments are analysed.

Keywords: low-voltage switchgear assembly (LVSA), labour standardisation, least squares method, matrix calculus, regression analysis, technological labour intensity

For citation: Alekhin A. G. The least squares method in the problem of labour intensity standardisation for the assembly of low-voltage switchgear cabinets. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 39–43. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-39-43.

Information about the authors:

Aleksey G. Alekhin – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
orcid.org/0000-0002-7258-6624
e-mail: alekhin_edu@mail.ru

Введение

Эффективность производственного планирования на предприятиях электротехнической отрасли напрямую коррелирует с точностью прогнозирования временных затрат на изготовление единицы продукции. В секторе изготовления низковольтных комплектных устройств (НКУ) задача оперативного расчета трудоемкости осложняется уникальностью практически каждого заказа. Комбинаторика используемых комплектующих – от типов автоматических выключателей и реле до архитектуры программируемых контроллеров и конфигурации шинных мостов порождает множество вариантов исполнения шкафа, для которых неприменимы жесткие таблицы типовых норм времени.

Классический подход, базирующийся на хронометражных наблюдениях и микроэлементном нормировании, в условиях единичного производства демонстрирует низкую экономическую эффективность. Трудоемкость проведения замеров для каждого нового типоразмера шкафа сопоставима с трудоемкостью самой сборки, а полученные эмпирические данные теряют прогностическую ценность при незначительном изменении состава схемы. Возникает объективная потребность в создании математической модели, способной аппроксимировать зависимость времени сборки от вектора конструктивно-схемных признаков.

Анализ научно-технической литературы [1, 2] показывает, что наиболее адекватным инструментом для решения подобных производственных задач является регрессионный анализ, реализуемый методом наименьших квадратов (МНК). Применение МНК в матричной форме (1) обладает рядом преимуществ, среди которых следует выделить:

- компактность записи при большом числе наблюдений;
- простоту программной реализации; возможность рекуррентного уточнения модели по мере накопления статистических данных.

Предмет исследования. Процесс технологического нормирования сборочных операций в производстве низковольтных комплектных устройств (НКУ) в условиях единичного и мелкосерийного типа производства.

Цель работы. Разработка и апробация аналитической методики расчета плановой трудоемкости изготовления шкафов НКУ на основе аппарата множественной линейной регрессии, реализованной методом наименьших квадратов в матричной форме.

Методология

В основу исследования положен метод наименьших квадратов (МНК), позволяющий получить вектор несмещенных оценок коэффициентов уравнения регрессии путем решения нормальной системы уравнений. Для обеспечения вычислительной устойчивости и масштабируемости модели применена матричная форма записи

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (1)$$

Верификация модели выполнена с привлечением методов дисперсионного анализа и оценки статистической значимости по t -критерию Стьюдента.

Результаты. Предложена регрессионная модель, учитывающая не только габаритные характеристики шкафа, но и насыщенность элементами управления, релейной автоматики и микропроцессорной техники. Показано, что включение в модель таких предикторов, как количество контроллеров и сигнальной арматуры, повышает коэффициент детерминации R^2 до значений, превышающих 0,97.

Практическая значимость. Методика позволяет оперативно определять плановую трудоемкость заказа на стадии подготовки технико-коммерческого предложения и формирования сменно-суточных заданий, исключая субъективизм экспертных оценок.

Материалы и методы исследования

Примем в качестве рабочей гипотезы предположение об аддитивном характере вклада каждой технологической операции в общую продолжительность сборочного цикла. Тогда расчетное время сборки $\hat{y}$ может быть представлено в виде линейной комбинации независимых переменных x_j [3]:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j x_j + \varepsilon, \quad (2)$$

где β_0 – свободный член (интерпретируется как подготовительно-заключительное время и время на обслуживание рабочего места); β_j – подлежащие оценке параметры модели (удельные нормы времени на единицу j -го фактора); ε – случайная составляющая, отражающая влияние неучтенных факторов.

Для оценки вектора коэффициентов $B = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m)^T$ располагаем выборкой из n ранее выполненных заказов, по которым известны фактические затраты времени y_i и соответствующие им значения предикторов $x_{i1}, \dots, x_{im}$.

В матричной форме исходная система уравнений записывается как

$$Y = XB + \varepsilon, \quad (3)$$

где Y – вектор-столбец наблюдений размерности n ; X – матрица плана (матрица регрессоров) размерности $n \times (m + 1)$, первый столбец которой состоит из единиц; ε – вектор ошибок.

В соответствии с теоремой Гаусса–Маркова [2], наилучшей линейной несмещенной оценкой (Best Linear Unbiased Estimator, BLUE) вектора B является решение нормального уравнения, минимизирующее сумму квадратов отклонений:

$$S = \sum (y_i - \hat{y})^2, \quad (4)$$

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (5)$$

Вычислительная процедура сводится к последовательному выполнению операций: транспонирования исходной матрицы, матричного умножения, обращения квадратной матрицы Грама ($X^T X$) и умножения результата на вектор $X^T Y$. Следует отметить, что для корректного обращения матрицы ($X^T X$) необходимо, чтобы число наблюдений n превышало число оцениваемых параметров $(m + 1)$, а столбцы матрицы X были линейно независимы (отсутствие строгой мультиколлинеарности).

Спецификация переменных для технологического процесса сборки НКУ

Учет специфики электромонтажного производства требует включения в модель предикторов, отражающих трудоемкость основных технологических переходов. В отличие от упрощенных моделей, оперирующих только массогабаритными характеристиками, автором предлагается semifакторная спецификация, детализирующая состав шкафа:

x_1 – количество монтажных панелей (секций каркаса), шт. Показатель механической сборки корпуса и установки несущих конструкций;

x_2 – количество силовых автоматических выключателей, шт. Учитывает трудоемкость разделки силового кабеля, опрессовки наконечников и механической фиксации аппаратов на DIN-рейке;

x_3 – количество точек вторичной коммутации (клеммных зажимов), шт. Интегральный показатель объема работ по расключению контрольных цепей, маркировке и прозвонке;

x_4 – количество программируемых логических контроллеров (ПЛК), шт. Фактор, выделенный ввиду необходимости выполнения пусконаладочных операций, подключения цепей питания, интерфейсных кабелей и заземления;

x_5 – количество дискретных органов управления (кнопок, переключателей), шт. Учитывает операции механической установки в отверстия двери и пайки (или обжима) контактов;

x_6 – количество ламп сигнализации (светосигнальной арматуры), шт.;

x_7 – количество промежуточных реле, шт. Показатель насыщенности схемы релейной логикой.

Данный набор переменных позволяет описать конфигурацию шкафа автоматики с достаточной степенью детализации, охватывая как силовую часть, так и вторичные цепи управления. При этом необходимо отметить, что представленная модель является упрощением модели, реализованной нами в компании ООО «ЕРС-КОМПЛЕКТ».

Результаты исследования и их обсуждение

Формирование статистической выборки

Для проведения вычислительного эксперимента была сформирована обучающая выборка, содержащая данные о семи выполненных проектах НКУ ($n = 7$). Выборка отражает различные конфигурации шкафов: от простых релейных ящиков до шкафов управления на базе ПЛК. Исходные данные представлены в таблице.

Данные хронометража для идентификации параметров модели

№	Y , факт (мин)	x_1 Панели	x_2 Автоматы	x_3 Клеммы	x_4 ПЛК	x_5 Кнопки	x_6 Лампы	x_7 Реле
1	380	1	3	60	1	10	5	15
2	295	1	2	50	0	8	4	12
3	610	2	5	110	1	15	8	25
4	520	1	4	85	1	12	6	20
5	710	2	6	130	2	20	10	30
6	440	1	3	70	1	10	5	18
7	340	1	2	55	0	6	3	10

Результаты вычислений

Обработка данных методом матричного МНК (реализация выполнена в среде Python

3.12 с использованием библиотек NumPy и Statsmodels) позволила получить следующее уравнение регрессии:

$$\hat{Y} = 85,2 + 145,1x_1 + 31,8x_2 + 1,7x_3 + 48,3x_4 + 4,1x_5 + 3,8x_6 + 2,5x_7 \quad (6)$$

Для удобства использования в производственной практике коэффициенты округлены до десятых долей.

Анализ коэффициентов показывает:

- наличие контроллера x_4 добавляет около 48 минут, что включает не только физический монтаж, но и первичную настройку связи;
- установка элементов на двери шкафа (x_5 и x_6) требует примерно в 2 раза больше времени на единицу, чем монтаж стандартной клеммы, что обусловлено слесарной подгонкой и пайкой в труднодоступных местах;
- промежуточное реле (x_7) в среднем монтируется на 47 % дольше одиночного клеммного зажима.

Оценка качества модели

Для подтверждения адекватности разработанной модели были рассчитаны следующие статистические критерии:

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,974$. Полученное значение свидетельствует о том, что 97,4 % вариации зависимой переменной Y объясняется включенными в модель факторами. Модель обладает высокой точностью аппроксимации.

Скорректированный $R_{adj}^2 = 0,965$. Значение подтверждает отсутствие проблемы избыточности модели – добавление новых переменных улучшает качество прогноза.

F-тест. Расчетное значение критерия Фишера $F = 106,8$ при критическом $F_{крит}(7,7; \alpha = 0,05) = 3,79$. Нулевая гипотеза о равенстве нулю всех коэффициентов регрессии отвергается с вероятностью ошибки $p < 0,001$.

Пример прогнозирования трудоемкости нового заказа

В качестве демонстрации прикладного применения методики рассчитаем время изготовления гипотетического шкафа автоматики, техническое задание на который содержит следующие параметры:

- x_1 (Панели): 2 шт.;
- x_2 (Автоматы): 4 шт.;
- x_3 (Клеммы): 100 шт.;
- x_4 (Контроллер): 1 шт.;
- x_5 (Кнопки): 10 шт.;
- x_6 (Лампы): 5 шт.;
- x_7 (Реле): 20 шт.

Подстановка значений в уравнение регрессии дает:

$$T = 85,2 + 145,1 \cdot 2 + 31,8 \cdot 4 + 1,7 \cdot 100 + 48,3 \cdot 1 + 4,1 \cdot 10 + 3,8 \cdot 5 + 2,5 \cdot 20 \quad (7)$$

$$T = 830,9 \text{ минут} \quad (8)$$

Вывод: Прогнозируемая трудоемкость сборки составляет 831 минуту (13 часов 51 минуту). С учетом поправочного коэффициента на регламентированные перерывы ($K_{отл} = 1,12$) штучно-калькуляционное время составит 15,5 нормо-часов. Полученное значение может быть использовано в качестве плановой основы для расчета заработной платы и загрузки производственного участка.

Выводы

Предложенная в работе методика, основанная на матричной реализации метода наименьших квадратов, позволяет эффективно решать задачу оперативного нормирования трудоемкости сборки шкафов НКУ в условиях единичного и мелкосерийного производства. Научная

новизна подхода заключается в формализации влияния компонентов микропроцессорных систем управления (ПЛК) и элементов интерфейса оператора на итоговое время изготовления изделия.

Практическая значимость работы состоит в возможности интеграции полученного регрессионного уравнения в корпоративные информационные системы (ERP/MES) для автоматизации процессов расчета плановой себестоимости и формирования производственных графиков.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение списка предикторов за счет введения фиктивных переменных, характеризующих сложность электрических схем и уровень защиты оболочки (IP).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – ISBN 5-217-03108-5. – М. : Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Вильямс, 2016. – 912 с.
3. Montgomery, D. C., Peck E. A. Introduction to Linear Regression Analysis. Wiley, 2012. 672 p.

REFERENCES

1. Suslov, A. G., Dalsky A. M. Scientific Foundations of Mechanical Engineering Technology. ISBN 5-217-03108-5. Moscow: Mechanical Engineering, 2002. 684 p.
2. Draper, N., Smith G. Applied Regression Analysis. Moscow: Williams, 2016. 912 p.
3. Montgomery, D. C., Peck E. A. Introduction to Linear Regression Analysis. Wiley, 2012. 672 p.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-43-47

Научная статья

Original article

Ю. Ю. Гордейчик, В. Г. Барабанов

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ
НА БАЗЕ ПЛК ОВЕН 210 И НМИ ИНТЕРФЕЙСА WEINTEK**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Юрий Юрьевич Гордейчик, wowyellowgreenbanana@gmail.com

Аннотация. При эксплуатации силовых агрегатов в составе систем управления канализационных насосных станций (КНС) возникает необходимость обеспечения равномерного износа оборудования. Для обеспечения попеременной работы насосов и повышения надежности системы была проведена модернизация автоматизированной системы управления насосной станцией. Предложены алгоритмы выбора индекса насосов КНС. Разработаны электрические схемы подключения и программный код. Описанные решения позволяют повысить надежность работы системы управления КНС.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер ОВЕН, схема электрическая, контактно-релейная схема, насос, шкаф управления, надежность

Для цитирования: Гордейчик Ю. Ю., Барабанов В. Г. Разработка системы управления насосной станцией на базе ПЛК ОВЕН 210 и НМИ интерфейса Weintek. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 43–47. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-43-47.

Информация об авторах:

Юрий Юрьевич Гордейчик – студент кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: wowyellowgreenbanana@gmail.com

Виктор Геннадьевич Барабанов – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП ВолгГТУ

orcid.org/0009-0007-0465-0923

e-mail: vbarabanov@vstu.ru

Вклад авторов:

Ю. Ю. Гордейчик – разработка алгоритмов выбора индекса насосов по наработке и простою, разработка электрической схемы подключения.

В. Г. Барабанов – определение цели работы, написание текста статьи, экспертная оценка.

Yu. Yu. Gordeychik, V. G. Barabanov

**DEVELOPMENT OF A PUMP STATION CONTROL SYSTEM BASED
ON THE OWEN 210 PLC AND THE WEINTEK HMI INTERFACE**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Yuri Yu. Gordeychik, wowyellowgreenbanana@gmail.com

Abstract. When power units are used as part of the control systems of sewage pumping stations (SPS), it is necessary to ensure uniform wear and tear of the equipment. To ensure the alternate operation of the pumps and increase the reliability of the system, the automated control system of the pumping station was upgraded. Algorithms for selecting the index of the SPS pumps were proposed. Electrical connection diagrams and software code were developed. These solutions help to increase the reliability of the SPS control system.

Keywords: Owen programmable logic controller, electrical circuit, contact relay circuit, pump, control cabinet, reliability

For citation: Gordeychik Yu. Yu., Barabanov V. G. Development of a pump station control system based on the Owen 210 PLC and the Weintek HMI interface. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 43–47. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-43-47.

Information about the authors:

Yuri Yu. Gordeychik – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: wowyellowgreenbanana@gmail.com

Victor G. Barabanov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

orcid.org/0009-0007-0465-0923

e-mail: vbarabanov@vstu.ru

Contribution of the authors:

Yuri Yu. Gordeychik – development of algorithms for selecting pump indexes based on usage and downtime, and development of an electrical connection diagram.

Victor G. Barabanov – defining the purpose of the work, writing the article, and expert evaluation.

Введение

Эффективное функционирование систем водоотведения обеспечивает экологическую безопасность и санитарное благополучие городов. Исправная работа всех элементов системы гарантирует бесперебойное обслуживание зданий общественного и жилого назначения [1]. В традиционных способах управления, таких как контактно-релейная схема, возникает проблема равномерного износа силовых агрегатов. При больших нагрузках и резких увеличениях уровня воды в резервуаре дополнительные силовые агрегаты играют роль лишь вспомогательных устройств, когда основной самый первый насос работает от начала и до конца процесса предотвращения переполнения приемного лотка от сточных вод.

Для предотвращения преждевременного износа основного насоса и повышения надежности системы в целом предложено провести модернизацию системы управления КНС. Для этого необходимо разработать алгоритм выбора индекса насосов по простоя и наработке и обозначить требования к функциональности отдельных ее элементов.

Разработка алгоритма выбора индекса насосов и панели оператора

Перед подключением всех необходимых элементов к ПЛК необходимо разработать логику управления насосами. Также необходимо разработать удобную панель управления для оператора HMI интерфейс Weintek. На рис. 1 изображен общий вид проекта, а также интерфейс панели управления оператора.

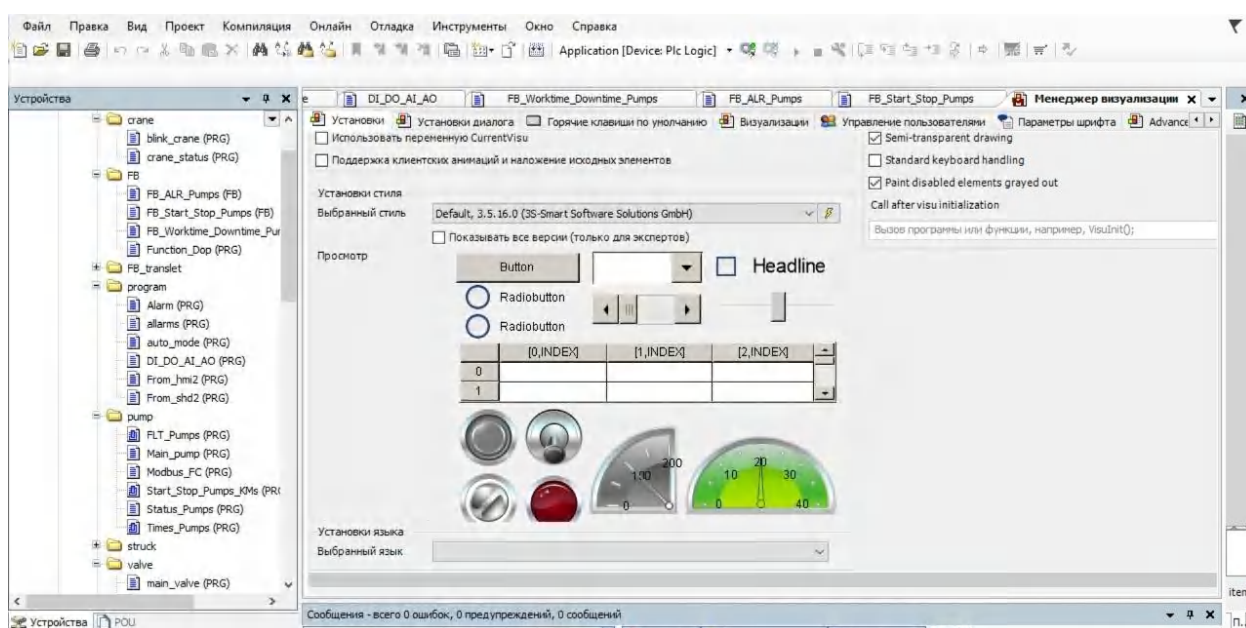


Рис. 1. Вид проекта и панель управления оператора

Рассмотрим панель управления оператора подробнее. Первое, что встречает оператора, это таблица с насосами и их параметрами. Индекс насоса отсчитывается с 0, таким образом для трех насосов будут использоваться индексы 0, 1, 2. В нашем проекте есть два основных насоса и один вспомогательный, если основные не будут справляться или выйдут из строя.

Также на панели оператора мы можем видеть две шкалы: от 0 до 200 для контроля температуры обмоток двигателей и от 0 до 40 для контроля давления в магистральной, чтобы предотвратить сухой ход работы насосов.

Если мы посмотрим в дерево проекта, то мы увидим файл под названием `blink_crane_status`, который содержит программный код управления задвижками. Индекс каждой задвижки так же, как и насоса, начинается с 0. В нашем проекте есть две задвижки с индексом 0 и 1 соответственно. В нашей программе у задвижки есть пять состояний: открыта, закрыта, в процессе закрытия, в процессе открытия и авария. Состояние задвижки запоминает специальный аргумент `F_TRIG` (триггер). Опираясь на состояние задвижки, программа может

грамотно оценивать состояние системы и своевременно уведомлять оператора о возможных сбоях.

В файлах `FB_ALR_Pumps`, `FB_Start_Stop_Pumps`, `FB_Worktime_Downtime_Pumps`, `Function_Dop` находится программный код с выявлением и назначением аварий на каждое устройство, контроль запуска каждого насоса, подсчет времени наработки и простоя каждого насоса, сброс аварийных состояний при повторном запуске соответственно [3].

В файлах `auto_mode`, `DI_DO_AI_AO`, `FLT_Pumps`, `Status_Pumps` находится программный код, который управляет автоматическим режимом работы, дискретными и аналоговыми входами и выходами ПЛК, сбор и анализ аварий и состояние каждого насоса соответственно.

В файле `Main_pump` находится программный код, который осуществляет попеременный запуск насосов исходя из их наработки или простоя, а также включает или удаляет насос из каскада (попеременное включение агрегатов). На рис. 2 приведен программный код алгоритма выбора индекса насосов канализационной насосной станции [3].

```
FOR i := 0 TO n DO
    IF GVL.bs.AUTO_mode AND GVL.Pump[i].Status_Running AND NOT GVL.Pump[i].ALR AND (max_worktime_hours <= GVL.Pump[i].WRK_Hours) THEN
        max_worktime_hours := GVL.Pump[i].WRK_Hours;
        j := i;
    END_IF;

    IF GVL.bs.AUTO_mode AND NOT GVL.Pump[i].Status_Running AND NOT GVL.Pump[i].ALR AND NOT GVL.Pump[i].xBlock AND (max_downtime_hours <= GVL.Pump[i].DWN_Hours) THEN
        max_downtime_hours := GVL.Pump[i].DWN_Hours;
        k := i;
    END_IF;

    IF GVL.Pump[i].Status_Running THEN
        pumps_in_running := pumps_in_running + 1;
    END_IF;
END_FOR
```

Рис. 2. Программный код алгоритма выбора индекса насосов КНС

`GVL` в проверке условий *if* обозначает имя файла, откуда мы берем информацию о глобальных переменных проекта [3]. Запись в каскад и удаление из него насоса с определенным индексом происходит следующим образом.

Принцип работы согласно кода: цикл `FOR`, который перебирает индексы всех существующих подключенных насосов, в нашем случае от 0 до 2. В этом цикле есть три условия. Первое условие проверяет наработку насосов. Если насос работает в автоматическом режиме (`AUTO_mode`), имеет статус «в работе» (`Status_Running`), не находится в аварии (`ALR`), «максимальное время наработки» насоса меньше, чем время наработки насоса с текущим индексом, то мы обновляем значение переменной «максимальное время наработки» и записываем индекс са-

мого долго работающего насоса в переменную `j`.

Второе условие работает следующим образом. Если насос работает в автоматическом режиме (`AUTO_mode`), имеет статус «НЕ в работе» (`NOTStatus_Running`), не находится в аварии (`ALR`), не заблокирован (`xBlock`), «максимальное время простоя» насоса меньше, чем время простоя насоса с текущим индексом, то мы обновляем значение переменной «максимальное время простоя» и записываем индекс самого долго отдыхающего насоса в переменную `k`.

Когда индексы самого долго работающего и самого долго отдыхающего насосов выявлены, необходимо оперативно включать и отключать нужный насос по мере необходимости. Для этого мы используем программный код, который приведен на рис. 3.

```

// Включение насоса с максимальным простоем
IF PV.xStart_System AND (counter_need_pumps > pumps_in_running) THEN
  IF max_downtime_hours > 0 AND NOT Flag_one_start THEN
    GVL.Pump[k].xLocal_Start := TRUE; // используем сохраненный индекс k
    Flag_one_start := TRUE;
  END_IF
END_IF

// Отключение насоса с максимальной наработкой или аварией
IF PV.xStart_System AND (counter_need_pumps < pumps_in_running) OR (R_TRIG_Switch_Pumps.Q AND (counter_need_pumps = 1)) THEN
  IF NOT Flag_one_stop THEN
    GVL.Pump[j].xLocal_Start := FALSE; // используем сохраненный индекс j
    Flag_one_stop := TRUE;
  END_IF
END_IF

```

Рис. 3. Включение и выключение насоса с необходимым индексом

Данный программный код работает следующим образом. Здесь проверяется два каскадных условия. Первое условие проверяет следующее: если система запущена, количество необходимых насосов больше, чем количество уже работающих насосов, то: если максимальное время простоя больше 0 и насос не имеет флаг того, что он сейчас работает, мы запускаем насос с индексом k (максимальный простой) и указываем флаг работы в состояние *True*.

Второе условие проверяет следующее: если система запущена, количество необходимых насосов меньше, чем количество уже работающих насосов, или триггер смены насосов включен (включается только при работе больше одного насоса), и требуемое количество насосов равно единице, то: если насос не имеет флаг того, что он сейчас остановлен, мы останавливаем насос с индексом j (максимальная наработка) и указываем флаг остановки в состояние *True*.

Разработка электрической схемы подключения

Центральным элементом канализационной насосной станции является программируемый логический контроллер ОВЕН 210. К нему подходит провод на питание 24 В, две пары проводов сечением 1 мм для подключения датчиков уровня, две пары проводов сечением 2,5 мм для подключения магнитных пускателей насосов, пара проводов сечением 2,5 мм для подключения задвижки регулирующей с электроприводом, провод сечением 1 мм для подключения датчиков температуры, а также три провода сечением 1 мм для подключения датчика давления и сигнальной лампочки. Датчики с помощью модуля аналогового ввода подключаются к ПЛК через Ethernet, датчики уровня подключаются в дискретные входы, промежуточное реле подключается в дискретные выходы, задвижка подключается через интерфейс RS-485,

питание 24 вольта подается на специальный разъем. НМИ панель оператора также подключается с помощью Ethernet.

Элементы, подключаемые к ПЛК:

а) MB210-101 модуль аналогового ввода с универсальными входами (AI) подключается в разъем Ethernet;

б) промежуточное реле РП21-004-УХЛ4-01 подключается к дискретному выходу для того, чтобы ПЛК мог управлять запуском насосов;

в) датчики ПСУ-1 подключаются к дискретным входам, общий провод питания выходит из SS2;

г) задвижка через ECV1-M-RR-RS подключается к ПЛК по интерфейсу RS-485;

д) включение датчиков и сигнальной лампочки происходит по дискретным выходам.

Остановимся подробнее на подключении силового агрегата (насоса) к ПЛК через магнитный пускатель и промежуточное реле. Электрическая схема подключения изображена на рис. 4.

Подключить насос напрямую к ПЛК ОВЕН 210 невозможно по ряду причин [2]. Подключение стоит начать с промежуточного реле РП21-004-УХЛ4-01. Это устройство будем подключать к дискретным выходам ПЛК. Для этого проведем провод из фазы L1 на вход DO1A. Затем подключим вход DO1B к разъему A0 промежуточного реле. Чтобы замкнуть получившуюся цепь, соединим разъем реле A1 с землей PEN. При замыкании цепи между DO1A и DO1B подадим ток на промежуточное реле, что приведет к его срабатыванию.

Когда промежуточное реле сработает, это приведет к замыканию контакта, который запустит в действие магнитный пускатель. После этого магнитный пускатель замкнет контакты T1...T6. Если автоматический выключатель QF2 замкнут, то это действие запустит асинхронный электродвигатель нашего насоса.



The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 004.42:681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-48-51

Научная статья

Original article

*К. А. Драпак, В. В. Авраменко***МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОГРАММНОГО КОДА****Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Кристина Алексеевна Драпак, loldra@yandex.ru

Аннотация. Предложен метод проектирования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления на основе анализа структуры программного кода и автоматизированного формирования блок-схем алгоритмов управления. Метод обеспечивает преобразование программных конструкций в унифицированные графические элементы, пригодные для включения в состав проектной документации АСУ. Разработана структура программного комплекса, включающего модули анализа кода, формирования внутренней модели алгоритма, компоновки блок-схемы и экспорта результата. Проверка метода выполнена на типовых структурах управляющих алгоритмов: линейной последовательности операций, условном переходе, цикле и вложенной управляющей конструкции.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, алгоритмическое программное обеспечение, проектирование АСУ, программные модули управления, блок-схемы алгоритмов, анализ программного кода, автоматизация проектирования

Для цитирования: Драпак К. А., Авраменко В. В. Метод проектирования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления на основе анализа программного кода. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 48–51. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-48-51.

Информация об авторах:**Кристина Алексеевна Драпак** – преподаватель кафедры АПП ВолгГТУ

orcid.org/0009-0000-4830-2188

e-mail: loldra@yandex.ru

Владислав Витальевич Авраменко – студент кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: vavramenko156@gmail.com

Вклад авторов:

К. А. Драпак – постановка научной задачи, участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

В. В. Авраменко – разработка программной реализации, проведение вычислительных проверок, подготовка примеров, иллюстраций, написание текста статьи.

*К. А. Drapak, V. V. Avramenko***A METHOD FOR DESIGNING ALGORITHMIC SOFTWARE FOR AUTOMATED
CONTROL SYSTEMS BASED ON PROGRAM CODE ANALYSIS****Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Kristina A. Drapak, loldra@yandex.ru

Abstract. A method is proposed for designing algorithmic software for automated control systems based on the analysis of program code structure and the automated generation of flowcharts for control algorithms. The method enables the transformation of programming constructs into unified graphical elements suitable for inclusion in the design documentation of automated control systems. The structure of a software package has been developed, comprising modules for code analysis, formation of an internal algorithm model, flowchart layout, and result export. The method was tested on typical structures of control algorithms: a linear sequence of operations, a conditional branch, a loop, and a nested control structure.

Keywords: automated control system, algorithmic support, flowchart, Python, code analysis, software visualization, automation

For citation: Drapak K. A., Avramenko V. V. A method for designing algorithmic software for automated control systems based on program code analysis. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 48–51. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-48-51.

Information about the authors:

Kristina A. Drapak – Lecturer, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
orcid.org/0009-0000-4830-2188
e-mail: loldra@yandex.ru

Vladislav V. Avramenko – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
e-mail: vavramenko156@gmail.com

Contribution of the authors:

Kristina A. Drapak – setting a scientific task, participating in the discussion of results, and editing the article text.

Vladislav V. Avramenko – development of software implementation, computational checks, preparation of examples and illustrations, and writing the article.

Одним из ключевых этапов проектирования автоматизированных систем управления является разработка алгоритмического обеспечения. Оно определяет логику обработки информации, выполнения циклических процедур и принятия решений. Формализованное представление алгоритмов имеет важное значение при разработке и документировании программных модулей управления. Для документирования таких процедур используется графическое представление алгоритмов, позволяющее описывать логику работы программных модулей управления. Блок-схемы используются для представления структуры алгоритмов управления и подготовки документации алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления.

На практике подготовка блок-схем алгоритмов управления часто выполняется вручную после разработки программного кода. Такой подход приводит к увеличению трудоемкости проектного документирования, неоднозначности графического представления алгоритмов и риску расхождения между фактической программной реализацией. При модернизации и сопровождении автоматизированных систем управления возникает необходимость постоянной актуализации алгоритмической документации в соответствии с изменениями программных модулей.

Автоматизированная система рассматривается как совокупность персонала и комплекса средств автоматизации, реализующих информационную технологию выполнения установленных функций [1]. В составе автоматизированных систем выделяется алгоритмическое обеспечение, которое задает логику обработки информации, принятия решений и формирования управляющих воздействий. Поэтому разработка средств автоматизированного представления алгоритмов является актуальной задачей проектирования АСУ.

Работы по проектированию автоматизированных систем показывают, что трудоемкость

подготовки моделей и управляющих процедур снижается, когда описание алгоритмов переводится в формализованное представление. В качестве исходной программной реализации в работе рассматриваются фрагменты кода на языке Python, который используется как инструмент описания логики управляющих процедур. При этом предлагаемый подход не ограничивается визуализацией текста программы, а направлен на выделение типовых элементов алгоритмического обеспечения: операций ввода-вывода, действий процесса, условий, циклов, начала и завершения алгоритма.

Целью работы является повышение эффективности проектирования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления за счет разработки метода автоматизированного формирования блок-схем алгоритмов управления на основе анализа структуры программного кода.

Научная новизна работы заключается в разработке метода автоматизированного формирования элементов алгоритмического обеспечения АСУ на основе анализа программного кода.

Материалы и методы исследования

Проведен анализ существующих средств представления алгоритмов, используемых при разработке программного и алгоритмического обеспечения АСУ. Анализ показал, что большинство применяемых решений предполагает ручное построение моделей или требует дополнительного описания алгоритма пользователем. В результате возрастает трудоемкость подготовки алгоритмической документации и повышается вероятность расхождения между документацией и программной реализацией.

В основу метода положено преобразование исходного кода во внутреннюю модель алгоритма. На этом уровне сохраняются операции, условия, циклы и связи между ними; после этого модель передается модулям компоновки, визуализации и экспорта. Разработанный про-

граммный комплекс реализует предложенный метод и может рассматриваться как инструментальная подсистема проектирования алгоритмического обеспечения. В его состав входят модуль загрузки программного кода, модуль синтаксического анализа, модуль формирования графической модели алгоритма, библиотека типовых графических элементов, модуль компоновки блок-схемы и модуль экспорта проектных материалов.

На этапе анализа исходного кода формируется синтаксическое представление программного модуля. Далее выполняется классификация операторов по их функциональному назначению в алгоритме управления. Операции ввода и вывода данных относятся к информационным блокам; присваивания и арифметиче-

ские выражения – к блокам процесса; условные операторы – к блокам принятия решений, а циклические конструкции – к повторяющимся участкам алгоритма [2]. На основе полученной классификации формируется графическая модель, используемая для построения унифицированной блок-схемы.

Центральным элементом структурной схемы программного комплекса (рис. 1) является внутренняя модель алгоритма: она связывает результаты анализа кода, библиотеку шаблонов, правила построения и проект пользователя. На выходе формируются блок-схема, документ DOCX, файл PDF или графическое изображение. Поэтому результат можно использовать не как отдельную иллюстрацию, а как часть комплекта алгоритмического обеспечения АСУ.



Рис. 1. Структура программного комплекса проектирования алгоритмического обеспечения АСУ

Результаты исследования и их обсуждение

Проверка выполнена на четырех фрагментах кода: линейный алгоритм, условный опера-

тор, цикл и цикл с вложенным условием. В каждом случае схема формировалась автоматически средствами разработанной программы. Обобщенные результаты приведены в таблице.

Результаты проверки автоматического построения схем

Пример	Проверяемая конструкция	Результат
Линейный алгоритм	Последовательный ввод, вычисление и вывод	Схема построена без ветвлений
Условный оператор	Разделение потока <i>True/False</i>	Ветви сформированы и объединены
Цикл	Повторяющийся участок алгоритма	Показана возвратная связь цикла
Цикл с условием	Вложенная конструкция	Схема построена, сложность размещения возрастает

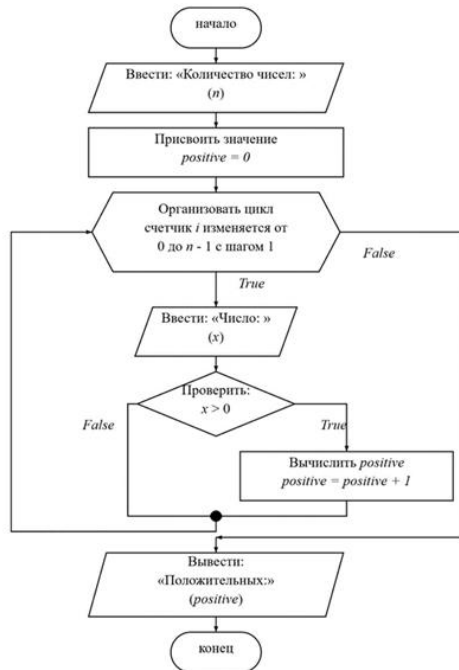


Рис. 2. Блок-схема программного модуля управления

```

n = int(input("Количество чисел: "))
positive = 0
for i in range(n):
    x = int(input("Число: "))
    if x > 0:
        positive += 1
print("Положительных:", positive)

```

Автоматически сформированная блок-схема алгоритма с циклом и вложенным условием (рис. 2).

Результаты показывают, что применение единого набора правил делает представление алгоритмов воспроизводимым: одинаковый код дает одинаковую структуру схемы, а типы операций отображаются однозначно. При увеличении количества ветвей возрастает вероятность пересечения соединительных линий, поэтому дальнейшее развитие программы должно быть связано с совершенствованием алгоритмов автоматического размещения элементов и построения связей между блоками схемы.

Выводы

Разработан метод проектирования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления на основе анализа программного кода и формирования унифицированных блок-схем алгоритмов управления. Предложена структура программного комплекса, включающая модули синтаксического анализа, формирования внутренней модели алгоритма, компоновки и экспорта проектных материалов. Проверка метода на типовых управляющих алгоритмах подтвердила корректное выделение линейных операций, условных переходов, циклических процедур и вложенных

конструкций. Полученные результаты позволяют снизить трудоемкость подготовки алгоритмической документации АСУ и повысить единообразие представления программных модулей управления. Дальнейшее развитие метода связано с расширением перечня поддерживаемых программных конструкций и совершенствованием алгоритмов автоматической компоновки блок-схем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 34.201–2020. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем. – М. : Стандартинформ, 2021.
- ГОСТ 19.701–90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения. – М. : Издательство стандартов, 1991.

REFERENCES

- GOST 34.201–2020. Information technologies. Set of standards for automated systems. Types, completeness and designation of documents when creating automated systems. – Moscow, Standartinform Publ., 2021.
- GOST 19.701–90. Unified system for program documentation. Schemes of algorithms, programs, data and systems. Symbols and rules for execution. – Moscow, Izdatelstvostandartov Publ., 1991.

УДК 681.5, 621.865.8
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-52-55

Научная статья
Original article

В. В. Иванова, М. П. Кухтик

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ ПОСТРОЕНИЯ
МАРШРУТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
РОБОТОМ-ГРУЗЧИКОМ В СКЛАДСКОМ ПОМЕЩЕНИИ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Михаил Петрович Кухтик, m_kukhtik@vstu.ru

Аннотация. На основе разработанного алгоритма работы автоматизированной системы управления роботом-грузчиком в складском помещении написана программа построения маршрута робота. Работа программы исследована путем построения оптимальных маршрутов для двух, четырех и шести роботов. Установлено, что во всех случаях программа не допускает столкновений, распределяя прохождение роботами общих точек графа в разное время.

Ключевые слова: робот-грузчик, автоматизированная система управления, программа построения маршрута, диаграмма Вороного

Для цитирования: Иванова В. В., Кухтик М. П. Разработка и исследование работы программы построения маршрута для автоматизированной системы управления роботом-грузчиком в складском помещении. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 52–55. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-52-55.

Информация об авторах:

Валерия Владимировна Иванова – студент кафедры АПП ВолгГТУ
e-mail: i_lera_ivanova_2002@mail.ru

Михаил Петрович Кухтик – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП ВолгГТУ
orcid.org/0000-0002-7258-6624
e-mail: m_kukhtik@vstu.ru

Вклад авторов:

В. В. Иванова – разработка и исследование программы, написание текста статьи.

М. П. Кухтик – определение цели работы, участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

V. V. Ivanova, M. P. Kukhtik

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE OPERATION
OF A ROUTE PLANNING PROGRAM FOR AN AUTOMATED
CONTROL SYSTEM FOR A ROBOT-LOADER IN A WAREHOUSE**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Mikhail P. Kukhtik, m_kukhtik@vstu.ru

Abstract. Based on the developed algorithm for the automated control system for a warehouse robotic loader, a program for plotting the robot's route was written. The program's performance was tested by constructing optimal routes for two, four, and six robots. It was found that in all cases, the program prevents collisions by staggering the robots' passage through common points in the graph.

Keywords: robot loader, automated control system, route planning program, Voronoi diagram

For citation: Ivanova V. V., Kukhtik M. P. Development and research of the operation of a route planning program for an automated control system for a robot-loader in a warehouse. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 52–55. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-52-55.

Information about the authors:

Valeriia V. Ivanova – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
e-mail: i_lera_ivanova_2002@mail.ru

Mikhail P. Kukhtik – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
orcid.org/0000-0002-7258-6624
e-mail: m_kukhtik@vstu.ru

Contribution of the authors:

Valeriia V. Ivanova – developing and researching the program, writing the text of the article.

Mikhail P. Kukhtik – defining the purpose of the work, participation in the discussion of results, editing the text of the article.

Введение

Неавтоматизированные склады сталкиваются с множеством проблем, включая влияние человеческого фактора, неэффективную организацию рабочих процессов и ограничения, накладываемые устаревшими технологиями [1]. Такие проблемы не только снижают общую эффективность работы склада, но и создают дополнительные издержки, которые могли бы быть минимизированы с помощью современных решений.

Ключевой частью программного обеспечения автоматизированной системы управления роботом-грузчиком в складском помещении является программа построения маршрута, которая позволяет избежать столкновений с другими роботами. Поэтому целью данной работы является разработка и исследование такой программы.

Методы исследования

Для построения маршрута в качестве метода декомпозиции пространства выбрана диаграмма Вороного [2]. Наиболее важным для навигационных задач свойством диаграммы Вороного является то, что каждое ее ребро представляет собой геометрическое место точек, максимально удаленных от двух ближайших препятствий-генераторов. Это означает, что если в качестве генераторов взять все препятствия на карте (или их характерные точки), то перемещение строго по ребрам Вороного обеспечивает максимально возможную дистанцию до окружающих препятствий. Для склада это значит, что маршрут будет прокладываться ровно посередине проходов между стеллажами, что минимизирует риск столкновений с полками, выступающими грузами или проходящими мимо другими транспортными средствами.

В качестве алгоритма поиска оптимального маршрута предложена комбинированная стратегия, в которой алгоритм A* выступает в качестве базового компонента, а для обеспечения бесколлизийного движения группы роботов последовательно применяются четыре метода, переключаемые при неудаче предыдущего и основанные на алгоритме A*.

Для написания программы построения маршрута выбран язык Python 3.10 и среда разработки PyCharm.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработан алгоритм работы автоматизированной системы управления роботом-грузчиком в складском помещении (рис. 1).

Робот получает команду с номером ячейки, куда необходимо будет переместить груз. Далее робот определяет собственное местоположение на заранее загруженной карте склада, после чего автоматизированная система управления должна проложить оптимальный маршрут до ячейки. Затем проложенный маршрут сравнивается с маршрутами других роботов-грузчиков, корректируется для устранения конфликтов, когда маршруты нескольких роботов пересекаются друг с другом, и загружается на сервер, где этот маршрут хранится до прибытия в конечную точку, после чего удаляется. После того, как робот поместит груз в указанную ячейку, он возвращается на начальную точку тем же маршрутом, которым ехал до ячейки. Сравнение маршрутов происходит перед отправлением робота к указанной ячейке. Алгоритм не предусматривает динамического изменения маршрута.

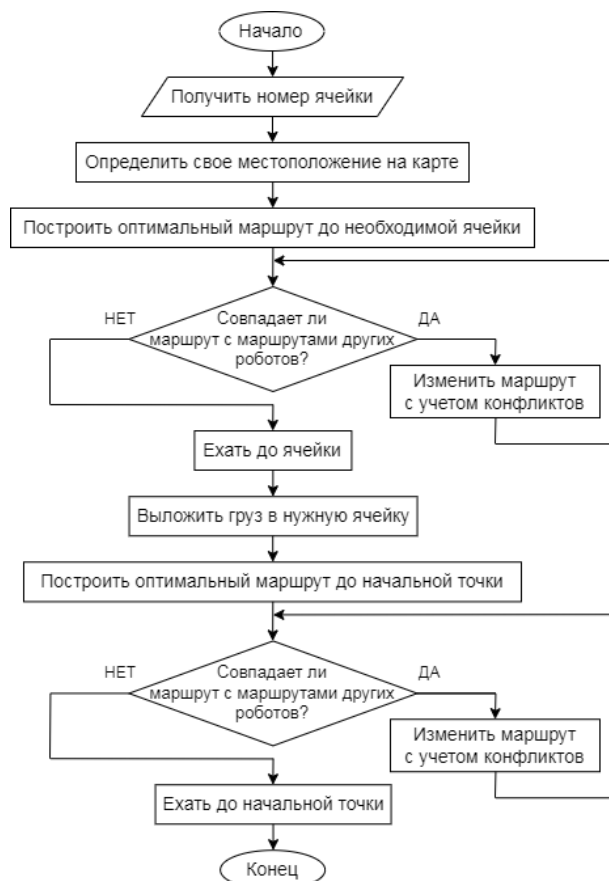


Рис. 1. Алгоритм работы автоматизированной системы управления роботом-грузчиком

Программа построения маршрута робота разработана на основе приведенного выше алгоритма и включает в себя следующие операции:

- импорт необходимых библиотек;
- определение карты склада, задание границ площади склада и стеллажей (рис. 2, а);
- дискретизацию препятствий, т. е. преобразование стеллажей в набор точек (рис. 2, б) для диаграммы Вороного;
- построение диаграммы Вороного (рис. 2, в);

- фильтрацию ребер диаграммы Вороного с целью выявления ребер, пригодных для построения безопасного маршрута (рис. 2, з);
- преобразование отфильтрованных ребер диаграммы Вороного в графовую структуру, пригодную для поиска пути (рис. 2, д);
- задание стартовых и финишных точек мар-

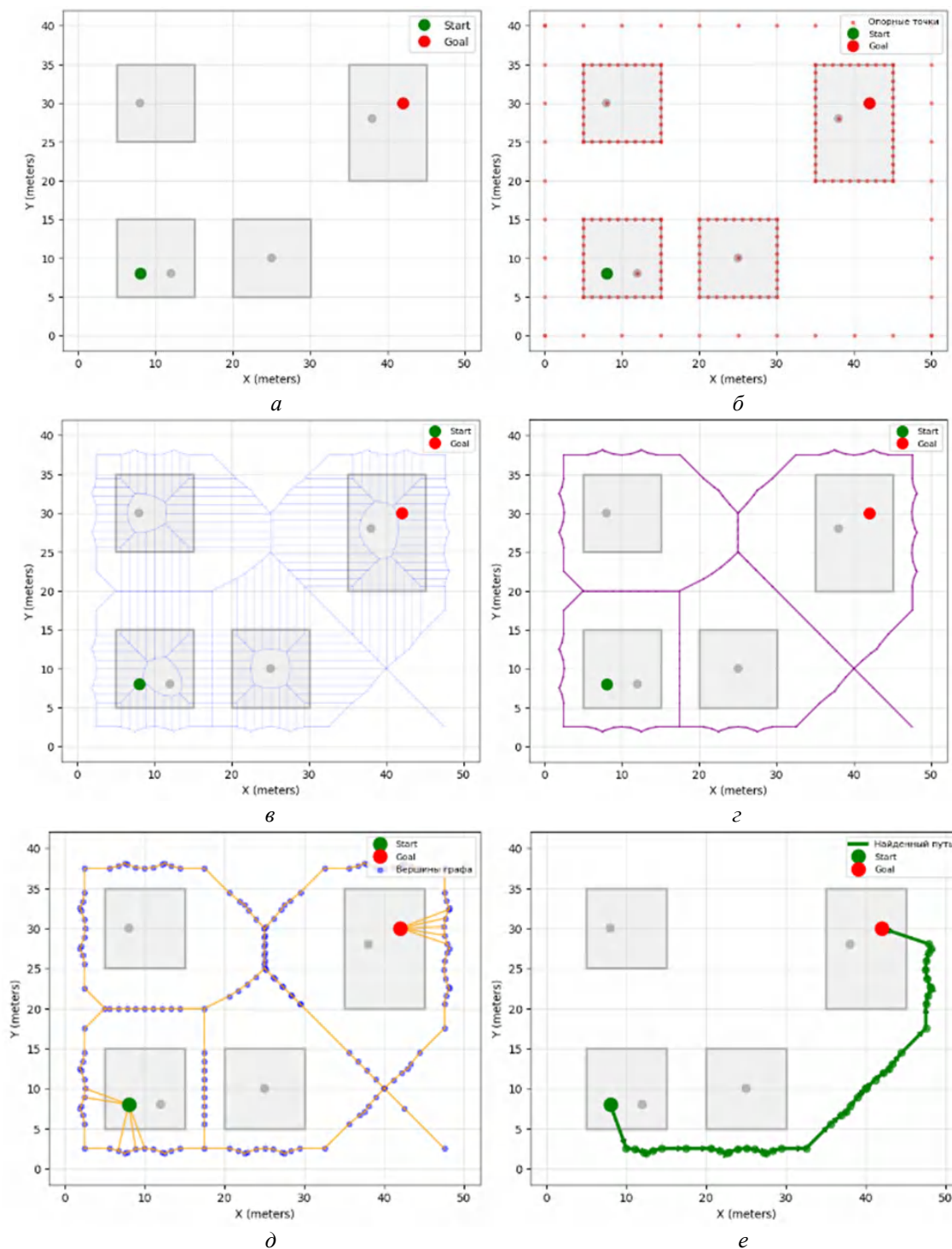


Рис. 2. Этапы построения маршрута:

а – карта склада; б – дискретизация препятствий; в – диаграмма Вороного;
з – фильтрация ребер; д – построение ребер; е – оптимальный маршрут

шрута и использование алгоритма A^* для поиска оптимального маршрута;

– отрисовку маршрута и анимации движения робота (рис. 2, е).

С целью исследования работы созданной программы был проведен опыт построения оптимальных маршрутов двух роботов-грузчиков одновременно. Стартовые и финишные точки специально были заданы таким образом, чтобы маршруты пересекались. Склад был масштабирован, а количество стеллажей увеличено. При наблюдении за построением маршрутов во времени было установлено, что программа обеспечивает прохождение роботами одной и той же точки графа в разное время. Также были проведены опыты с пересекающимися маршрутами для четырех и шести роботов. Во всех случаях программа смогла обеспечить отсутствие конфликтов при движении.

Выводы

Разработан алгоритм работы автоматизированной системы управления роботом-грузчиком в складском помещении, и написана программа построения маршрута робота. Исследование работы программы для двух, четырех и шести роботов одновременно показало, что она корректно учитывает пересечения маршру-

тов, распределяя прохождение роботами общих точек графа в разное время.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Иванова, В. В.* Исследование систем навигации роботов-погрузчиков в складских помещениях / В. В. Иванова, Ю. Ю. Гордейчик // XXIX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 16 сентября – 15 ноября 2024 г.) : сб. матер. конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2024. – С. 186–187.

2. *Попова, А. А.* Глобальное планирование маршрута мобильного робота на основе графовых методов / А. А. Попова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 2. – С. 57–67. – DOI 10.24143/2072-9502-2024-2-57-67.

REFERENCES

1. *Ivanova, V. V.* Study of navigation systems of forklift robots in warehouses / V. V. Ivanova, Y. Y. Gordeychik // XXIX Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region (Volgograd, September 16 – November 15, 2024): collection of conf. materials / editorial board: S. V. Kuzmin (editor-in-chief) [et al.]; VSTU [et al.]. – Volgograd, 2024. – P. 186–187.

2. *Popova, A. A.* Global route planning for a mobile robot based on graph methods / A. A. Popova // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics. – 2024. – No. 2. – P. 57–67. – DOI 10.24143/2072-9502-2024-2-57-67.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 621.181.2-6:697.54

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-55-59

Научная статья

Original article

А. А. Кулишова, С. Г. Поступаева, Е. А. Косова

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧЬЮ С ПЕРЕВОДОМ ГОРЕЛОК НА ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Анастасия Александровна Кулишова, kylnas2004@yandex.ru

Аннотация. Разработана модернизированная система автоматического управления газовой камерной термической печью с внешней механизацией типа ТНЗМ-150.48.30/12, эксплуатируемой в термическом подразделении АО «Корпорация Красный Октябрь», с переводом рекуперативных горелок с релейно-циклического на импульсный режим управления с фазированным включением. Выполнено расчетно-техническое сравнение режимов.

Ключевые слова: термическая печь, импульсный режим, релейно-циклический режим, фазированное включение горелок, ПЛК, энергоэффективность

Для цитирования: Кулишова А. А., Поступаева С. Г., Косова Е. А. Модернизация системы управления газовой камерной печью с переводом горелок на импульсный режим. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 55–59. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-55-59.

Информация об авторах:

Анастасия Александровна Кулишова – студент кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: kylnas2004@yandex.ru

Светлана Геннадиевна Поступаева – старший преподаватель кафедры АПП ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-3752-3062

e-mail: posvetlana@mail.ru

Елена Аркадиевна Косова – старший преподаватель, канд. техн. наук, кафедра ТМ ВолгГТУ

e-mail: tecmat@vstu.ru

Вклад авторов:

А. А. Кулишова – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

С. Г. Поступаева – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

Е. А. Косова – участие в обсуждении результатов.

A. A. Kulishova, S. G. Postupaeva, E. A. Kosova

**MODERNIZATION OF THE CONTROL SYSTEM
OF A GAS-FIRED CHAMBER FURNACE BY CONVERTING
BURNERS TO PULSE OPERATION MODE**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Anastasia A. Kulishova, kylnas2004@yandex.ru

Abstract. A modernized automatic control system for a gas-fired chamber heat-treatment furnace with external mechanization, type TNZM-150.48.30/12, operated in the heat-treatment division of JSC Krasny Oktyabr Corporation, has been developed. The modernization involves converting recuperative burners from a relay-cyclic control mode to a pulse control mode with phased burner activation. A technical and engineering comparison of the operating modes was carried out.

Keywords: heat-treatment furnace, pulse operation mode, relay-cyclic mode, phased burner activation, PLC, energy efficiency

For citation: Kulishova A. A., Postupaeva S. G., Kosova E. A. Modernization of the control system of a gas-fired chamber furnace by converting burners to pulse operation mode. *Izvestiya VSTU*. 2026; 8(315): 55–59. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-55-59.

Information about the authors:

Anastasia A. Kulishova – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: kylnas2004@yandex.ru

Svetlana G. Postupaeva – Senior Lecturer, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

orcid.org/0000-0002-3752-3062

e-mail: posvetlana@mail.ru

Elena A. Kosova – Senior Lecturer, Department of Materials Technology VSTU

e-mail: tecmat@vstu.ru

Contribution of the authors:

Anastasia A. Kulishova – processing and analysis of research results, manuscript preparation.

Svetlana G. Postupaeva – formulation of the research objective, participation in the discussion of results.

Elena A. Kosova – participation in the discussion of results.

Введение

Современное металлургическое производство предъявляет высокие требования к точности температурных режимов, энергоэффективности оборудования и надежности систем управления технологическими процессами. Газовые камерные термические печи занимают ключевое место в технологическом цикле металлургических предприятий, обеспечивая термическую обработку листового проката широкого сортамента [1].

Газовая камерная печь с внешней механизацией ТНЗМ-150.48.30/12 (РР КЗА 26/900, производство Словения), установленная в термиче-

ском подразделении АО «Корпорация Красный Октябрь», оснащена штатной системой управления на базе ПЛК SIEMENS SIMATIC S7-300. Анализ условий эксплуатации выявил ряд критических недостатков, подлежащих устранению в ходе модернизации.

Дополнительным фактором, обуславливающим необходимость модернизации, является снятие с серийного производства ПЛК SIEMENS SIMATIC S7-300 в октябре 2025 года, а также введенные с 2022 года ограничения на поставку импортного оборудования в Российскую Федерацию.

Анализ объекта автоматизации

Объектом исследования является газовая камерная термическая печь ТНЗМ-150.48.30/12. Печь предназначена для термической обработки тонко- и толстолистового проката. Нагрев осуществляется двадцатью рекуперативными скоростными горелками NOXMAT RHGB, расположенными в два ряда на задней стенке печи и сгруппированными в пять тепловых зон регулирования по четыре горелки в каждой [2].

Штатный автомат горения NOXMAT-B реализует релейно-циклическое управление: газовый клапан горелки либо полностью открыт, либо полностью закрыт, с длительностью цикла включения-выключения порядка нескольких минут [2]. В ходе анализа штатной системы управления выявлены следующие принципиальные недостатки релейно-циклического режима:

- неравномерность нагрева садки. При синхронной работе всех четырех горелок зоны на полной мощности амплитуда мощностного импульса составляет 680 кВт; при паузе – 0 кВт. Вследствие большой длительности цикла (60–600 с) температура свода зоны колеблется с амплитудой ± 12 °С вокруг уставки, что приводит к локальным перегревам на лицевой стороне листов и разнородности структуры металла;

- пониженная энергоэффективность. Частые пуски и остановки горелок не позволяют встроенному рекуператору выйти на установившийся тепловой режим, вследствие чего коэффициент полезного использования рекуператора снижается, а удельный расход газа возрастает;

- повышенная эмиссия NO_x . При каждом запуске горелка кратковременно работает с максимальной температурой факела, что активизирует термический механизм образования оксидов азота.

Методы исследования

В работе применялись аналитический метод сравнения режимов управления, инженерный расчет параметров широтно-импульсной модуляции (ШИМ) тепловой мощности и амплитуды температурных колебаний на основе модели тепловой инерции объекта. Постоянная времени тепловой инерции зоны определяется отношением аккумулированной теплоемкости к коэффициенту теплоотдачи [3]:

$$\tau_{\text{и}} = \frac{m_{\text{фут}}^{\text{зон}} \cdot c_{\text{фут}} + m_{\text{сад}}^{\text{зон}} \cdot c_{\text{сад}}}{\alpha_{\text{внут}} \cdot A_{\text{внут}}^{\text{зон}}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{фут}}^{\text{зон}}$ – масса футеровки зоны, кг; $m_{\text{сад}}^{\text{зон}}$ – масса садки в зоне, кг; $c_{\text{фут}}$, $c_{\text{сад}}$ – удельные те-

плоемкости, Дж/(кг·К); $\alpha_{\text{внут}} = 60$ Вт/(м²·К) – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности при интенсивной конвекции от скоростных горелок RHGB [2]; $A_{\text{внут}}^{\text{зон}}$ – площадь внутренней поверхности зоны.

Расчетное значение составило $\tau_{\text{и}} \approx 2628$ с ≈ 44 мин, что обеспечивает естественное сглаживание дискретного характера импульсного управления [4].

Для печи принята базовая длительность цикла $T = 24$ с, что в 20–37 раз меньше характерной постоянной времени тепловой инерции футеровки. Соотношение $T/\tau_{\text{и}} \approx 1/110$ обеспечивает естественное сглаживание дискретного характера импульсного управления и температурные колебания свода $\leq \pm 5$ °С.

Коэффициент заполнения k – отношение длительности импульса к периоду цикла – вырабатывается цифровым ПИД-регулятором зоны. Средняя тепловая мощность зоны изменяется линейно: $P = 680 \cdot k$ (кВт), что обеспечивает плавное и точное слежение за тепловой нагрузкой на всех технологических этапах.

Граничные коэффициенты заполнения определяются минимально допустимыми длительностями импульса ($\tau_{\text{имп}}^{\text{мин}} = 4$ с – сумма времени продувки, искрового розжига и установления пламени по ГОСТ Р 52219–2004) и паузы ($\tau_{\text{п}}^{\text{мин}} = 3$ с – для гарантированного закрытия и герметизации клапана) [1]:

$$k_{\text{мин}} = \frac{\tau_{\text{имп}}^{\text{мин}}}{T} = \frac{4}{24} \approx 0,167, \quad (2)$$

$$k_{\text{макс}} = 1 - \frac{\tau_{\text{п}}^{\text{мин}}}{T} = 1 - \frac{3}{24} \approx 0,875. \quad (3)$$

При k вне диапазона $[k_{\text{мин}}; k_{\text{макс}}]$ ПЛК автоматически удлиняет цикл.

Результаты исследования и их обсуждение

Импульсный режим управления (pulse-firing control) – способ регулирования усредненной тепловой мощности, при котором горелка работает кратковременными импульсами номинальной мощности, разделенными паузами регулируемой длительности. Ключевые отличия от релейно-циклического режима: длительность цикла составляет 15–60 с вместо нескольких минут; алгоритм фазированной координации включений реализуется на уровне ПЛК, а не аппаратного автомата горения; горелки зоны включаются с взаимным сдвигом по фазе, а не синхронно [4].

При фазированном включении четырех горелок зоны каждая последующая горелка за-

пускается со сдвигом $T/4 = 6$ с относительно предыдущей, при базовом периоде цикла $T = 24$ с. В результате в каждый момент времени примерно две горелки из четырех находятся в режиме горения, а два высокоскоростных факела поочередно обеспечивают непрерывное перемешивание печной атмосферы. Амплитуда мгновенной мощности зоны не превышает мощности одной горелки (170 кВт) – против 680 кВт при синхронном двухпозиционном управлении. Это практически в 4-5 раз снижает амплитуду температурных колебаний свода [1].

Для реализации импульсного режима в состав модернизированной системы управления введены ПЛК ОВЕН ПЛК210-04-CS (ООО «ПО ОВЕН», Москва) и 20 автоматов горения САФАР-500 (НПП «ПРОМА», Казань), по одному на каждую горелку [3].

Принципиальное отличие модернизированной системы от штатной состоит в перемещении алгоритма регулирования мощности зоны с уровня аппаратного автомата горения на уровень ПЛК. Пять независимых сегментов ModbusRTU (по одному на тепловую зону) обеспечивают цикл опроса не более 100 мс – достаточный для синхронной фазированной диаграммы при такте 24 с [3].

На рисунке 1 представлена форма колебаний температуры свода: импульсный режим дает узкую полосу около $\pm 2,5$ °С (с периодом 24 с), тогда как релейно-циклический – пилообразные колебания $\pm 12...25$ °С. Это объясняется коротким периодом импульсного цикла: тепловая инерция футеровки и садки полностью сглаживает такие быстрые пульсации, а длинный цикл штатного режима сгладить нельзя.

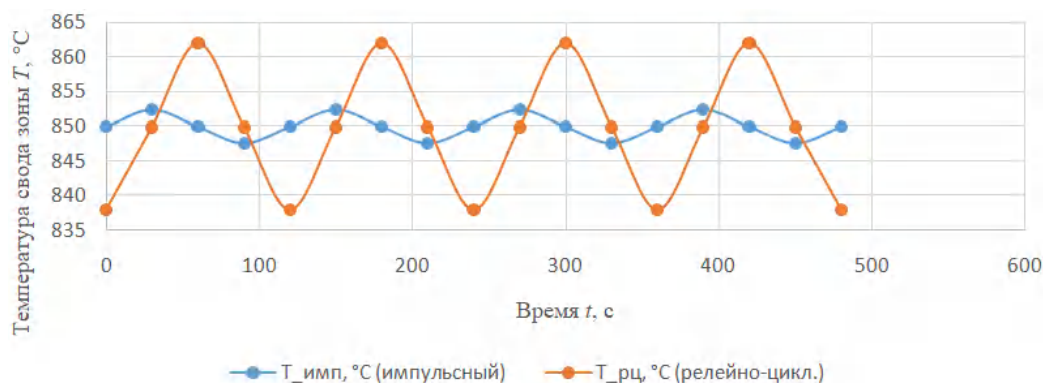


Рис. 1. График зависимости температуры свода зоны от времени в установившемся режиме при импульсном и релейно-циклическом режимах

Импульсный режим обеспечивает плавное линейное изменение тепловой мощности от 0 до 680 кВт. Релейно-циклический режим допускает лишь два дискретных значения: 0 кВт (при $k < 0,5$)

или 680 кВт (при $k \geq 0,5$). Это фундаментальная причина неустойчивого регулирования на стадиях выдержки и охлаждения, когда требуемая мощность составляет 100–300 кВт (рис. 2).

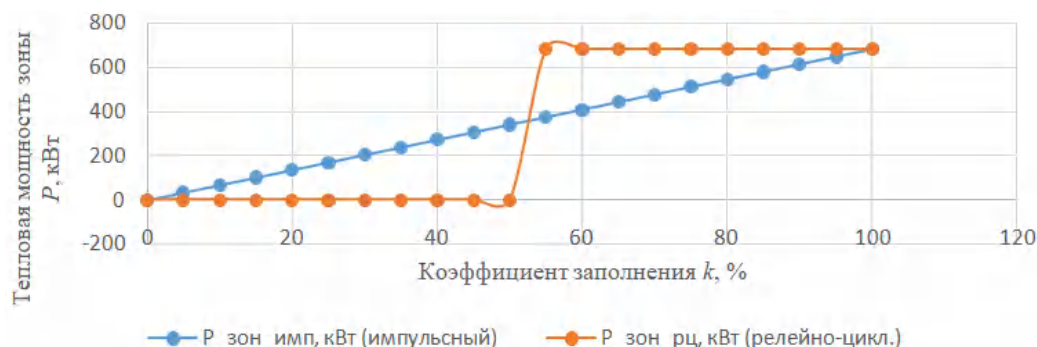


Рис. 2. График изменения тепловой мощности зоны в зависимости от коэффициента заполнения

Перевод горелок на работу в постоянной номинальной точке мощности обеспечивает непрерывный установившийся тепловой режим

встроенного рекуператора с температурой подогрева воздуха ≈ 500 °С, что соответствует паспортному КПД рекуператора 0,80–0,84.

В релейно-циклическом режиме рекуператор не успевает выйти на установившийся режим при каждом пуске, фактический КПД снижается до 0,72. Расчетное снижение удельного расхода газа составляет 10 % во всем диапазоне технологических нагрузок.

Выводы

Выполнен анализ газовой камерной термической печи ТНЗМ-150.48.30/12 и штатной системы управления на базе SIEMENS SIMATIC S7-300. Выявлены критические недостатки релейно-циклического режима. Разработана модернизированная система управления печью с переводом 20 горелок NOXMAT RHGB на фазированный импульсный режим. Алгоритм ШИМ-регулирования реализован на отечественном ПЛК ОВЕН ПЛК210-04-CS.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мордасов, Д. М. Оборудование и автоматизация процессов производства и обработки материалов : учеб. пособие / Д. М. Мордасов, Д. О. Завражин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ПГТУ», 2016. – 96 с. – ISBN 978-5-8265-1550-1.
2. Серия RHGB. Скоростная рекуперативная горелка со стальным рекуператором: техническое описание //

NOXMAT GmbH: официальный сайт. – Одеран, [2023]. – URL: <https://www.noxmat.com/en/products/burners/rhgb-series/> (дата обращения: 05.04.2026).

3. Аверин, С. И. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов. – Киев : Техніка, 1969. – 540 с.

4. ИМПУЛЬС. АСУ ТП группы колпаковых термических печей: описание готового решения // ООО «ПромАвтоматика»: официальный сайт. – Санкт-Петербург, [2018]. – URL: <https://pa.ru/ru/katalog/metallurgy/chernaja/IMPULSE> (дата обращения: 12.05.2026).

REFERENCES

1. Mordasov, D. M. Equipment and automation of processes of production and processing of materials: a textbook / D. M. Mordasov, D. O. Zavrazhin. Tambov: Publishing House of FGBOU VO "TSTU", 2016. 96 p. ISBN 978-5-8265-1550-1.

2. RHGB series. High-speed regenerative burner with steel reactor: technical description // NOXMAT GmbH: official website. – Odran, [2023]. – URL: <https://www.noxmat.com/en/products/burners/rhgb-series/> (date of reference: 05.04.2026).

3. Averin, S. I. Calculations of heating furnaces / S. I. Averin, E. M. Goldfarb, A. F. Kravtsov. – Kiev: Technika, 1969. – 540 p.

4. THE IMPULSE. Automated process control systems of the group of cap thermal furnaces: description of a ready-made solution // PromAvtomatika LLC: official website. – St. Petersburg, [2018]. – URL: <https://pa.ru/ru/katalog/metallurgy/chemnaja/IMPULSE> (date of request: 12.05.2026).

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-59-64

Научная статья

Original article

А. А. Ларин, В. Г. Барабанов

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ НА БАЗЕ ПЛК ОВЕН 210 И НМИ ПАНЕЛИ WEINTEK

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Александр Андреевич Ларин, aleks230514@gmail.com

Аннотация. Работа включает в себя следующие основные этапы разработки автоматической системы управления приточно-вытяжной вентиляцией: анализ объекта автоматизации; подбор оборудования; расчет воздухообмена по тепловым избыткам для складского помещения; разработка алгоритма работы системы управления; разработка интерфейса оператора SCADA системы.

Ключевые слова: приточно-вытяжная вентиляция, контроллер ОВЕН, НМИ-панель, Wientek

Для цитирования: Ларин А. А., Барабанов В. Г. Разработка системы управления приточно-вытяжной вентиляцией на базе ПЛК ОВЕН 210 и НМИ панели Wientek. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 59–64. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-59-64.

Информация об авторах:

Александр Андреевич Ларин – студент кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: aleks230514@gmail.com

Виктор Геннадьевич Барабанов – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП ВолгГТУ

orcid.org/0009-0007-0465-0923

e-mail: vbarabanov@vstu.ru

Вклад авторов:

А. А. Ларин – разработка алгоритма управления, разработка интерфейса SCADA системы, написание текста статьи.

В. Г. Барабанов – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

A. A. Larin, V. G. Barabanov

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR SUPPLY AND EXHAUST
VENTILATION BASED ON OWEN 210 PLC AND WEINTEK HMI PANEL

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Alexander A. Larin, aleks230514@gmail.com

Abstract. The work includes the following main stages of the development of an automatic control system for supply and exhaust ventilation: analysis of the automation facility; selection of equipment; calculation of air exchange by thermal excess for a warehouse; development of an algorithm for the operation of the control system; development of the operator interface of the SCADA system.

Keywords: supply and exhaust ventilation, Owen controller, HMI panel, Weintek

For citation: Larin A. A., Barabanov V. G. Development of a control system for supply and exhaust ventilation based on Owen 210 PLC and Weintek HMI panel. *Izvestiya VSTU*. 2026; 8(315): 59–64. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-59-64.

Information about the authors:

Alexander A. Larin – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: aleks230514@gmail.com

Viktor G. Barabanov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

orcid.org/0009-0007-0465-0923

e-mail: vbarabanov@vstu.ru

Contribution of the authors:

Alexander A. Larin – development of the control algorithm, development of the SCADA system interface, writing the text of the article.

Viktor G. Barabanov – defining the purpose of the work, participating in the discussion of the results.

Введение

В современных условиях на долю систем вентиляции и кондиционирования приходится до половины всего энергопотребления объекта, переход от примитивных алгоритмов «включено-выключено» к гибкому автоматическому регулированию становится ключевым фактором снижения эксплуатационных расходов. Использование связки программируемого логического контроллера и панели оператора позволяет создать интеллектуальную систему, способную в реальном времени адаптировать производительность вентиляторов на основе данных с датчиков температуры.

Для повышения качества регулирования температуры и повышения энергоэффективности приточно-вытяжной вентиляции предложено внедрить систему управления приточно-вытяжной вентиляции. Для этого необходимо разработать алгоритм функционирования системы и разработать интерфейс панели оператора.

Разработка алгоритма системы управления приточно-вытяжной вентиляции

Принцип действия системы состоит в следующем: во время работы системы наружный воздух, через воздухозаборную решетку поступает в приточную установку, проходит через открытый воздушный клапан, затем через воз-

душный фильтр проходит в секцию пластинчатого рекуператора. После этого очищенный воздух проходит через секцию нагрева и в зимний режим работы, подогревается до заданной оператором температуры. Затем воздух проходит через камеру охлаждения и в летнем режиме работы охлаждается. Далее воздух попадает в секцию вентилятора, где создается напор и после по воздуховодам попадает в обслуживаемые помещения.

Температура приточного воздуха измеряется датчиком. Измеренная температура передается в щит управления, и контроллер вырабатывает сигнал на преобразователи частоты вентиляционных установок и насоса нагревателя.

В системе предусмотрен контроль засорения фильтра. Когда перепад давления до и после фильтра превысит 100 Па, датчик замкнет свои контакты и этот сигнал включит световую сигнализацию на панели оператора, а также передаст сигнал на вышестоящую АСУ и, если в течение 72 часов фильтр не почистят или не заменят, остановит систему.

В системе предусмотрена защита калориферов от замерзания – датчик выработает сигнал, который при температуре 5 °С поступит в щит управления. При поступлении одного из сигналов происходит остановка вентилятора, закрывается сблокированный с ним клапан наружно-

го воздуха, и полностью открывается трехходовой клапан для максимального увеличения расхода теплоносителя. Таким образом, движение холодного воздуха прекращается, а циркуляция теплоносителя через калорифер продолжается. Вследствие отсутствия теплосъема температура охлажденного теплоносителя начинает повышаться. При достижении необходимой температуры теплоносителя вентилятор включается, клапан наружного воздуха открывается, и работа воздухонагревателя возобновляется.

По датчику температуры наружного воздуха происходит переключение режимов работы зимний или летний. В зависимости от режима работы воздух либо нагревается или охлаждается. Для регулирования температуры приточного воздуха применяют узел управления подачей теплоносителя в воздухонагреватель.

Вода из теплосети проходит через балансовочный клапан и фильтр и поступает в теплообменник, отдает часть тепла и возвращается в теплосеть. Циркуляционный насос создает подмешивание воды приточной с обратной водой, которая поступает в приточный трубопровод в зависимости от положения регулирующего клапана. Регулирующий клапан увеличивает или уменьшает поступление обратной воды в теплообменник в зависимости от температуры приточного воздуха или температуры обратной воды, которую измеряет накладной датчик температуры. Накладной термостат обеспечивает защиту теплообменника от замерзания теплоносителя. Если температура воды будет ниже 0 °С, то произойдет замерзание теплоносителя, что приведет к разрыву трубок теплообменника, который не подлежит ремонту, а замена является слишком дорогостоящей.

В летнем режиме работы регулированием подачи холодоносителя применяется узел управления подачей холодоносителя в воздухоохладитель.

Предусмотрено аварийное закрытие приточных клапанов системы при пожаре. При получении сигнала от противопожарной системы внутри здания произойдет отключение питания всей приточной вентиляции. Привод заслонки при потере питания закроется под действием возвратной пружины, встроенной в его конструкцию, закрыв поступление воздуха в горящее помещение.

Предусмотрен контроль засорения приточного вентилятора. Когда перепад давления до и после вентилятора превысит 100 Па, датчик

замкнет свои контакты и этот сигнал включит световую сигнализацию на панели оператора, а также передаст сигнал на вышестоящую АСУ.

Программа для ПЛК будет реализовываться в среде CodeSys. Для использования возможностей встроенного в ПЛК ПИД регулятора используется библиотека CmpOwenPidRegs. Для датчиков и исполнительных механизмов от компании ОВЕН используются шаблоны для подключения по RS-485. Все остальные компоненты и библиотеки среды CodeSys стандартные.

Все переменные, связанные с компонентами системы (например, показания датчиков, управляющий сигнал частотного преобразователя), объявляются в виде массивов размерами, равными количеству компонентов, взаимодействующих с этим массивом. Благодаря этому реализована масштабируемость системы внутри программы. Для добавления новых компонентов будет достаточно добавить его как Slave-устройство по протоколу RS-485 и изменить константы, отвечающие за количество устройств. Это может использоваться, например, при увеличении количества приточных или вытяжных магистралей.

В области VAR объявляются основные переменные, необходимые для функционирования системы: счетчики для циклов, флаги включения, перезагрузки и тревоги (пожарной опасности и задымления). Далее объявляются массивы переменных для данных с датчиков и записи управляющего сигнала для исполнительных механизмов.

В области VAR_RETAIN объявляются переменные, которые должны быть сохранены при перезагрузке или отключении ПЛК. К таким относятся: параметры самого ПИД-регулятора (пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты), уставка, флаг включения регулятора, состояние автонастройки, мертвая зона регулятора.

В области VAR_CONSTANT объявляются константы, необходимые для объявления массивов, т. е. количество различных устройств в системе.

После идет основная программа, повторяемая циклически.

Условие IFNOT (FirstSet) THEN проверяет, заданы ли параметры ПИД-регулятора, которые не подбираются автонастройкой. Если условие выполняется (т. е. параметры не заданы), в цикле присваиваются заданные значения. Значения взяты из рекомендаций компании ОВЕН к библиотеке CmpOwenPidRegs.

Далее проверяется наличие флага на запись параметров в функциональный блок ПИД-регулятора. Если флаг равен 1, то параметры из памяти ПЛК переписываются в функциональный блок *fbApidPosValv* через блок *fbWritePidSettings*. Проверка флага осуществляется с помощью *fbWritePidSettingsTrig* типа *R_TRIG*. Изменение флага происходит после автонастройки или при нажатии соответствующей кнопки на панели оператора.

Проверка триггера *fbOffReset* в условии *IF fbOffReset[i].Q THEN* отключает ПИД-регулятор при запуске автонастройки.

Проверка триггера *fbResetPid* в условии *IF fbResetPid[i].Q THEN* отключ сбрасывает параметры регулятора при запуске автонастройки или сигнале с панели оператора.

При наличии любого из флагов *StartAutotune* или *SetPoint* в условии *IF StartAutotune OR SetSp THEN* записывает уставку в функциональный блок ПИД-регулятора.

Запуск функционального блока ПИД-регулятора происходит после проверки условия *IF IsEnabledPid[i] AND NOT(StartAutotune[i]) THEN*, то есть, если есть флаг на запуск функционального блока регулятора и если не происходит автонастройка. После чего на вход блока поступают необходимые параметры регулятора, а выходные параметры привязываются к пе-

ременным в памяти ПЛК. После проводится перевод битовых масок ошибки и состояния регулятора в целочисленный тип.

Далее реализовано чтение параметров с функционального блока ПИД регулятора, при срабатывании триггера *fbReadPidSettingsTrig[i]*. Полученные параметры передаются в переменные в памяти ПЛК.

Разработка пользовательского интерфейса

Интерфейс сделан под HMI панель Weintek сМТ3092Х разрешением 1024 на 768. Интерфейс разделен на три окна, выбор которых осуществляется через верхнюю панель.

Окно «Мнемосхема» представляет собой схему системы вентиляции, внешне дублирует функциональную схему системы управления. Синим помечены трубы приточной магистрали вентиляции. Желтым помечены трубы вытяжной магистрали. Красным и оранжевым помечены трубы подающей и отводящей магистрали теплоносителя.

В правом нижнем углу расположены аварийные индикаторы, загорающиеся при: срабатывании датчиков перепада давления, т. е. при поломке оборудования; получении сигнала пожар от противопожарной системы; появлении ошибки работы ПИД-регулятора.

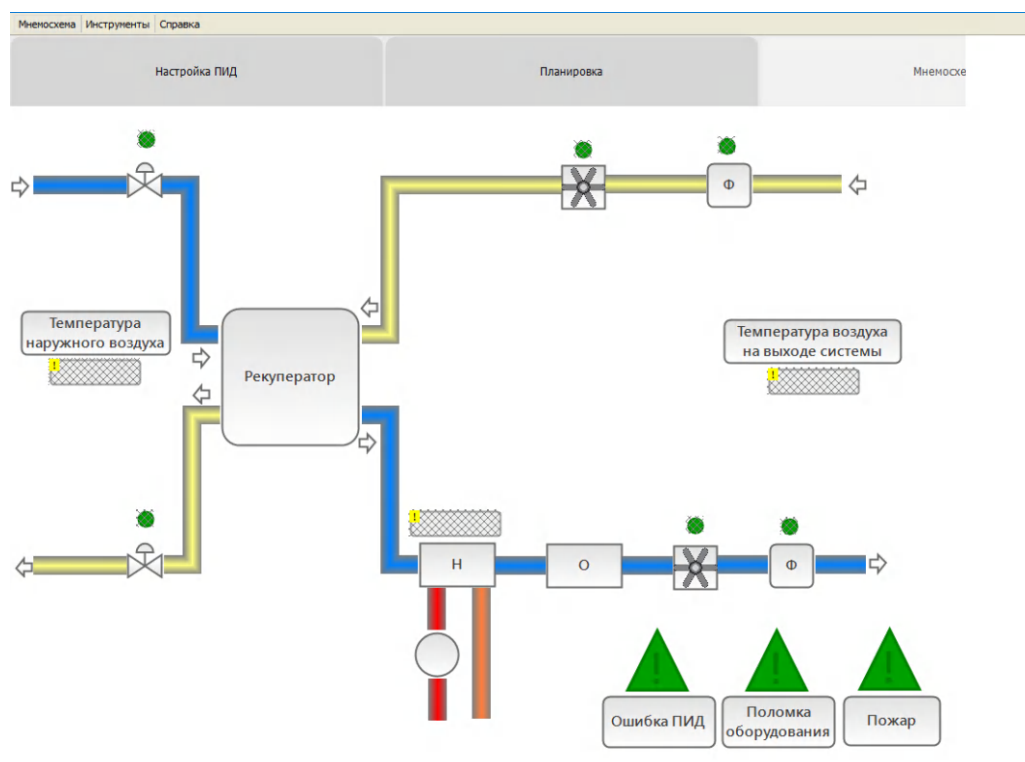


Рис. 1. Окно «Мнемосхема»

При двойном нажатии на любой показатель появляется график изменения этого параметра во времени, начиная с времени запуска системы.

Окно «Настройка ПИД» представляет собой меню, в котором можно настроить параметры ПИД-регулятора. Для упрощения использования меню в выпадающем списке оператор выбирает ПИД-регулятор, для которого будут задаваться параметры.

Окно «Планировка» представляет собой ус-

ловное отображение планировки здания. К каждой комнате привязаны панели, на которых отображается температура воздуха в конкретной комнате, для отслеживания работы системы и контроля температуры. По двойному нажатию на панель отображается тренд изменения параметра.

На рисунках 1–3 представлены окна «Мнемосхема», «Настройка ПИД» и «Планировка» соответственно.

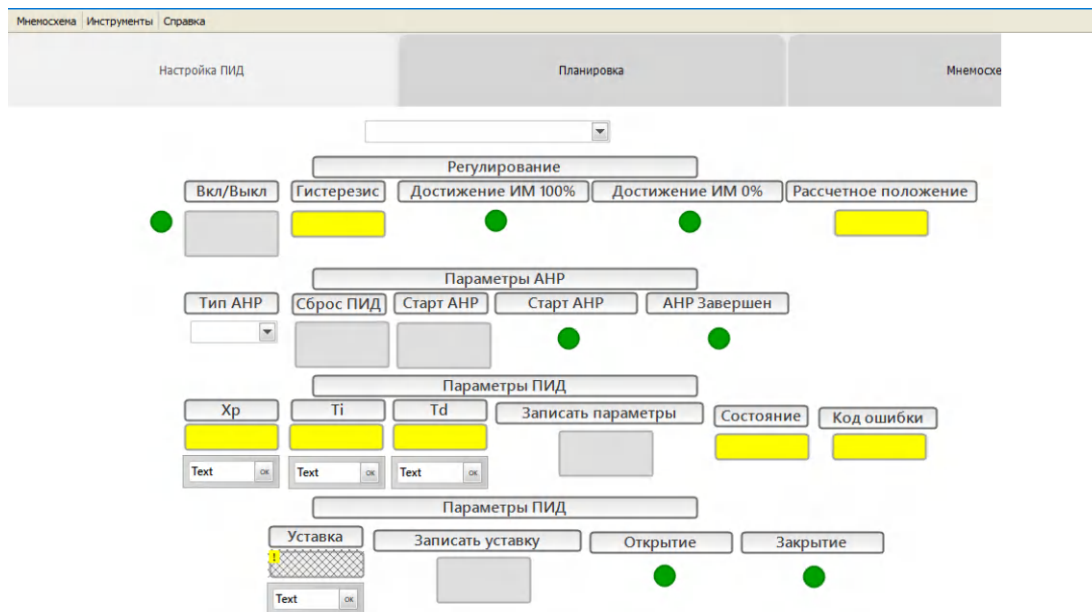


Рис. 2. Окно «Настройка ПИД»

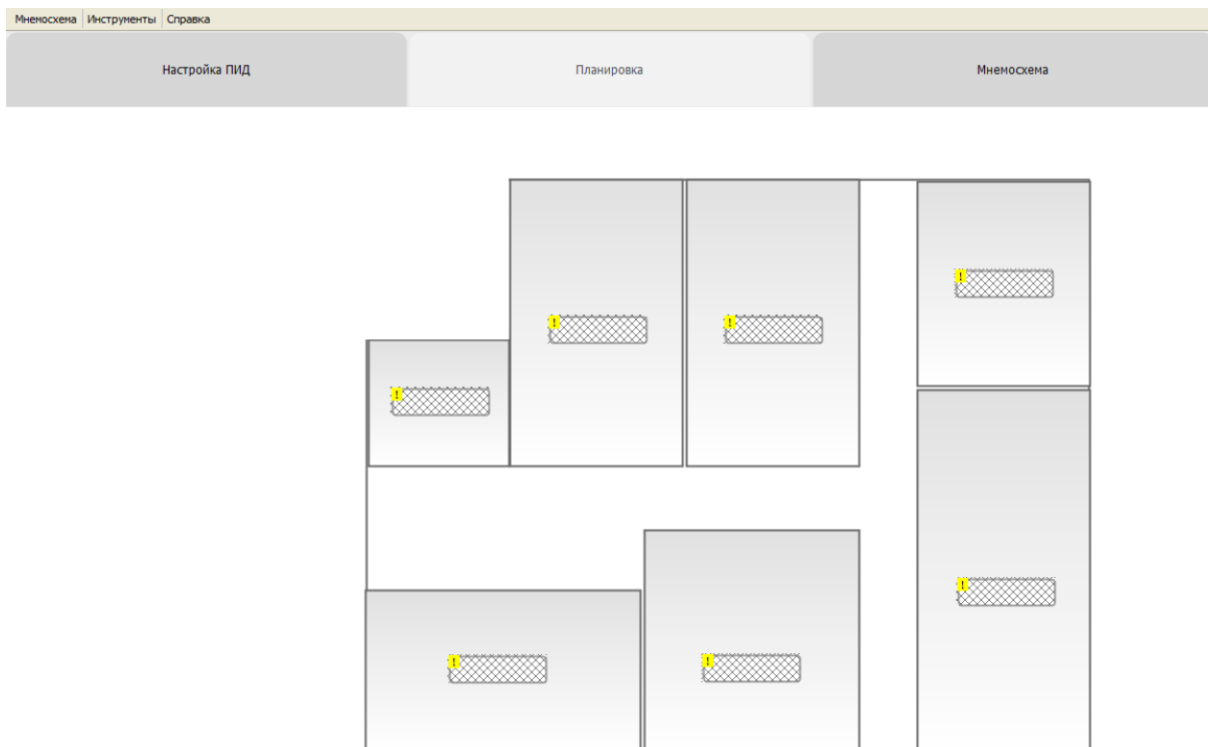


Рис. 3. Окно «Планировка»

Выводы

Разработан подробный алгоритм работы системы, который реализует все необходимые функции: управление заслонками, ПИД-регулирование температуры, контроль работы вентиляторов и аварийную остановку при поступлении сигнала «Пожар». В среде CodeSys написана управляющая программа контроллера, использующая библиотеку SmpOwenPidRegs для ПИД-регулирования и поддерживающая сохранение критически важных параметров при отключении питания. Спроектированы схемы внешних электрических подключений датчиков и исполнительных механизмов. Настроена передача данных на верхний уровень через OPC-UA сервер (MasterOPC), и разработан интуитивно понятный графический интерфейс (SCADA) для HMI-панели в EasyBuilderPro, включающий мнемосхему установки, панель настройки ПИД-регулятора и планировку помещений.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026
The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 519.816

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-64-68

Научная статья

Original article

*М. О. Лукин, А. М. Макаров***СИНТЕЗ ПРОЦЕДУРЫ ВЫБОРА НА ОСНОВЕ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-РОЛЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОВ****Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Максим Олегович Лукин, Luax-moon@mail.ru

Аннотация. В современных подходах к принятию инженерных решений прослеживается тенденция к построению многоэтапных гибридных процедур, комбинирующих сильные стороны отдельных методов и компенсирующих их ограничения. Предложен подход к синтезу архитектуры процедуры многокритериального выбора датчиков вибрации, базирующийся на функционально-ролевой классификации методов. Сформулированы правила построения осмысленных цепочек блоков, учитывающие начальную информационную обеспеченность и накопительную модель данных. Синтез и ранжирование архитектур выполнены по десяти объектно-независимым критериям с применением энтропийного метода TOPSIS.

Ключевые слова: вибродиагностика, выбор датчиков, многокритериальный анализ, синтез архитектур, энтропийный TOPSIS, классификация методов

Для цитирования: Лукин М. О., Макаров А. М. Синтез процедуры выбора на основе функционально-ролевой классификации методов. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 64–68. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-64-68

Информация об авторах:**Максим Олегович Лукин** – студент кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: Luax-moon@mail.ru

Алексей Михайлович Макаров – доцент, канд. техн. наук заведующий кафедрой АПП ВолгГТУ

orcid.org/0000-0001-5617-8738

e-mail: app@vstu.ru

Вклад авторов:

М. О. Лукин – разработка формального аппарата синтеза архитектур, программная реализация, написание текста статьи.

А. М. Макаров – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ананьев, В. А.* Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В. А. Ананьев, Л. Н. Балueva, А. Д. Гальперин, А. К. Городов, М. Ю. Еремин, С. М. Звягинцева, В. П. Мурашко, И. В. Седых. — СПб.: Евроклимат, 2003. — 416 с.

2. *Бондарь, Е. С.* Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха: учеб. пособие / Е. С. Бондарь, А. С. Гордиенко, В. А. Михайлов, Г. В. Нимич. — Казань: Авантпост-Прим, 2005. — 560 с.

REFERENCES

1. *Ananyev, V. A.* System urgencies and conditioning. Theory and practice / V. A. Ananyev, L. N. Balueva, A. D. Halperin, A. K. Gorodov, M. Yu. Eremin, S. M. Zvyagintseva, V. P. Murashko, I. V. Sedyh — SPB.: Evroklimat, 2003. — 416p.

2. *Bondar, E. S.* Automation system ventilation and air conditioning: training tool / E. S. Bondar, A. S. Gordiyenko, V. A. Miheilov, G. V. Nimich. — Kazan: Outpost-Prim, 2005. — 560 p.

M. O. Lukin, A. M. Makarov

SYNTHESIS OF A SELECTION PROCEDURE BASED ON A FUNCTIONAL-ROLE CLASSIFICATION OF METHODS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Maksim O. Lukin, Luax-moon@mail.ru

Abstract. In modern approaches to engineering decision-making, there is a tendency to build multi-stage hybrid procedures that combine the strengths of individual methods and compensate for their limitations. An approach is proposed for synthesizing the architecture of a multi-criteria vibration sensor selection procedure based on a functional-role classification of methods. Rules are formulated for constructing meaningful chains of blocks, taking into account the initial information availability and the cumulative data model. The synthesis and ranking of architectures are performed according to ten object-independent criteria using the entropy TOPSIS method.

Keywords: vibration diagnostics, sensor selection, multi-criteria analysis, architecture synthesis, entropy TOPSIS, classification of methods

For citation: Lukin M. O., Makarov A. M. Synthesis of a selection procedure based on a functional-role classification of methods. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 64–68. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-64-68.

Information about the authors:

Maksim O. Lukin – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: Luax-moon@mail.ru

Aleksey M. Makarov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences Head of the Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

orcid.org/0000-0001-5617-8738

e-mail: app@vstu.ru

Contribution of the authors:

Maksim O. Lukin – development of the formal apparatus for architecture synthesis, software implementation, drafting the manuscript.

Aleksey M. Makarov – defining the purpose of the work, participating in the discussion of the results.

Введение

В области принятия технических решений используется широкий спектр методов – от нормативных предписаний до алгоритмов машинного обучения [1]. Все большее распространение получают каскадные процедуры, объединяющие разнородные методы с целью повышения обоснованности принимаемых решений [2]. С ростом числа доступных методов экспоненциально растет число возможных комбинаций их объединений. В связи с этим актуальной задачей становится разработка ме-

тодики структурного синтеза методов принятия решения.

Материалы и методы исследования

Алфавит функциональных блоков. На основе функционально-ролевой классификации выделено 23 блока (таблица). Каждый блок характеризуется символом, свойствами, входными и выходными видами данных, например: перечень альтернатив, нормативные документы, отчет.

Алфавит функциональных блоков

A	Выявление и описание критериев	I	Формализованные методы взвешивания	Q	Математическое программирование
B	Генерация альтернатив	J	Компенсаторные MCDM	R	Эволюционные метаэвристики
C	Формализация суждений	K	Дистанционные MCDM	S	Траекторные метаэвристики
D	Нормативные и регламентные оценки	L	Отношения превосходства	T	Обучение с подкреплением
E	Статистические и регламентные методы	M	Нечеткие расширения MCDM	U	Обучение с учителем
F	Инф.-теор. методы взвешивания	N	Анализ рисков и отказов	V	Обучение без учителя
G	Моделирование	O	Критерии Вальда, Сэвиджа, Гурвица	W	Нейро-нечеткие системы
H	Экспертные методы	P	Анализ чувствительности и верификация	–	

Формирование осмысленных последовательностей. Архитектура процедуры представляет собой линейную цепочку блоков. Допустимость цепочки проверяется по четырем правилам.

1. Некоторые данные формируются условиями на производстве и доступны изначально.

2. Блок может быть включен в цепочку, если доступны все данные для его корректной работы.

3. Последний блок должен выдавать финальный результат.

4. Один и тот же блок не может следовать дважды подряд.

Оценочные критерии. Оценка проводилась

$$\varphi_{obj}(b) = \begin{cases} 1, & \text{если нет тегов, относящихся к субъективным;} \\ 0 & \end{cases} \quad (1)$$

Для цепочки $w = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, имеющей длину n , критерий объективности определяется долей объективных блоков:

$$Obj(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_{obj}(b_i) \quad (2)$$

Значение $Obj(w)$ лежит в интервале $[0,1]$, причем 1 означает, что все этапы цепочки воспроизводимы и не зависят от субъективных факторов, а 0 – что каждый шаг требует экспертного вмешательства.

Ранжирование энтропийным TOPSIS. Для объективного агрегирования критериев применен энтропийный метод [3].

$$w_i = \frac{1-E_j}{\sum_{s=1}^n (1-E_s)}, \quad E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{k=1}^m r_{kj}}. \quad (4)$$

Строится взвешенная нормализованная матрица $v_{ij} = w_j r_{ij}$, определяются идеальное $A_j^+ = \max_i v_{ij}$ и антиидеальное $A_j^- = \min_i v_{ij}$

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2}, \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2}. \quad (5)$$

Коэффициент близости к идеальному решению находится как

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \quad (6)$$

Архитектуры ранжируются по убыванию коэффициента близости; структура с максимальным значением признается оптимальной в смысле баланса всех десяти критериев.

Результаты исследования и их обсуждение

Вычислительные эксперименты выполнены для пяти различных начальных условий и мак-

по десяти критериям качества процедуры. Ниже детально рассмотрен критерий объективности; остальные критерии конструируются аналогично с привлечением соответствующих тегов и атрибутов.

Объективность метода в общепринятом понимании означает независимость его результатов от индивидуальных суждений, предпочтений или квалификации конкретного исполнителя.

Каждый блок b из алфавита снабжен набором тегов $T(b)$. Блок считается объективным, если он не содержит тегов «subjective» и «expert», то есть его выполнение не требует неформализуемых экспертных процедур. Индикатор объективности блока задается как

Пусть имеется m допустимых архитектур, оцененных по n критериям. Исходные оценки образуют матрицу $Y = (y_{ij})_{m \times n}$. Все критерии являются максимизируемыми и предварительно нормированы в диапазон $[0,1]$.

На первом этапе выполняется векторная нормализация:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m y_{kj}^2}}, \quad (3)$$

после чего вычисляются энтропийные веса критериев:

решения и рассчитываются расстояния каждой альтернативы до них:

симальной длины цепочки от 4 до 7. После применения правил объем допустимых архитектур варьировался от 300 до 9,7 млн. комбинаций.

Расчет энтропийным методом весов показал, что наибольший вклад в выбор оптимальной конфигурации внесли объяснительная глубина $Expl$ ($\approx 29\%$), робастность Rob ($\approx 18\%$) и объективность Obj ($\approx 15\%$).

Корреляционный анализ критериев (рис. 1) подтвердил отсутствие избыточности и слабую взаимозависимость большинства показателей.

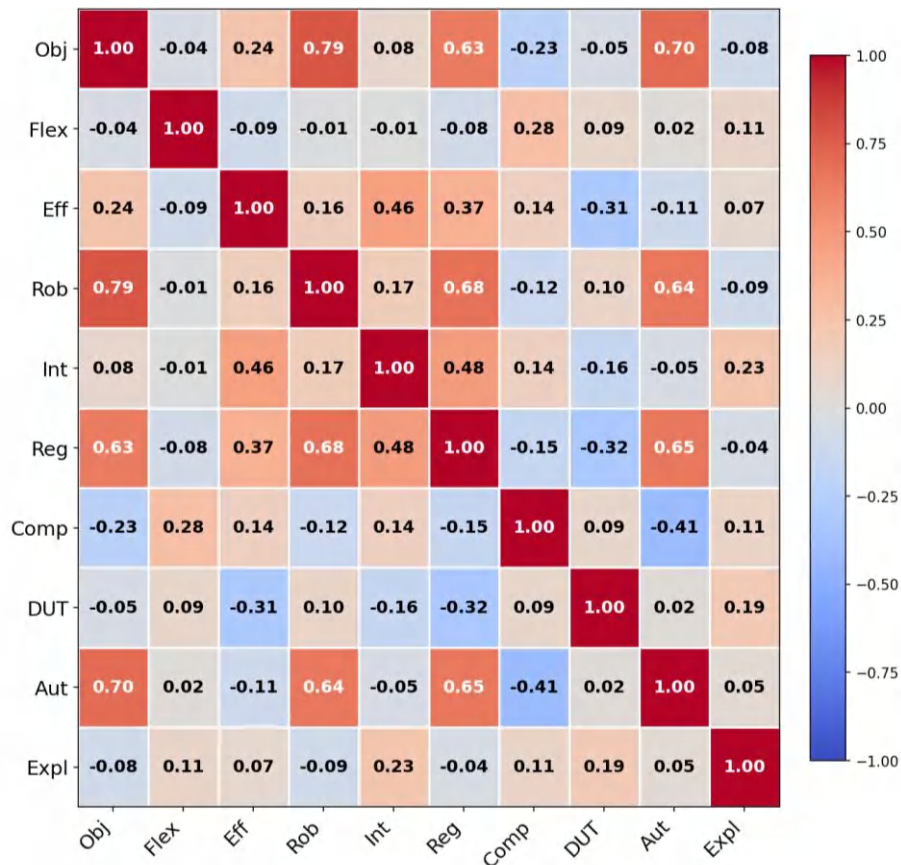


Рис. 1. Корреляционный анализ критериев

Анализ результатов ранжирования выявил общую концепцию: фильтрация по нормативам (блок D или A), анализ отказов или имитационное моделирование (G или N), статистическая обработка (E), нечеткое многокритериальное сравнение (M), метод отношения превосходства (L) и верификация (P).

Распределение коэффициента близости C_i (рис. 2) показывает, что лишь малая доля архитектур преодолевает порог 0,9. Такая форма распределения свидетельствует о том, что качественные структуры резко выделяются на общем фоне и их можно найти эффективнее, используя методы структурного синтеза.

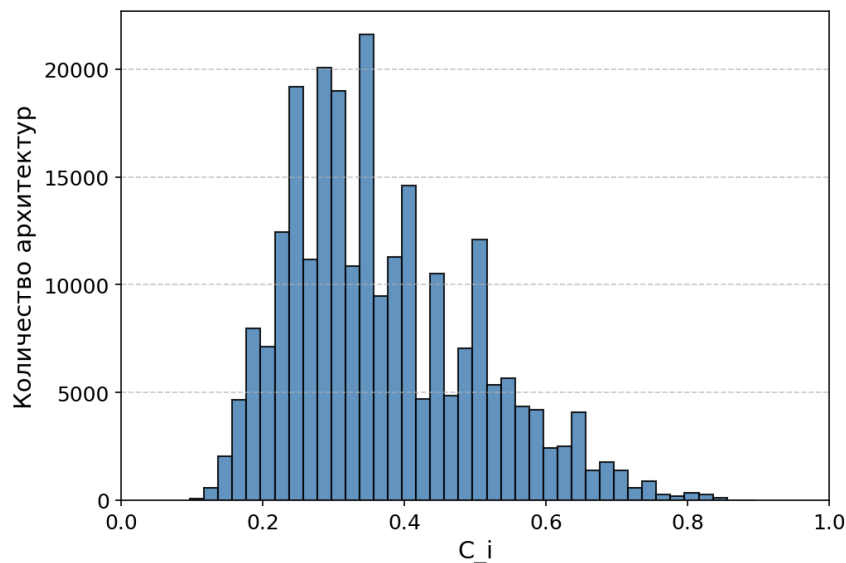


Рис. 2. Распределение коэффициента близости к идеальному решению

Проведенное исследование отражает первый шаг к формированию аппарата для синтеза структур методов и ограничивается каскадной схемой. Расчеты критериев оценки и свойства отдельных категорий методов требуют корректировки и утверждения научным сообществом для повышения объективности и качества расчетов.

Выводы

Предложен подход к структурному синтезу процедур выбора, основанный на функционально-ролевой классификации методов. Написана программа для проведения экспериментов. Энтропийный TOPSIS выявил наиболее значимые критерии качества: объяснительная глубина, робастность, объективность.

Установлено, что во всех рассмотренных условиях оптимальные архитектуры включают формирование критериев, анализ или моделирование рисков, статистическую обработку, нечеткое многокритериальное ранжирование и верификацию.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026
The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 621.3.087.9

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-68-72

Научная статья
Original article

М. О. Лукин, М. В. Семибратова, А. С. Сергеев

ИССЛЕДОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ВЫБОРА ДАТЧИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Максим Олегович Лукин, Luax-moon@mail.ru

Аннотация. Отсутствие единой систематизации подходов к выбору датчиков вибрации затрудняет обоснованный выбор метода для конкретных промышленных условий. Предложена классификация, основанная на роли метода в процессе принятия решений. В таксономии для каждого блока определены типовые входные данные и границы применимости. Установлено, что изолированные методы не обеспечивают одновременно практической доступности и научной обоснованности, а доминирующим трендом является переход к многоэтапным гибридным процедурам.

Ключевые слова: вибродиагностика, выбор датчиков, классификация методов, многокритериальный анализ, гибридные методики

Для цитирования: Лукин М. О., Семибратова М. В., Сергеев А. С. Исследование и классификация методов выбора датчиков для систем вибродиагностики. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 68–72. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-68-72.

Информация об авторах:

Максим Олегович Лукин – студент кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: Luax-moon@mail.ru

Мария Владимировна Семибратова – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП ВолгГТУ

orcid.org/0000-0001-9049-1955

e-mail: mariatiminen@yandex.ru

Александр Сергеевич Сергеев – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП ВолгГТУ

e-mail: sergeevapp@mail.ru

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чечнев, В. Б. Анализ и классификация методов многокритериального принятия решений / В. Б. Чечнев // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 607–624. DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-388

2. Морозов, А. Л. Комбинированный метод обработки вибросигналов для диагностики и контроля асинхронных двигателей, оптимизированный для встраиваемых систем / А. Л. Морозов // Контроль. Диагностика. – 2021. – № 10. – С. 18–27. – DOI: 10.14489/td.2021.10.pp.018-027

3. Птускин, А. С. Использование энтропийных методов для этапов оценки наилучших доступных технологий / А. С. Птускин // Modern Economy Success. – 2022. – № 4. – С. 102–108.

REFERENCES

1. Chechnev, V. B. Analysis and classification of multi-criteria decision-making methods. Ontology of Designing. 2024. Vol. 14, No. 4. P. 607–624. DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-388

2. Morozov, A. L. Combined method of vibration signal processing for diagnostics and monitoring of induction motors, optimized for embedded systems. Kontrol'. Diagnostika. 2021. No. 10. P. 18–27. DOI: 10.14489/td.2021.10. pp.018-027

3. Ptuskin, A. S. Use of entropy methods for stages of assessment of best available techniques. Modern Economy Success. 2022. No. 4. P. 102–108.

Вклад авторов:

М. О. Лукин – разработка классификации методов выбора датчиков, написание текста статьи.

М. В. Семibrатова – уточнение критериев качества, верификация прототипов классификации.

А. С. Сергеев – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

M. O. Lukin, M. V. Semibratova, A. S. Sergeev

**INVESTIGATION AND CLASSIFICATION OF METHODS
FOR SELECTING SENSORS FOR VIBRATION DIAGNOSTICS SYSTEMS**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Maksim O. Lukin, Luax-moon@mail.ru

Abstract. The lack of a unified systematization of approaches to vibration sensor selection hinders the informed choice of a method for specific industrial conditions. A classification based on the role of the method in the decision-making process is proposed. For each block in the taxonomy, typical input data and applicability limits are defined. It is established that isolated methods do not simultaneously provide practical accessibility and scientific validity, while the dominant trend is the transition to multi-stage hybrid procedures.

Keywords: vibration diagnostics, sensor selection, classification of methods, multi-criteria analysis, hybrid techniques

For citation: Lukin M. O., Semibratova M. V., Sergeev A. S. Investigation and classification of methods for selecting sensors for vibration diagnostics systems. *Izvestiya VSTU*. 2026; 8(315): 68–72. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-68-72.

Information about the authors:

Maksim O. Lukin – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: Luax-moon@mail.ru

Maria V. Semibratova – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

orcid.org/0000-0001-9049-1955

e-mail: mariatiminen@yandex.ru

Alexandr S. Sergeev – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: sergeevapp@mail.ru

Contribution of the authors:

Maksim O. Lukin – development of the classification of sensor selection methods, writing the text of the article.

Maria V. Semibratova – refinement of quality criteria, verification of classification prototypes.

Alexandr S. Sergeev – defining the purpose of the work, participating in the discussion of the results.

Введение

Эффективность систем вибромониторинга промышленного оборудования определяется корректностью выбора типов и конфигурации первичных измерительных преобразователей. Существующие подходы к решению этой задачи варьируются от нормативных предписаний и экспертных правил до математически строгих моделей и методов машинного обучения. Однако их обобщающая систематизация в научно-технической литературе отсутствует. Это затрудняет как обоснованный выбор метода под конкретные условия эксплуатации, так и направленный синтез новых вычислительных процедур.

**Материалы и методы
исследования**

Разработка классификации проводилась в четыре этапа: формирование и систематизация исходной выборки источников, обоснование классификационных признаков, итеративное

построение структуры таксономии, валидация полученной схемы.

Материалом послужили публикации, нормативные документы и технические руководства, охватывающие методы принятия решений при выборе технических средств измерений [1–3]. Критериями включения документа в классификацию служили: явное описание одного или нескольких методов выбора или их классификации, принадлежность к инженерным приложениям, доступность полного текста.

Выбор и обоснование классификационных признаков. Традиционные таксономии опираются на разделение по источнику знания (нормативные, экспертные, расчетные) или по типу математического аппарата.

Анализ выборки показал, что ни один из этих подходов не обеспечивает одновременно полноты и функциональной определенности, необходимой для композиции методов в цепочки. В качестве главного был принят функциональ-

но-ролевой признак – место метода в обобщенном процессе принятия технического решения. Признаком второго уровня служит характер обрабатываемой информации и тип вычислительной процедуры.

Критерии качества. Были сформулированы пять критериев: полнота, непротиворечивость, модульность (описанные входы/выходы), расширяемость, практическая ориентированность.

Эти критерии служили ориентирами на всех этапах и были последовательно проверены.

Результаты исследования и их обсуждение

Предложенная модульная таксономия включает семь функциональных блоков (табл. 1). Каждый блок характеризуется назначением, типовыми входами и выходами (табл. 2).

Таблица 1

Сводное описание основных ветвей классификации

Блок	Назначение	Содержание
Структуризация задачи	Формирование критериев и альтернатив	Диаграмма Исикавы, ТРИЗ, морфологический анализ, парные сравнения, ранжирование
Определение весов и оценок	Расчет важности критериев и оценок альтернатив	МАИ, SMART, метод энтропии, регрессионный анализ, ISO 10816
Многокритериальный выбор	Ранжирование альтернатив	TOPSIS, VIKOR, ELECTRE, PROMETHEE, взвешенная сумма
Анализ рисков и чувствительности	Проверка устойчивости решений	FMEA, критерии Вальда, Сэвиджа, Гурвица, анализ чувствительности
Оптимизация	Поиск оптимальных параметров	Линейное/целочисленное программирование, генетический алгоритм, метод роя частиц, Q-обучение
Машинное обучение	Классификация и прогнозирование	Решающие деревья, случайный лес, нейросети, кластеризация, ANFIS
Интеграционные схемы	Построение гибридных цепочек методов	Последовательные (каскадные), параллельные, итеративные

Таблица 2

Входные и выходные данные

Блок	Типовые входы	Типовые выходы
Структуризация задачи и формализация знаний	Техническое задание, опыт экспертов	Перечень критериев и альтернатив, шкалы оценок
Определение значений и весов критериев	Нормативы, данные измерений, экспертные суждения	Матрица решений, вектор весов
Многокритериальное сравнение и выбор	Матрица решений, вектор весов	Ранжированный список альтернатив
Анализ неопределенности, рисков и чувствительности	Результаты предыдущих блоков, вероятностные модели	Границы устойчивости, перечень ключевых факторов
Целенаправленный поиск и оптимизация	Целевая функция, ограничения, модель среды	Оптимальные значения переменных
Методы машинного обучения и ИИ	Размеченные данные, исторические наблюдения	Обученная модель (классификатор, регрессор)
Интеграционные схемы	Входы первого блока цепочки	Выход последнего блока

Полная схема классификации представлена на рисунке.

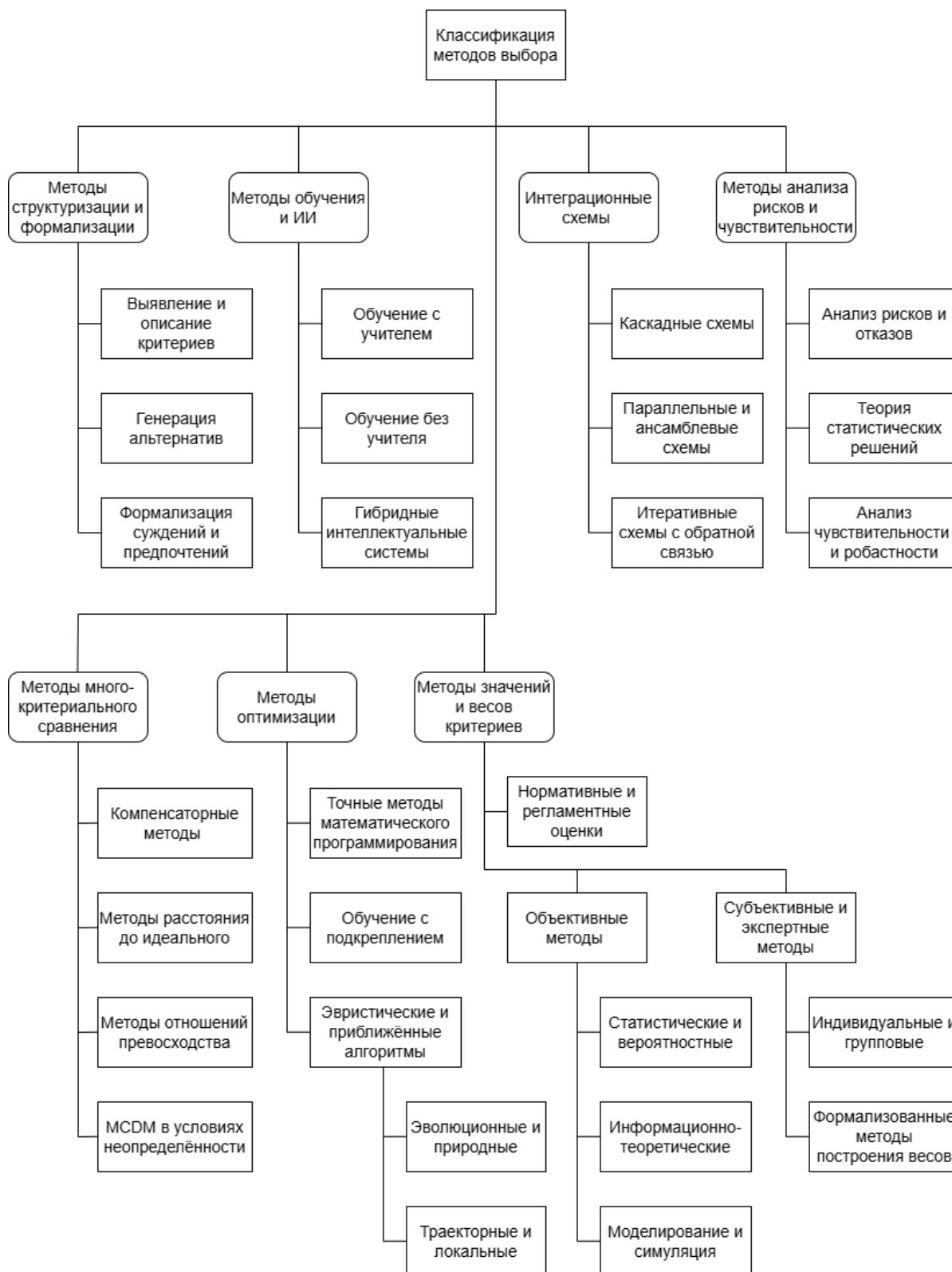


Схема классификации методов выбора по роли в процессе принятия решения

Выводы

Разработана модульная классификация методов выбора датчиков вибрации, построенная по строгой методологии системно-аналитиче-

ской разработки и включающая семь функциональных блоков с описанными входами и выходами. Установлено, что доминирующим трендом является переход к комбинированным

многоэтапным процедурам. Данная классификация может использоваться для более эффективного синтеза новых методик, нацеленных на решение персональных задач производств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Журавлев, А. О. Методы вибродиагностики от способов получения данных до их обработки современными средствами / А. О. Журавлев, А. О. Поляков, Д. А. Андриков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – Т. 25, № 4. – С. 380–396. – DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396.
2. ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021. Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 1. Общее руководство. – Введ. 2022-06-01. – М.: Стандартинформ, 2022. – IV, 27 с.
3. Морозов, А. Л. Комбинированный метод обработки вибросигналов для диагностики и контроля асинхронных

двигателей, оптимизированный для встраиваемых систем / А. Л. Морозов // Контроль. Диагностика. – 2021. – № 10. – С. 18–27. – DOI: 10.14489/td.2021.10.pp.018-027.

REFERENCES

1. Zhuravlev, A. O. Methods of vibration diagnostics from data acquisition methods to their processing by modern means / A. O. Zhuravlev, A. O. Polyakov, D. A. Andrikov // Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering research. – 2024. – Vol. 25, No. 4. – pp. 380–396. – DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396.
2. GOST R ISO 20816-1-2021. Vibration. Vibration measurements and evaluation of the vibration condition of machines. Part 1. General guidance. – Introduction. 2022-06-01. Moscow: Standartinform, 2022. – IV, 27 p.
3. Morozov, A. L. Combined method of vibration signal processing for diagnostics and control of asynchronous motors, optimized for embedded systems. Diagnostics. – 2021. – No. 10. – Pp. 18–27. – DOI: 10.14489/td.2021.10.pp.018-027.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 539.261, 620.187, 691.75

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-72-76

Научная статья

Original article

И. А. Машковский, А. А. Машковская, К. М. Воротников, С. С. Шемелюнас

ПОСТРОЕНИЕ И РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДВУХЗВЕННОЙ КОНЕЧНОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МОБИЛЬНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Илья Александрович Машковский, mashkovsky_ilya_48@mail.ru

Аннотация. Представлена конструкция мобильного четырехного шагающего робота с двумя степенями свободы на каждую конечность. Описана кинематическая модель двухзвенного рычажного механизма, приведены решения прямой и обратной задач кинематики. Разработана реализация диагонально-согласованной походки, обеспечивающая статическую устойчивость при циклическом перемещении.

Ключевые слова: шагающий робот, двухзвенная конечность, кинематическая модель, обратная кинематика, диагонально-согласованная походка

Для цитирования: Машковский И. А., Машковская А. А., Воротников К. М., Шемелюнас С. С. Построение и расчет кинематической схемы двухзвенной конечности для создания цифрового двойника мобильного шагающего робота. Известия ВолГТУ. 2026; 8(315): 72–76. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-72-76.

Информация об авторах:

Илья Александрович Машковский – студент кафедры АПП ВолГТУ

e-mail: mashkovsky_ilya_48@mail.ru

Алена Александровна Машковская – студент кафедры АПП ВолГТУ

e-mail: mashkovskaya_a04@mail.ru

Константин Михайлович Воротников – студент кафедры АПП ВолГТУ

e-mail: italianec2@list.ru

Сергей Сергеевич Шемелюнас – преподаватель кафедры АПП ВолГТУ

orcid.org/0009-0007-6521-7197

e-mail: sergey.shemelyunas@bk.ru

Вклад авторов:

И. А. Машковский – написание текста статьи.

А. А. Машковская – разработка кинематической схемы.

К. М. Воротников – разработка конструкции мобильного шагающего робота.

С. С. Шемелюнас – обработка и анализ результатов разработки.

I. A. Mashkovsky, A. A. Mashkovskaya, K. M. Vorotnikov, S. S. Shemelyunas
**CONSTRUCTION AND CALCULATION OF THE KINEMATIC SCHEME
OF A TWO-LINK LIMB TO CREATE A DIGITAL TWIN
OF A MOBILE WALKING ROBOT**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Ilya A. Mashkovsky, mashkovsky_ilya_48@mail.ru

Abstract. The design of a mobile four-legged walking robot with two degrees of freedom for each limb is presented. A kinematic model of a two-link lever mechanism is described, and solutions to direct and inverse kinematics problems are presented. An implementation of a diagonally coordinated gait has been developed, providing static stability during cyclic movement.

Keywords: walking robot, two-jointed limb, kinematic model, inverse kinematics, diagonally coordinated gait

For citation: Mashkovsky I. A., Mashkovskaya A. A., Vorotnikov K. M., Shemelyunas S. S. Construction and calculation of the kinematic scheme of a two-link limb to create a digital twin of a mobile walking robot. *Izvestiya VSTU*. 2026; 8(315): 72–76. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-72-76.

Information about the authors:

Ilya A. Mashkovsky – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
e-mail: mashkovsky_ilya_48@mail.ru

Alyona A. Mashkovskaya – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
e-mail: mashkovskaya_a04@mail.ru

Konstantin M. Vorotnikov – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
e-mail: italianec2@list.ru

Sergey S. Shemelyunas – Lecturer, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
orcid.org/0009-0007-6521-7197
e-mail: sergey.shemelyunas@bk.ru

Contribution of the authors:

Ilya A. Mashkovsky – writing the text of the article.

Alyona A. Mashkovskaya – development of the kinematic scheme.

Konstantin M. Vorotnikov – design development of a mobile walking robot.

Sergey S. Shemelyunas – processing and analysis of development results.

Введение

История развития шагающих робототехнических систем начинается в середине прошлого столетия, когда первые инженерные испытания проводились в академических лабораториях и научно-исследовательских центрах. Мобильные шагающие роботы представляют собой перспективный класс автономных систем, способных перемещаться по пересеченной местности, лестничным пролетам и завалам, где применение колесных или гусеничных платформ ограничено [1]. Создание такой системы дает возможность студентам не только изучать базовые алгоритмы шагания, но и отрабатывать комплексные задачи автономного поведения.

Материалы и методы исследования

Любая автономная мобильная платформа начинается с продуманной механической базы, которая определяет не только внешний вид, но и принципиальную возможность реализации замкнутых алгоритмов управления. Конструкция ориентирована на реализацию замкнутых

алгоритмов, использующих обратную связь от сенсорной системы.

Конструкция робота разработана на базе принципов модульности, ремонтпригодности и совместимости с современными сенсорными и вычислительными компонентами [2]. Основным несущим элементом служит П-образная рама (рис. 1). Рама имеет симметричную форму с ребрами жесткости. Габаритные размеры рамы подобраны так, чтобы обеспечить достаточное внутреннее пространство для размещения электрических компонентов. Снизу рама закрывается съемной крышкой (рис. 2). Элементы изготовлены методом FDM-печати из пластика PETG.

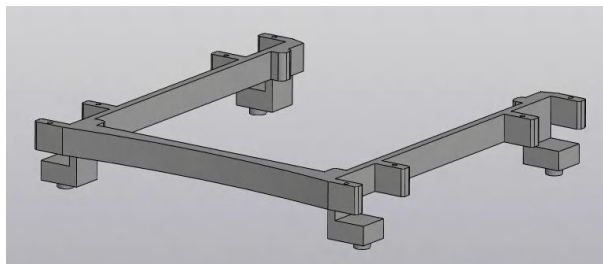


Рис. 1. 3D-модель несущей рамы робота-паука

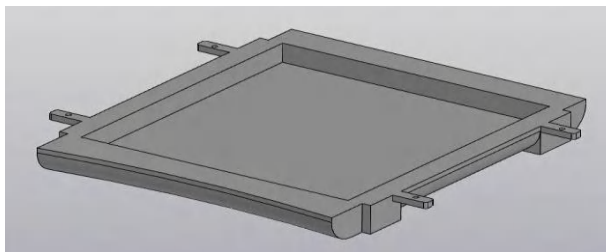


Рис. 2. 3D-модель нижнего корпуса робота-паука

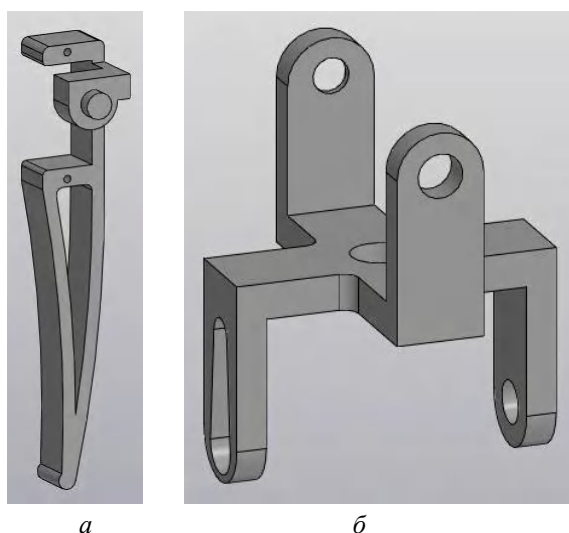


Рис. 3. 3D-модели лапки и крестовины шагающего механизма робота:
а – голень; б – крестовина

Каждая конечность спроектирована как двухзвенный рычажный механизм. Бедро и голень (рис. 3) соединены последовательно, движение осуществляется двумя сервоприводами. Такая кинематическая схема позволяет стопе перемещаться в вертикальной плоскости по сложной траектории, необходимой для подъема, переноса и опускания ноги.

Все механические компоненты надежно крепятся к раме с помощью саморезов, что обеспечивает простоту сборки, возможность быстрой замены изношенных частей и гибкость в модификации конструкции. Центральная часть рамы служит базой для крепления шагающих механизмов и играет ключевую роль в сохранении общей симметрии и баланса платформы.

Результаты исследования и их обсуждение

Механика ноги реализована в виде двухзвенного рычага. На рис. 4 представлена расчетная кинематическая схема шагающего механизма, где выделены ключевые геометрические параметры.

Начало системы координат помещено в точку крепления бедра к корпусу (точка O). Ось X направлена вертикально вниз, ось Y – горизонтально в сторону движения. Такая ориентация упрощает запись уравнений, так как все положительные перемещения стопы будут соответствовать опусканию ноги.

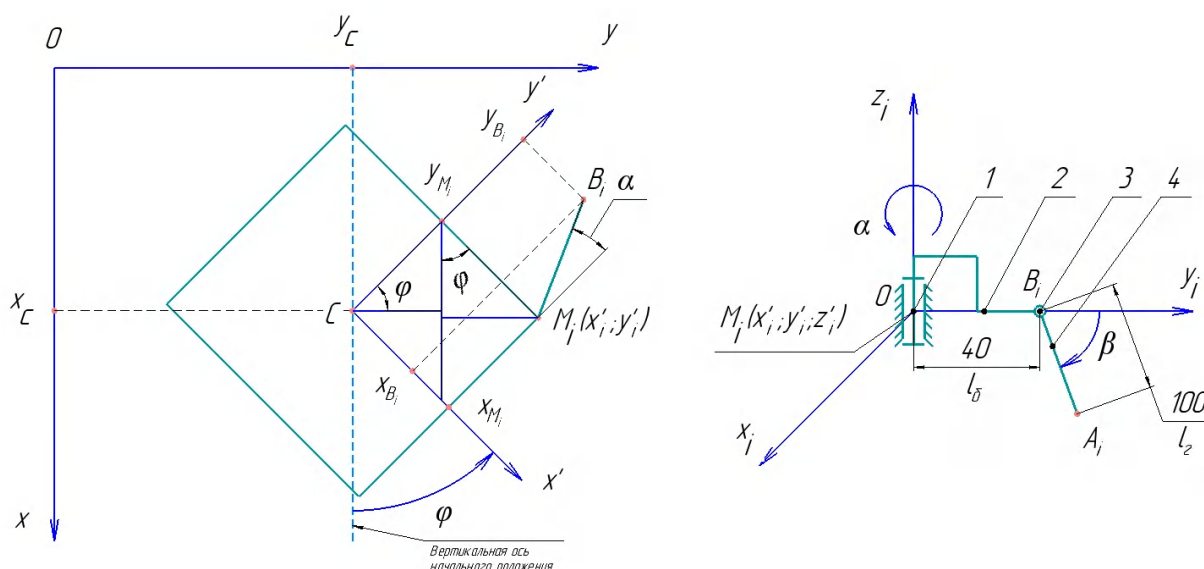


Рис. 4. Плоская двухзвенная кинематическая цепь, моделирующая одну ногу шагающего робота

Схема включает в себя следующие ключевые элементы:

– неподвижное основание (корпус робота) –

точка O (начало координат) или A_i (точка крепления первого сустава);

– первый сустав – создает угол φ ;

- первое звено – отрезок l_6 между точкой O и шарниром B_i ;
- второй сустав – создает угол β ;
- второе звено – отрезок l_r от коленного сустава B_i до стопы M_i ;
- стопа – конечная точка M_i , контактирующая с поверхностью;
- φ – угол поворота первого сервопривода (тазобедренный сустав);
- β – угол поворота второго сервопривода (коленный сустав).

Прямая задача позволяет определить координаты стопы M (X , Y) по заданным углам в суставах. Используя геометрические соотношения из схемы, получаем промежуточные координаты коленного сустава (B_i):

$$\begin{cases} X_{B_i} = l_6 \cdot \cos B \\ Y_{B_i} = -l_6 \cdot \sin B \end{cases} \quad (1)$$

Затем координаты стопы M (X_{M_i} , Y_{M_i}) выражаются через коленный сустав и угол стопы A_i :

$$\begin{cases} X_{M_i} = X_{B_i} + l_r \cdot \cos A \\ Y_{M_i} = Y_{B_i} + l_r \cdot \sin A \end{cases} \quad (2)$$

Подставив промежуточные координаты коленного сустава (B_i) в координаты стопы M (X_{M_i} , Y_{M_i}), получим координату стопы робота-паука:

$$\begin{cases} X_{M_i} = l_6 \cdot \cos B + l_r \cdot \cos A \\ X_{M_i} = -l_6 \cdot \sin B + l_r \cdot \sin A \end{cases} \quad (3)$$

Для типовых длин $l_6 = 80$ мм, $l_r = 100$ мм и углов $A = B = 45^\circ$ получаем:

$$\begin{cases} X_M = 80 \cdot 0,7 + 100 \cdot 0,7 = 126 \text{ мм} \\ Y_M = -80 \cdot 0,7 + 100 \cdot 0,7 = 14 \text{ мм} \end{cases} \quad (4)$$

Обратная задача кинематики позволяет рассчитывать необходимые углы для постановки стопы в требуемую точку пространства. Для желаемого положения стопы $X_M = 126$ мм, $Y_M = 14$ мм вычисляем расстояние от корпуса (точки O) до стопы:

$$R = \sqrt{X_M^2 + Y_M^2} = \sqrt{15876 + 196} = \sqrt{16072} = 126,8 \text{ мм} \quad (5)$$

Запишем теорему косинусов для треугольника «бедро–голень–расстояние до стопы»:

$$\cos \gamma = \frac{l_6^2 + l_r^2 - R^2}{2 \cdot l_6 \cdot l_r} = \frac{80^2 + 100^2 - 126,8^2}{2 \cdot 80 \cdot 100} = 0,0201, \quad (6)$$

где γ – угол между бедром и голенью (внутренний угол в колене).

Значит, угол между бедром и голенью равен:

$$\gamma = \arccos(0,0201) = 88^\circ \quad (7)$$

Найдем угол при бедре (относительно вертикали):

$$\alpha_1 = \arccos \frac{l_6^2 - l_r^2 + R^2}{2 \cdot l_6 \cdot l_r} = \arccos \frac{80^2 - 100^2 + 126,8^2}{2 \cdot 80 \cdot 170} = \arccos(0,4588) = 62,4^\circ \quad (8)$$

Тогда угол первого сервопривода:

$$B = \left| \alpha_1 - \arctan \frac{X_M}{Y_M} \right| = \left| 62,4^\circ - \arctan \left(\frac{126}{14} \right) \right| = |62,4^\circ - 83,6^\circ| = 21,2^\circ \quad (9)$$

Угол второго сервопривода (колена):

$$A = \pi - \gamma = \pi - \arccos \frac{l_6^2 + l_r^2 - R^2}{2 \cdot l_6 \cdot l_r} \quad (10)$$

Разработанная кинематическая модель опорной конечности представляет собой оптимальный баланс между конструктивной простотой и функциональными возможностями, что делает ее пригодной для применения в образовательных робототехнических комплексах [3].

Выводы

Разработанная конструкция обладает запасом масштабируемости, позволяющим в дальнейшем расширять функционал без существенной переработки аппаратной части.

В перспективе данная платформа может быть успешно применена в задачах инспекции труднодоступных территорий, логистики на производственных площадках.

В совокупности реализованные технические решения формируют надежную технологическую базу для создания следующего поколения компактных роботизированных систем с расширенными возможностями автономной навигации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизация: что такое, преимущества и виды // Skaeng. – URL: <https://skyeng.ru/magazine/wiki/it-industriya/chto-takoe-avtomatizatsiia/>
2. Обзор и перспективы развития мобильных шагающих робототехнических систем // Молодой ученый. – URL: <https://moluch.ru/archive/98/22115/>
3. Исследование динамики движения опорной конечности шагающего робота бионического типа // Транспортное машиностроение. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-dinamiki-dvizheniya-opornoy-konechnosti-shagayuschego-robota-bionicheskogo-tipa>

REFERENCES

1. Automation: what is it, advantages and types // Skaeng. – URL: <https://skyeng.ru/magazine/wiki/it-industriya/chto-takoe-avtomatizatsiia/>
2. Review and prospects for the development of mobile walking robotics systems // Young Scientist. – URL: <https://moluch.ru/archive/98/22115/>
3. Study of the dynamics of movement of the supporting limb of a bionic-type walking robot // Transport engineering. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-dinamiki-dvizheniya-opornoy-konechnosti-shagayuschego-robota-bionicheskogo-tipa>

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026
The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 621.926.9

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-76-81

Научная статья
Original article

Н. А. Прохоренко, А. Б. Голованчиков, Н. А. Мевша
**РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
КОНСТРУКЦИИ БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Наталья Андреевна Прохоренко, natasha292009@yandex.ru

Аннотация. Разработана конструкция автоматизированной бисерной мельницы, использование которой в промышленности приведет к повышению качества готового продукта за счет дополнительного самоизмельчения материала. Проведены сравнительные расчеты между существующей конструкцией бисерной мельницы и разработанной, в результате которых показан рост производительности с 190,92 кг/ч до 212,4 кг/ч.

Ключевые слова: бисерная мельница, энергоэффективность, микроизмельчение, помол, дробление, самоизмельчение материала, повышение качества

Для цитирования: Прохоренко Н. А., Голованчиков А. Б., Мевша Н. А. Разработка и расчет автоматизированной конструкции бисерной мельницы. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 76–81. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-76-81.

Информация об авторах:

Наталья Андреевна Прохоренко – доцент, канд. техн. наук, кафедра ПАХПП ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-5706-1475

e-mail: natasha292009@yandex.ru

Александр Борисович Голованчиков – профессор, д-р техн. наук, кафедра ПАХПП ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: 9275170082@mail.ru

Наталья Алексеевна Мевша – старший преподаватель кафедры ПЭБЖ ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-6658-8623

e-mail: seleznyova1994@yandex.ru

Вклад авторов:

Н. А. Прохоренко – проведение расчетов, участие в обсуждении результатов, разработка модернизируемой конструкции.

А. Б. Голованчиков – определение цели работы, обсуждение результатов полученных расчетов.

Н. А. Мевша – проведение расчетов, участие в обсуждении результатов, написание текста статьи.

N. A. Prokhorenko, A. B. Golovanchikov, N. A. Mevsha

DEVELOPMENT AND CALCULATION OF AN AUTOMATED DESIGN OF A BEAD MILL

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Natalya A. Prokhorenko, natasha292009@yandex.ru

Abstract. An automated bead mill design has been developed. Its industrial use will improve the quality of the finished product through additional self-grinding of the material. Comparative calculations between the existing bead mill design and the developed one have shown an increase in productivity from 190.92 kg/h to 212.4 kg/h.

Keywords: beadmил, energy efficiency, micro-grinding, grinding, crushing, self-grinding of material, quality improvement

For citation: Prokhorenko N. A., Golovanchikov A. B., Mevsha N. A. Development and calculation of an automated design of a bead mill. *Izvestiya VSTU*. 2026; 8(315): 76–81. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-76-81.

Information about the authors:

Natalya A. Prokhorenko – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Industrial Chemical Engineering VSTU

orcid.org/0000-0002-5706-1475

e-mail: natasha292009@yandex.ru

Alexandr B. Golovanchikov – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Industrial Chemical Engineering VSTU

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: 9275170082@mail.ru

Nataliya A. Mevsha – Senior Lecturer, Department of Industrial Ecology and Life Safety VSTU

orcid.org/0000-0002-6658-8623

e-mail: seleznyova1994@yandex.ru

Contributions of the authors:

Natalya A. Prokhorenko – development of the design, conducting and analyzing calculations, writing the text of the article, processing the research results, participating in the discussion of the results.

Alexandr B. Golovanchikov – defining the purpose of the work, developing automation of the developed design, participating in the discussion of the results.

Nataliya A. Mevsha – carrying out calculations, participating in the discussion of results, writing the text of the article.

Введение

Бисерные мельницы применяются в промышленности для сверхтонкого измельчения и диспергирования твердых веществ в жидкостях. Данные конструкции используются в различных отраслях промышленности: лакокрасочные материалы и покрытия (производство красок, эмалей, лаков для получения высокой дисперсности пигментов), фармацевтика и биотехнологии (измельчение активных фармацевтических субстанций, создание суспензий и эмульсий), косметика и личная гигиена, пищевая промышленность (изготовление шоколада, пищевых красителей, эмульсий, паст, со-

усов), электронная промышленность, агрохимия, нанотехнологии [1; 2] и др.

Целью является разработка автоматизированной конструкции бисерной мельницы, работающей с высокой производительностью и энергоэффективностью.

Материалы и методы исследования

Процесс измельчения твердых тел на части под действием механических сил подразделяется в зависимости от размеров выходного материала на дробление и помол. На рис. 1 представлена классификация процессов измельчения [3], а на рис. 2 – модернизируемая конструкция автоматизированной бисерной мельницы.

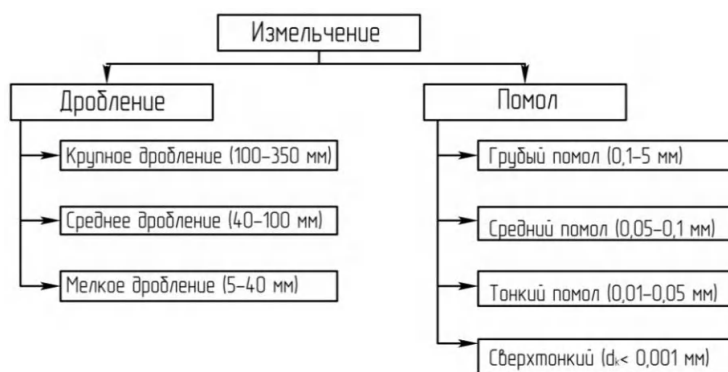


Рис. 1. Классификация процесса измельчения

Принцип действия разработанной конструкции бисерной мельницы заключается в измельчении исходного продукта с помощью гуммированных дисков и выступов, также за счет засыпания бисерной массы. В гуммиро-

ванных дисках находятся сквозные отверстия, за счет чего частицы бисерной и помольной массы вовлекаются в неупорядоченное турбулентное вращательное и аксиальное движение. Также из-за наличия тангенциальных и центро-

бежных сил частицы начинают скользить и с высокой скоростью ударяться о внутреннюю поверхность рабочего цилиндра. Высокая податливость материала кольцевых элементов с овальными отверстиями значительно снижает уровень контактных напряжений в зоне удара, и соответственно снижается интенсивность изнашивания рабочей поверхности цилиндра на

корпусе бисерной мельницы. Между валом привода, передающим вращение, и вертикальным рабочим органом установлена цилиндрическая пружина, которая приводит к возникновению осевых и угловых колебаний вертикального рабочего органа с высокой резонансной амплитудой, интенсифицируя тем самым процесс микроизмельчения [4].

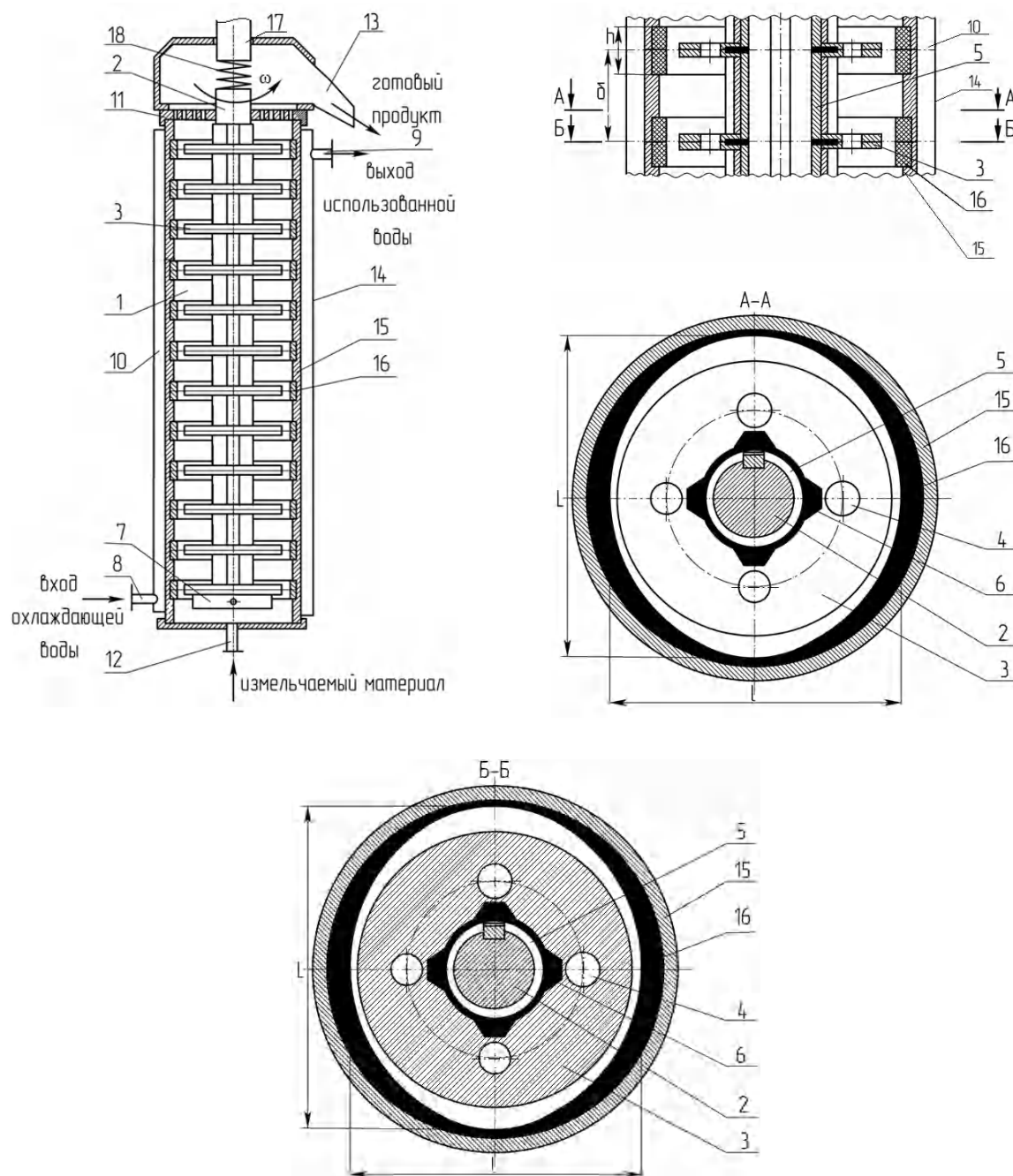


Рис. 2. Общий вид разработанной конструкции бисерной мельницы [4]:

1 – рабочий цилиндр; 2 – ротор; 3 – гуммированные диски; 4 – сквозные отверстия; 5 – втулки; 6 – выступы; 7 – стабилизирующий диск; 8, 9 – патрубки; 10 – зазор; 11 – фильтрующее сито; 12 – отверстие для подачи исходных компонентов; 13 – отверстие для слива; 14 – наружная оболочка; 15 – внутренняя оболочка; 16 – кольцевые резиновые элементы; 17 – вал привода; 18 – цилиндрическая пружина

Упругость витков цилиндрической пружины определяется по формуле:

$$a = \frac{2 \cdot \pi \cdot \nu^2 \cdot m}{g}, \quad (1)$$

где a – упругость витков цилиндрической пружины, Н/м; ν – частота вращения, Гц; m – масса вертикального рабочего органа с гуммированными дисками и втулками, кг [5].

Дополнительные осевые и угловые колебания на цилиндрической пружине с вынужденной частотой рассчитываются как:

$$n = 2 \cdot \nu \quad (2)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Были проведены расчеты вертикальной бисерной мельницы с мелющими телами из циркониевой керамики диаметром 2 мм и плотностью 2,526 кг/дм³ (нержавеющая сталь) по алгоритму, представленному в учебнике [1]. Необходимая производительность получаемой пасты – 800 кг/ч.

Результаты проведенных сравнительных расчетов сведем в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты сравнительного расчета предлагаемой с типовой конструкцией
бисерной мельницы МТ-140**

Наименование рассчитываемого параметра	Типовая конструкция бисерной мельницы	Предлагаемая конструкция бисерной мельницы
1. Объем пасты в контейнере мельницы, м ³	0,14	0,14
2. Объем бисера, л	47,5	42,4
3. Производительность бисерной мельницы, кг/ч	724,28	724,28
4. Число бисерных мельниц в технологической линии, шт.	1	1
5. Диаметр аппарата, м	0,37	0,32
6. Длина бисерной мельницы, м	1,3	1,1
7. Диаметр дисков, мм	300	280
8. Число дисков, шт.	9	8
9. Диаметр отверстий в дисках, мм	48	48
10. Частота вращения, об/с	11,52	11,9

На основании полученных сравнительных расчетов можно сделать вывод, что при одной и той же производительности работы бисерной мельницы происходит уменьшение геометрических размеров аппарата (диаметр с 0,37 м до 0,32 м, а длина с 1,3 м до 1,1 м). Если же проводить расчет при постоянных геометрических размерах бисерной мельницы (диаметр 370 мм,

длина 1300 мм), то с учетом выполненных модернизаций производительность возрастет с 724,28 кг/ч до 812,4 кг/ч.

Проведем расчет бисерных мельниц МТ-120 и МТ-70 с учетом внедрения гуммированных дисков и выступов, с необходимой производительностью получаемой пасты 800 кг/ч, результаты полученных расчетов сведем в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета автоматизированных бисерных мельниц

Наименование рассчитываемого параметра	МТ-120	МТ-70
1. Объем пасты в контейнере мельницы, м ³	0,12	0,07
2. Объем бисера, л	40	28
3. Производительность бисерной мельницы, кг/ч	431,37	317,7
4. Число бисерных мельниц в технологической линии, шт.	2	3
5. Диаметр аппарата, м	0,352	0,294
6. Длина бисерной мельницы, м	1,233	1,03
7. Диаметр дисков, мм	277	219
8. Число дисков, шт.	9	10
9. Диаметр отверстий в дисках, мм	44	35
10. Частота вращения, об/с	11,9	13,38

Для повышения качества готового продукта в бисерной мельнице и во избежание необходимости повторного диспергирования необходимо контролировать измельчение с помощью

автоматического управления (рис. 3). Для этого необходимо использовать датчик 2, измеряющий вязкость готового продукта на выходе из бисерной мельницы 1.

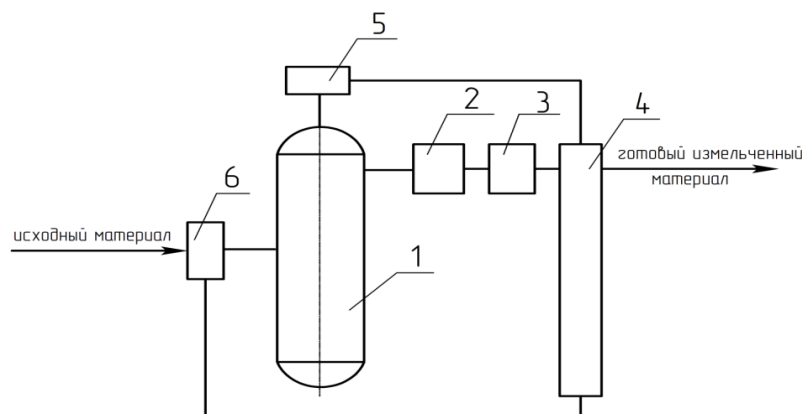


Рис. 3. Автоматизация работы бисерной мельницы:
1 – бисерная мельница; 2 – датчик вязкости готового измельченного продукта; 3 – блок сравнения исходной вязкости с заданной; 4 – коммутирующий блок; 5 – регулятор скорости вращения ротора; 6 – регулятор расхода дозируемого компонента

Если значение выше заданного значения вязкости в блоке сравнения 3, то коммутирующий блок 4 передает сигнал на механизм регулирующего органа 5, который изменяет вращение вала ротора бисерной мельницы, после чего сигнал передается на исполнительный механизм расхода исходного дозируемого компонента 6 [6; 7].

Выводы

На основании проведенных расчетов модернизируемой бисерной мельницы можно сделать вывод, что установка цилиндрической пружины между ротором и валом привода приводит к дополнительным осевым колебаниям с вынужденной частотой, определенной по уравнению (2). Выполнение отверстий кольцевых элементов из высокоэластичного материала в форме овала приведет к уменьшению зазора между выступами втулки, когда они находятся при вращении в зоне малой длины оси овала, и увеличению этого зазора, когда они находятся в зоне большей оси. Это позволит затормаживать вращение дважды, и приведет к повышению качества готового продукта вследствие дополнительного самоизмельчения материала, попадающего в эти зазоры. Использование в конструкции высокоэластичного материала повысит износостойкость корпуса бисерной мельницы, что увеличит общую производительность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Индейкин, Е. А. Пигментирование лакокрасочных материалов / Е. А. Индейкин, Л. Н. Лейбзон, И. А. Толмачев. – Ленинград : Химия (Ленингр. отд-ние), 1986. – 159 с.
2. Богатова, А. А. Разработка конструкции вибрационной бисерной мельницы / А. А. Богатова, Т. С. Бондаренко // XXX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: сб. матер. конф. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2025. – С. 38–39.
3. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – Москва : Химия, 1977. – 368 с.
4. П. м. 240538 Российская Федерация, МПК B02C 17/16 Бисерная мельница / Н. А. Прохоренко, А. Б. Голованчиков, А. А. Богатова ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2026.
5. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. 8-е изд., перераб. и доп. / В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой. – М. : Машиностроение, 2001.
6. Авт. св. 1161182 СССР, МПК B02C 25/00. Способ автоматического управления процессом измельчения в бисерной мельнице / Ахтеров В. М., Байтина Н. О., Манусов Е. Б. [и др.] ; Государственный ордена знака почта научно-исследовательский и проектный институт лакокрасочной промышленности. – 1985.
7. Манусов, Е. Б. Контроль и регулирование технологических процессов лакокрасочных производств / Е. Б. Манусов. – Москва : Химия, 1977. – 115 с.

REFERENCES

1. Indeykin, E. A. Pigmentation of paint and varnish materials / E. A. Indeykin, L. N. Leibzon, I. A. Tolmachev. – Leningrad : Khimiya (Leningr. publishing House), 1986. 159 p.
2. Bogatova, A. A. Design development of a vibrating bead mill / A. A. Bogatova, T. S. Bondarenko // XXX Regional Conference of young scientists and researchers of the Vol-

gograd region: collection of conference materials / editorial board: S. V. Kuzmin (ed.) [et al.]; VolgSTU [et al.]. – Volgograd, 2025. – Pp. 38–39.

3. *Sidenko, P. M.* Grinding in the chemical industry / P. M. Sidenko. – 2nd ed., reprint. Moscow : Khimiya Publ., 1977. – 368 p.

4. P. M. 240538 Russian Federation, IPC B02C 17/16 Bead Mill / N.A. Prokhorenko, A. B. Golovanchikov, A.A. Bogatova; FSBEI VO VolgSTU. – 2026.

5. *Anuryev, V. I.* Handbook of a machine-building de-

signer: In 3 volumes, 8th ed., revised. and add. Edited by I. N. Zhestkova. – Moscow : Mashinostroenie, 2001.

6. Auth. St. 1161182 USSR, IPC B02C 25/00 for automatic control of the grinding process in a bead mill / Akhterov V. M., Baytina N. O., Manusov E. B., and others; State Order of the Badge of Honor Scientific Research and Design Institute of the Paint Industry. – 1985.

7. *Manusov, E. B.* Control and regulation of technological processes of paint and varnish industries / E. B. Manusov. – Moscow : Khimiya Publ., 1977, 115 p.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 621.926.9

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-81-86

Научная статья

Original article

Н. А. Прохоренко, О. А. Залипаева, Н. А. Мевша

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СУШИЛКИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Наталья Андреевна Прохоренко, natasha292009@yandex.ru

Аннотация. Разработана автоматизированная конструкция пневматической сушилки, использование которой в промышленности приведет к росту производительности за счет создания благоприятных условий для высушивания исходного влажного материала с высокой адгезией. Внутри аппарата происходит создание противоточного движения встречно-закрученных потоков, что позволяет обрабатывать материалы с повышенной адгезионной способностью, кусковые и агрегированные материалы, а также ряд продуктов тонкопористой структуры.

Ключевые слова: сушка, энергоэффективность, пневматическая сушилка, влажность, пищевая соль, адгезия, влагосодержание, повышение качества

Для цитирования: Прохоренко Н. А., Залипаева О. А., Мевша Н. А. Разработка и расчет автоматизированной конструкции пневматической сушилки. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 81–86. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-81-86.

Наталья Андреевна Прохоренко – доцент, канд. техн. наук, кафедра ПАХПП ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-5706-1475

e-mail: natasha292009@yandex.ru

Ольга Александровна Залипаева – доцент, канд. техн. наук, кафедра ПАХПП ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-9345-2625

e-mail: zalipaevaolga@yandex.ru

Наталья Алексеевна Мевша – старший преподаватель кафедры ПЭБЖ ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-6658-8623

e-mail: seleznyova1994@yandex.ru

Вклад авторов:

Н. А. Прохоренко – проведение расчетов, участие в обсуждении результатов, разработка модернизированной конструкции.

О. А. Залипаева – обсуждение результатов полученных расчетов.

Н. А. Мевша – участие в обсуждении результатов, написание текста статьи.

N. A. Prokhorenko, O. A. Zalipaeva, N. A. Mevsha

DEVELOPMENT AND CALCULATION OF AN AUTOMATED DESIGN OF A PNEUMATIC DRYER

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Natalya A. Prokhorenko, natasha292009@yandex.ru

Abstract. An automated pneumatic dryer design has been developed. Its industrial use will lead to increased productivity by creating favorable conditions for drying the initial wet material. The unit creates a counter-current flow of counter-swirling streams, enabling the processing of materials with increased adhesive properties, lumpy and aggregated materials, as well as a range of fine-pored products.

Keywords: drying, energy efficiency, pneumatic dryer, humidity, table salt, adhesion, moisture content, quality improvement

For citation: Prokhorenko N. A., Zalipaeva O. A., Mevsha N. A. Development and calculation of an automated design of a pneumatic dryer. *Izvestiya VSTU*. 2026; 8(315): 81–86. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-81-86.

Information about the authors:

Natalya A. Prokhorenko – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Industrial Chemical Engineering VSTU

orcid.org/0000-0002-5706-1475

e-mail: natasha292009@yandex.ru

Olga A. Zalipaeva – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Industrial Chemical Engineering VSTU

orcid.org/0000-0002-9345-2625

e-mail: zalipaevaolga@yandex.ru

Nataliya A. Mevsha – Senior Lecturer, Department of Industrial Ecology and Life Safety VSTU

orcid.org/0000-0002-6658-8623

e-mail: seleznyova1994@yandex.ru

Contributions of the authors:

Natalya A. Prokhorenko – conducting calculations, participating in the discussion of results, developing a modernized design.

Olga A. Zalipaeva – discussion of the results of the obtained calculations.

Nataliya A. Mevsha – participation in the discussion of the results, writing the text of the article.

Введение

Процессы сушки распространены в химической, нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности. Применение процесса сушки в пищевой промышленности заключается в удалении влаги из сырья или продуктов с целью увеличения срока хранения, упрощения транспортировки, а также получения новых продуктов с измененными свойствами. Области применения пневматических сушилок следующие: сушка мелкодисперсного материала (соль, сухие растительные экстракты, отходы сельскохозяйственных культур); сушка зерновых культур и круп; сушка минеральных суспензий [1].

Целью работы является разработка автоматизированной конструкции пневматической трубы-сушилки, используемой при сушке мелкодисперсного материала.

Материалы и методы исследования

Распространенными проблемами при работе пневматической трубы-сушилки являются: повышенные удельные расходы энергии; опас-

ность взрыва; износ оборудования; налипание сыпучего материала на стенки аппарата сушки [2].

На рисунке 1 представлена технологическая схема производства пищевой соли. Влажная соль из вагона отправляется в корытную мойку, после чего происходит первый этап дробления, а после прохождения гидроциклона идет второй этап дробления.

Затем влажная соль отправляется на сушку в пневматической трубе-сушилке, а после очистки в циклоне соль поступает на завершающий этап дробления, откуда сухой готовый продукт уходит на фасовку.

В настоящее время разрабатываются сушильные камеры с автоматизированным управлением и контролем.

Модернизация может включать разделение рабочего пространства на зоны, установку новых узлов управления калорифером, циркулярных насосов, автоматику управления, precisely вытяжную вентиляцию и другое оборудование.

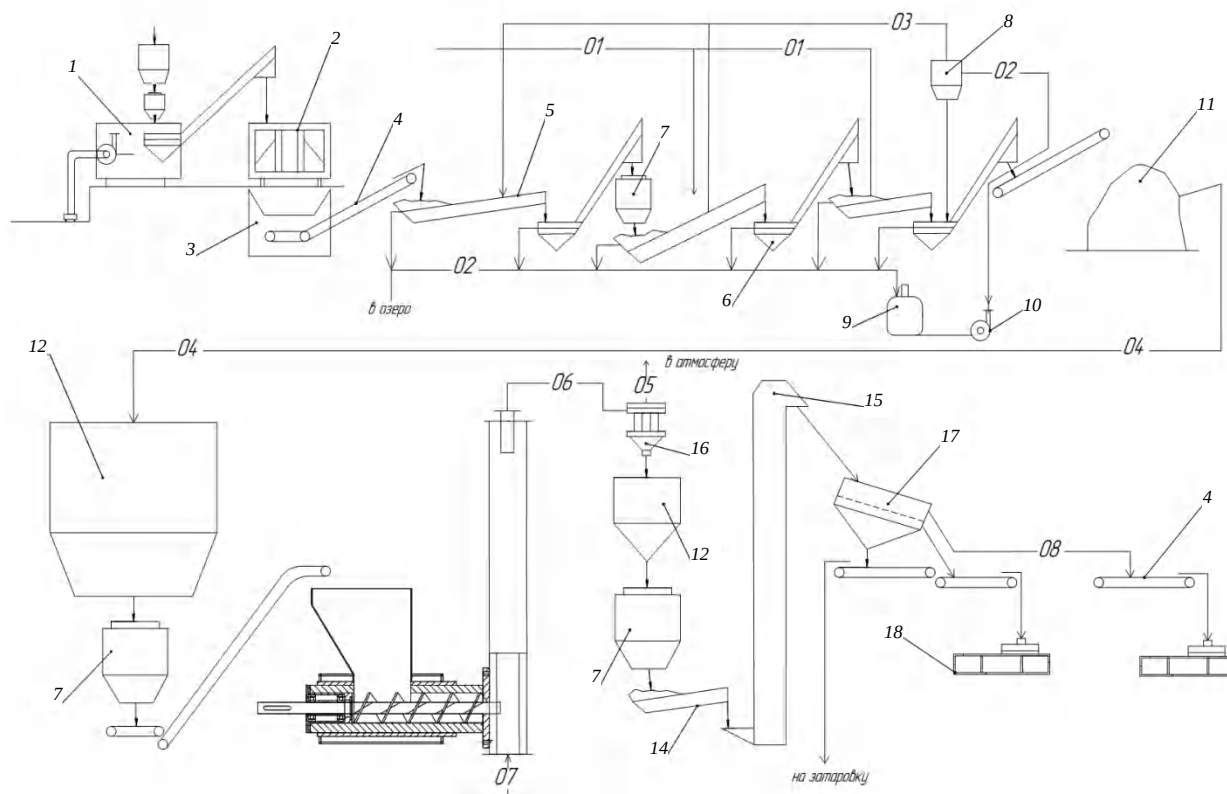


Рис. 1. Технологическая схема переработки пищевой соли [1]:

1 – солекомбайн; 2 – вагон; 3 – завальная яма; 4 – ленточный конвейер; 5 – выгрузочное устройство корытная мойка; 6 – ковшовый элеватор; 7 – дробилка; 8 – гидроциклон; 9 – емкость с мешалкой; 10 – насос; 11 – бугор соли; 12 – бункер; 13 – сушилка; 14 – винтовой конвейер; 15 – элеватор; 16 – циклон; 17 – грохот; 18 – фасовочный автомат

На рисунке 2 представлен общий вид работы существующей конструкции пневмосушилки. Влажный материал подается распределительным коллектором в нижнюю секцию сушильной камеры. После чего поток ненагретого атмосферного воздуха (или подогретого газа) подхватывает сыпучий материал и транспортирует его вверх по камере. В процессе движения материал высушивается, попадает в выходной патрубок, где частицы выпадают из газового потока в циклоне, а газ выводится в систему на дальнейшую очистку [3; 4].

В качестве объекта управления при автоматизации процесса сушки рассмотрим пневматическую трубу-сушилку с системой очистки, в которой сушильным агентом служат дымовые газы. Показателем эффективности данного процесса является влажность материала, выходящего из сушилки, а целью управления – поддержание этого параметра на определенном значении. Основной регулируемой величиной является температура материала на выходе из выпускной воронки сушилки (рег. 4), который вносит регулирующие воздействия с изменением расхода сушильного агента (рег. 3). Температу

ратура воздуха на входе в барабан регулируется изменением расхода теплоносителя, подаваемого в воздухоподогреватель (рег. 1), а влажность – изменением расхода циркулирующего воздуха (рег. 2).

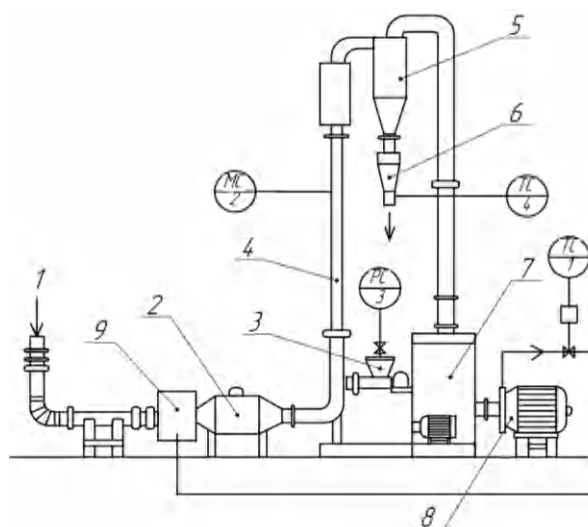


Рис. 2. Общий вид пневматической трубы-сушилки [1]:

1 – входной патрубок; 2 – камера смешения; 3 – распределительный коллектор; 4 – сушильная камера; 5 – циклон; 6 – выпускная воронка; 7 – вентилятор; 8 – приводной электродвигатель вентилятора; 9 – запорная арматура

Наименование параметра	Размерность	Величина
Исходные данные		
Начальная производительность по влажному материалу, G_n	кг/ч	2000
Начальная влажность материала на входе, $w_{н1}$	кгW/кгG	0,06
Конечная влажность материала на выходе, $w_{к1}$	кгW/кгC _к	0,002
Температура воздуха, t_0	°C	25
Относительная влажность окружающего воздуха, ϕ_0	—	0,5

Окончание таблицы

Наименование параметра	Размерность	Величина
Температура воздуха на входе в сушилку, t_1	°C	200
Температура воздуха на выходе из сушилки, t_2	°C	75
Диаметр частиц, d_k	м	0,001
Плотность частиц, ρ_k	кг/м ³	2165
Коэффициент теплопроводности, λ_0	Вт/м·град	0,0244
Расчетные параметры		
Производительность по удаляемой влаге из частиц, W	кг/ч	115,9
Производительность по высушенному материалу, G_k	кг/ч	1884
Относительная массовая влажность материала на входе в трубу-сушилку, ω_n	кг/кг	0,063
Относительная массовая влажность материала на выходе из трубы-сушилки, ω_k	кг/кг	0,002
Производительность по абсолютно сухим частицам, G	кг/ч	1927,6
Температура частиц на выходе, t_{mk}	°C	74,5
Относительные расход, L_{cm}	кг/кг	1,33
Число Архимеда, Ar	—	36383,87
Производительность по частицам, F_k	м ³ /с	1,64
Число Нуссельта, Nu	—	10,56
Средняя движущая сила процесса теплопередачи, Δt_t	°C	29,78
Среднее время пребывания частиц, τ_t	с	6,7
Скорость уноса частиц высушиваемого материала, v_y	м/с	7,43
Средняя скорость воздуха в трубе-сушилке, v_b	м/с	8,92
Число Рейнольдса для скорости начала псевдооживления, Re_0	—	15,4
Скорость воздуха для начала псевдооживления, v_0	м/с	0,401
Средний расход влажного воздуха в трубе-сушилке, L_c	кг/ч	1463
Расчетный диаметр трубы-сушилки, D_{yt}	м	0,31
Объем трубы-сушилки, рассчитанный с учетом теплопередачи, V_{at}	м ³	0,78
Высота трубы-сушилки, рассчитанная с учетом теплопередачи, H_{gt}	м	9,98

Выводы

Разработана автоматизированная конструкция пневматической трубы-сушилки, которая может найти применение в производстве пищевой соли. За счет адгезионно-когезионных свойств высушиваемых материалов значительно усложняется процесс сушки: происходит налипание материала на внутренние стенки сушильного аппарата, из-за чего впоследствии проходное сечение сушильной камеры уменьшается, что требует регулярной механической очистки аппарата. Выполнение сушильной камеры, объединенной с перфорированной обечайкой, позволяет непрерывно подавать поток воздуха с помощью тягодутьевого устройства. В результате проведенного сравнительного расчета были получены уменьшенные геометрические размеры сушильной камеры, работающей с одинаковой производительностью:

диаметр изменяется с 0,4 м до 0,31 м, а высота с 12,1 м до 9,98 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков, А. В. Сушка в химической промышленности / проф. А. В. Лыков. – Москва : Химия, 1970. – 432 с.
2. Членов, В. А. Сушка сыпучих материалов в вибрирующем слое / В. А. Членов, Н. В. Михайлов. – Москва : Стройиздат, 1967. – 224 с.
3. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – Москва : Химия, 1977. – 368 с.
4. Моделирование и расчет пневматической трубы-сушилки с учетом продольной диффузии по сушильному агенту / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, Н. А. Прохоренко, А. А. Шурак, М. В. Топилин // Химическая технология. – 2025. – Т. 26, № 9. – С. 350–360. – DOI: 10.31044/1684-5811-2025-26-9-350-360.
5. Прохоренко, Н. А. Расчет и интенсификация работы пневматической сушилки / Н. А. Прохоренко, Т. С. Бондаренко // Вестник научных конференций. – 2026. – № 1–1 (125). – С. 87–89.

REFERENCES

1. Lykov, A. V. Drying in the chemical industry / prof. A.V. Lykov. Moscow : Khimiya Publ., 1970. 432 p.
2. Chlenov, V. A. Drying of bulk materials in a vibrating boiling layer / V. A. Chlenov, N. V. Mikhailov. – Moscow : Stroyizdat, 1967. – 224 p.
3. Sidenko, P. M. Grinding in the chemical industry / P. M. Sidenko. – 2nd ed., reprint. Moscow : Khimiya Publ., 1977. – 368 p.
4. Modeling and calculation of a pneumatic drying tube taking into account longitudinal diffusion by a drying agent / A. B. Golovanchikov, N. A. Metentsov, N. A. Prokhorenko, A. A. Shurak, M. V. Topilin // Chemical Technology. – 2025. – Vol. 26, No. 9. – С. 350–360. – DOI: 10.31044 / 1684-5811-2025-26-9-350-360.
5. Prokhorenko, N. A. Calculation and intensification of the pneumatic grinder / N. A. Prokhorenko, T. S. Bondarenko // Bulletin of scientific conferences. – 2026. – № 1–1 (125). – Pp. 87–89.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026
The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 691.175.3, 620.174
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-86-89

Научная статья
Original article

Ф. К. Салех, К. А. Драпак, М. П. Кухтик

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО АРМИРОВАНИЯ
УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ ЗУБЬЕВ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ ПОЛИАМИДНОГО КОМПОЗИТА**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Кристина Алексеевна Драпак, loldra@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние количества армированных слоев и контуров непрерывного углеродного волокна на несущую способность при изгибе зубьев зубчатых колес из полиамида РА6, изготовленных методом послойного наплавления. Подготовка моделей и траекторий армирования выполнена в программной среде Stereotech Slicer. Проведены испытания образцов с различными схемами армирования. Установлено, что наибольшая максимальная нагрузка при изгибе, равная 1107,7 Н, достигается при использовании девяти армированных слоев и одного контура углеродного волокна. Увеличение количества армированных слоев до одиннадцати и увеличение числа контуров волокна до двух не привели к повышению несущей способности, что указывает на необходимость оптимизации топологии армирования зубчатого колеса.

Ключевые слова: FDM-печать, непрерывное армирование, углеродное волокно, полиамидный композит, зубчатые колеса, прочность при изгибе, аддитивное производство

Для цитирования: Салех Ф. К., Драпак К. А., Кухтик М. П. Влияние параметров непрерывного армирования углеродным волокном на прочность при изгибе зубьев зубчатых колес из полиамидного композита. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 86–89. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-86-89.

Информация об авторах:

Фиделис Коелех Салех – аспирант кафедры АПП ВолгГТУ

orcid.org/0009-0008-1389-8987

e-mail: lkoeleh@gmail.com

Кристина Алексеевна Драпак – преподаватель кафедры АПП ВолгГТУ

orcid.org/0009-0000-4830-2188

e-mail: loldra@yandex.ru

Михаил Петрович Кухтик – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-7258-6624

e-mail: m_kukhtik@vstu.ru

Вклад авторов:

Ф. К. Салех – определение цели работы, проведение экспериментов, обработка результатов, написание текста статьи.

К. А. Драпак – участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

М. П. Кухтик – участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

F. K. Salekh, K. A. Drapak, M. P. Kukhtik

**EFFECT OF CONTINUOUS CARBON FIBER REINFORCEMENT PARAMETERS
ON FLEXURAL STRENGTH OF TEETH OF POLYAMIDE COMPOSITE GEARS**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Kristina A. Drapak, loldra@yandex.ru

Abstract. The effect of the number of reinforced layers and contours of continuous carbon fiber on the flexural load-bearing capacity of gear teeth in PA6 polyamide gears. The preparation of models and reinforcement paths was performed in the Stereotech Slicer software environment. Samples with different reinforcement patterns were tested. It was found that the highest maximum flexural load of 1107.7 N is achieved when using nine reinforced layers and one carbon fiber contour. Increasing the number of reinforced layers to eleven and increasing the number of fiber contours to two did not increase the load-bearing capacity, indicating the need to optimize the reinforcement topology of the gear wheel.

Keywords: FDM printing, continuous fiber reinforcement, carbon fiber, polyamide composite, gears, flexural strength, additive manufacturing

For citation: Salekh F. K., Drapak K. A., Kukhtik M. P. Effect of continuous carbon fiber reinforcement parameters on flexural strength of teeth of polyamide composite gears. *Izvestiya VSTU*. 2026; 8(315): 86–89. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-86-89.

Information about the authors:

Fidelis K. Salekh – Postgraduate Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
orcid.org/0009-0008-1389-8987
e-mail: lkoeleh@gmail.com

Kristina A. Drapak – Lecturer, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
orcid.org/0009-0000-4830-2188
e-mail: loldra@yandex.ru

Mikhail P. Kukhtik – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU
orcid.org/0000-0002-7258-6624
e-mail: m_kukhtik@vstu.ru

Contribution of the authors:

Fidelis K. Salekh – formulation of the research objectives, experimental investigation, data processing, writing the text of the article.

Kristina A. Drapak – participation in the discussion of the results, editing the text of the article.

Mikhail P. Kukhtik – participation in the discussion of results, editing the text of the article.

Введение

Полимерные зубчатые передачи находят все большее применение в современной технике благодаря своим уникальным свойствам: низкой плотности, способности поглощать вибрации и возможности работы без смазки. Однако их применение в высоконагруженных узлах ограничено относительно низкими прочностными характеристиками базовых термопластов. Использование дискретных волокон (рубленого углеволокна) повышает жесткость, но не обеспечивает радикального роста несущей способности, сопоставимого с металлическими аналогами [1].

Технология 3D-печати с непрерывным армированием (CFR – Continuous Fiber Reinforcement) [2] открывает новые возможности для создания анизотропных структур, где волокно укладывается вдоль линий действия главных напряжений. Для зубчатых колес критической зоной является основание зуба, где возникают максимальные изгибные напряжения. Оптимизация параметров укладки (количество слоев, траектория, плотность) позволяет значительно повысить ресурс передачи.

В работе [3] представлена геометрическая модель исследуемого зубчатого колеса, использованная для подготовки траекторий армирования и последующего проведения механических испытаний.

**Материалы и методы
исследования**

Подготовка модели к 3D-печати выполнялась в программной среде Stereotech Slicer, предназначенной для 5D/3D-принтеров с технологией армирования непрерывным углеволокном. Модель зубчатого колеса импортировалась в формате STL и ориентировалась на рабочей платформе с целью минимизации количества поддержек и обеспечения оптимального направления укладки армирующего волокна в зоне зубьев. В процессе подготовки задавались основные параметры печати: толщина

слоя 0,25 мм для обеспечения точности формирования зубчатого профиля, температура экструдера 260 °С для печати полиамидом PA6, армированным непрерывным углеродным волокном, температура стола 100 °С для надежного сцепления первого слоя, скорость печати 50 мм/с и заполнение 100 %. Схема армирования предусматривала непрерывное укладывание углеволокна вдоль линий основных нагрузок в основании зубьев колеса, что способствовало повышению прочностных характеристик конструкции.

Траектории укладки волокна ориентировались вдоль зон максимальных напряжений в основании зубьев [3].

Максимальное изгибное напряжение в основании зуба определялось по модифицированной формуле Льюиса:

$$\sigma = \frac{F_t}{bmY} \cdot k_f, \quad (1)$$

где F_t – окружное усилие; b – ширина зубчатого венца; m – модуль зубчатого колеса; Y – коэффициент формы зуба; k_f – коэффициент, учитывающий вклад непрерывного волокна.

Для оценки влияния параметров армирования была предложена эмпирическая зависимость:

$$P_{max} = a + bN + cC, \quad (2)$$

где P_{max} – максимальная нагрузка при изгибе; N – количество армированных слоев; C – количество контуров волокна; a , b и c – эмпирические коэффициенты модели. Коэффициенты модели определялись методом линейной аппроксимации экспериментальных данных.

Процесс изгибных испытаний армированной шестерни показан в [3]. Испытания проводились до разрушения образца с регистрацией нагрузки и прогиба на универсальной испытательной машине. Для повышения достоверности результатов испытания для каждой конфигурации проводились не менее трех раз с последующим усреднением полученных данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты механических испытаний образцов с различными параметрами армирования представлены в таблице.

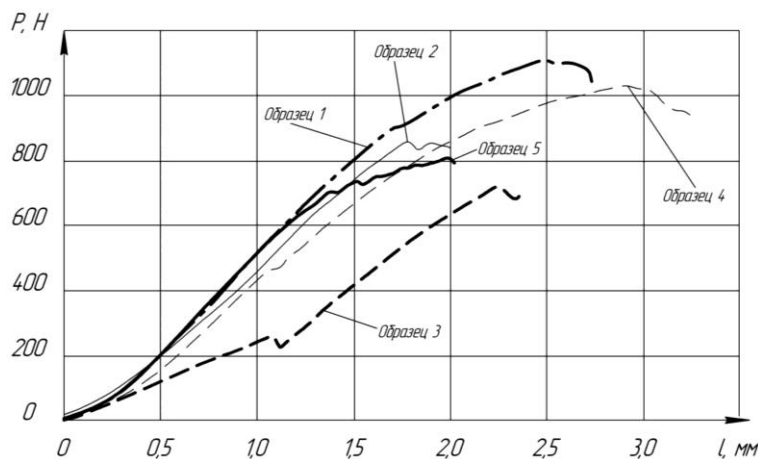
Результаты испытаний зубчатых колес из PA6 + УВ на изгиб

№ обр.	Материал	Усилие при деф. 1 мм, Н	P_{max} , Н	Прогиб Z_m , мм	Контур волокна, шт	Контур пластика, шт	Слой арм., шт
1	PA6 + УВ	514,3	1107,7	2,467	1	1	9
2	PA6 + УВ	478,8	855,5	1,764	1	1	11
3	PA6 + УВ	246,9	719,3	2,250	1	1	7
4	PA6 + УВ	437,6	1031,7	2,908	1	2	9
5	PA6 + УВ	525,9	806,7	1,983	2	1	9

Анализ результатов испытаний показал, что введение непрерывного углеволоконного армирования оказывает существенное влияние на механические характеристики образцов из PA6 (рисунок). Наибольшее значение максимальной нагрузки при изгибе (1107,7 Н) было получено у образца № 1 с девятью армированными слоями и одним контуром волокна. Увеличение количества армированных слоев до одиннадцати (образец № 2) привело к снижению максимальной нагрузки до 855,5 Н, что может быть связано с ухудшением межслойной адгезии. При

уменьшении количества слоев до семи (обр. № 3) наблюдалось значительное снижение несущей способности. Увеличение количества контуров пластика (обр. № 4) привело к росту максимального прогиба до 2,9008 мм, что свидетельствует о повышении пластичности зуба, несмотря на незначительное снижение пиковой нагрузки.

В то же время увеличение количества контуров углеволокна до двух (обр. № 5) не привело к росту прочности, что подтверждает важность оптимизации топологии укладки.



Зависимость нагрузки от прогиба для различных параметров армирования:

образец № 1 (9 армированных слоев, 1 контур волокна, 1 контур пластика);
 образец № 2 (11 армированных слоев, 1 контур волокна, 1 контур пластика);
 образец № 3 (7 армированных слоев, 1 контур волокна, 1 контур пластика);
 образец № 4 (9 армированных слоев, 1 контур волокна, 2 контура пластика);
 образец № 5 (9 армированных слоев, 2 контура волокна, 1 контур пластика)

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность непрерывного армирования углеродным волокном для повышения изгибной прочности полимерных зубчатых колес, изготовленных методом FDM-печати. Установлено, что существует оптимальное количество армированных слоев, обеспечивающее рациональное сочетание прочности и межслойной адгезии. В настоящем исследовании лучшие результаты были получены для образцов с девятью армированными слоями.

Выводы

Разработанная методика подготовки моделей и траекторий армирования в программной среде Stereotech Slicer позволяет эффективно усиливать наиболее нагруженные зоны зубчатых передач.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании высоконагруженных полимерных зубчатых колес и других деталей, изготовленных методом аддитивного производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Салех, Ф. К. Методика и оборудование для испытаний на прочность пластиковых зубчатых колес с армированием / Ф. К. Салех, А. А. Яковлев, И. С. Торубаров // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (298) / ВолгГТУ. – Волгоград,

2025. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 81–84. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-81-84.

2. Торубаров, И. С. Прочность на изгиб 3D-печатных изделий, армированных непрерывным углеволокном / И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, А. М. Макаров, М. П. Кухтик // Научные технологии в машиностроении. – 2025. – № 10 (172). – С. 23–30. – DOI: 10.30987/2223-4608-2025-10-23-30.

3. Салех, Ф. К. Испытания изгибной прочности зубчатых колес с армированием непрерывным углеволокном / Ф. К. Салех, М. П. Кухтик // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (308) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2026. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 50–53. – DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-50-53.

REFERENCES

1. Salekh, F. K. Methodology and equipment for strength testing of reinforced plastic gears / F. K. Salekh, A. A. Yakovlev, I. S. Torubarov // Izvestia VSTU: scientific journal No. 3 (298) / VSTU. – Volgograd, 2025. – (Series «Advanced technology in machine building»). – P. 81–84. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-81-84.

2. Torubarov, I. S. Resistance to bending of 3D-printed products reinforced with continuous carbon fiber / I. S. Torubarov, A. V. Drobotov, A. M. Makarov, M. P. Kukhtik // Science intensive technologies in mechanical engineering. – 2025. – No. 10 (172). – P. 23–30. – DOI: 10.30987/2223-4608-2025-10-23-30.

3. Salekh, F. K. Bending strength tests of gears with continuous carbon fiber reinforcement / F. K. Salekh, M. P. Kukhtik // Izvestia VSTU: scientific journal No. 1 (308) / VSTU. – Volgograd, 2026. – (Series «Advanced technology in machine building»). – P. 50–53. – DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-50-53.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

УДК 681.5
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-90-94

Научная статья
Original article

А. Ю. Хамраев, Е. С. Данилина, Н. В. Козловцева

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ОЧИСТКИ
ПРОИЗВОДСТВЕННО-ДОЖДЕВЫХ СТОЧНЫХ ВОД**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Артур Юрьевич Хамраев, artkham1@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки человеко-машинного интерфейса (HMI) верхнего уровня для автоматизированной системы управления установкой очистки производственных и ливневых сточных вод на объекте подземного хранения газа (ПХГ). Описана архитектура визуализации для SCADA, иерархия операторских экранов, структура мнемосхем технологических контуров, система тревог и архивирования данных. Ожидается, что внедрение разработанного эргономичного операторского интерфейса позволит существенно сократить время реакции диспетчера на нештатные ситуации и обеспечить стабильное достижение целевых показателей производительности и качества очистки сточных вод.

Ключевые слова: SCADA, HMI, панель оператора, АСУ ТП, очистные сооружения, подземное хранение газа

Для цитирования: Хамраев А. Ю., Данилина Е. С., Козловцева Н. В. Разработка системы управления установкой очистки производственно-дождевых сточных вод. Известия ВолгГТУ. 2026; 8(315): 90–94. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-90-94.

Информация об авторах:

Артур Юрьевич Хамраев – студент кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: artkham1@yandex.ru

Евгения Сергеевна Данилина – преподаватель кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: edanilina@vstu.ru

Надежда Викторовна Козловцева – старший преподаватель кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: nkozlovitseva@vstu.ru

Вклад авторов:

А. Ю. Хамраев – определение цели работы, обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Е. С. Данилина – обработка и анализ результатов исследования.

Н. В. Козловцева – обработка и анализ результатов исследования, структурирование материала.

A. Yu. Khamraev, E. S. Danilina, N. V. Kozlovitseva

**DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR AN
INDUSTRIAL-RAINWATER TREATMENT UNIT**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Artur Yu. Khamraev, artkham1@yandex.ru

Abstract. This paper presents the results of developing a top-level human-machine interface (HMI) for an automated control system of an industrial and stormwater treatment plant at an underground gas storage (UGS) facility. The SCADA visualization architecture, the hierarchy of operator screens, the structure of process mimic diagrams for technological loops, as well as the alarm management and data archiving systems are described. It is anticipated that the implementation of the developed ergonomic operator interface will significantly reduce the dispatcher's response time to abnormal situations, and ensure the stable achievement of target productivity and wastewater treatment quality metrics.

Keywords: SCADA, HMI, operator panel, automated process control system, sewage treatment plants, underground gas storage

For citation: Khamraev A. Yu., Danilina E. S., Kozlovitseva N. V. Development of a control system for an industrial-rainwater treatment unit. Izvestiya VSTU. 2026; 8(315): 90–94. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-8-315-90-94.

Information about the authors:

Artur Yu. Khamraev – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: artkham1@yandex.ru

Evgeniya S. Danilina – Lecturer, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: edanilina@vstu.ru

Nadezhda V. Kozlovitseva – Senior Lecturer, Department of Automation of Manufacturing Processes VSTU

e-mail: nkozlovitseva@vstu.ru

Contribution of the authors:

Artur Yu. Khamraev – determining the purpose of the work, processing and analyzing the research results, writing the text of the article.

Evgeniya S. Danilina – writing the article, expert evaluation.

Nadezhda V. Kozlovtsseva – structuring the paper, writing the article, expert evaluation

Введение

Объекты подземного хранения газа (ПХГ) являются ключевыми элементами инфраструктуры топливно-энергетического комплекса, эксплуатация которых сопровождается образованием значительных объемов загрязненных сточных вод. Специфика данных стоков определяется наличием нефтепродуктов, взвешенных веществ, технологических реагентов, а также ливневых вод, собираемых с промышленных площадок [1, 2].

Традиционные схемы управления установками очистки, основанные на периодическом контроле и ручном регулировании, не обеспечивают требуемой адаптации к динамике входных параметров, что приводит к перерасходу реагентов, нестабильному функционированию оборудования и риску экологических инцидентов [2]. В связи с этим актуальной является задача разработки автоматизированной системы управления, отвечающей современным требованиям к эргономике, надежности и кибербезопасности [3, 4]. Качество разработки человеко-машинного интерфейса (HMI) является критическим фактором: именно через SCADA-визуализацию оператор принимает решения в штатных и аварийных ситуациях, и от наглядности интерфейса напрямую зависит скорость реакции на нештатные события.

Материалы и методы исследования

Целью работы является обеспечение промышленной и экологической безопасности объекта подземного хранения газа (ПХГ) на

площадке ООО «Газпром ПХГ» за счет внедрения автоматизированной системы управления установкой очистки производственных и ливневых сточных вод. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ технологического процесса очистки стоков и информационных потребностей оператора.

2. Обоснование выбора технических средств визуализации и их интеграция с нижним уровнем автоматизации.

3. Разработка архитектуры HMI-интерфейса: иерархия экранов, мнемосхемы контуров, система тревог и архивирования.

4. Оценка эффективности внедрения на основе эксплуатационных данных.

Объект автоматизации включает приемные резервуары, камеры отстаивания, блок коалесцентной очистки, реагентное хозяйство и узел выдачи очищенной воды. Управление осуществляется программируемым логическим контроллером (ПЛК) ОВЕН ПЛК160, взаимодействующим с датчиками уровня, давления, расхода и температуры. Выбор технических средств осуществляется с учетом жестких климатических требований (диапазон температур от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$, влажность до 80 % при 35°C), наличия резерва по каналам ввода-вывода не менее 20 %, степени защиты не ниже IP56 и соответствия нормам взрыво- и пожаробезопасности.

Перечень основных технических средств приведен в таблице. Структурная схема АСУ ТП с указанием уровней автоматизации и каналов связи представлена на рис. 1.

Перечень используемого оборудования

Наименование	Артикул
Программируемый логический контроллер	ПЛК160-24.И-М
Модуль дискретного ввода	МВ210-212-16
Модуль дискретного вывода	МУ210-401-16
Модуль аналогового ввода	МВ210-101-8
Блок питания	БП60Б-Д4-24
Панель оператора	WEINTEK MT8000
Датчик давления	DMP 331P
Сигнализатор уровня (вибрационный)	ЭЛМЕТРО-ВСПУ
Термопреобразователь сопротивления	ТПУ-205

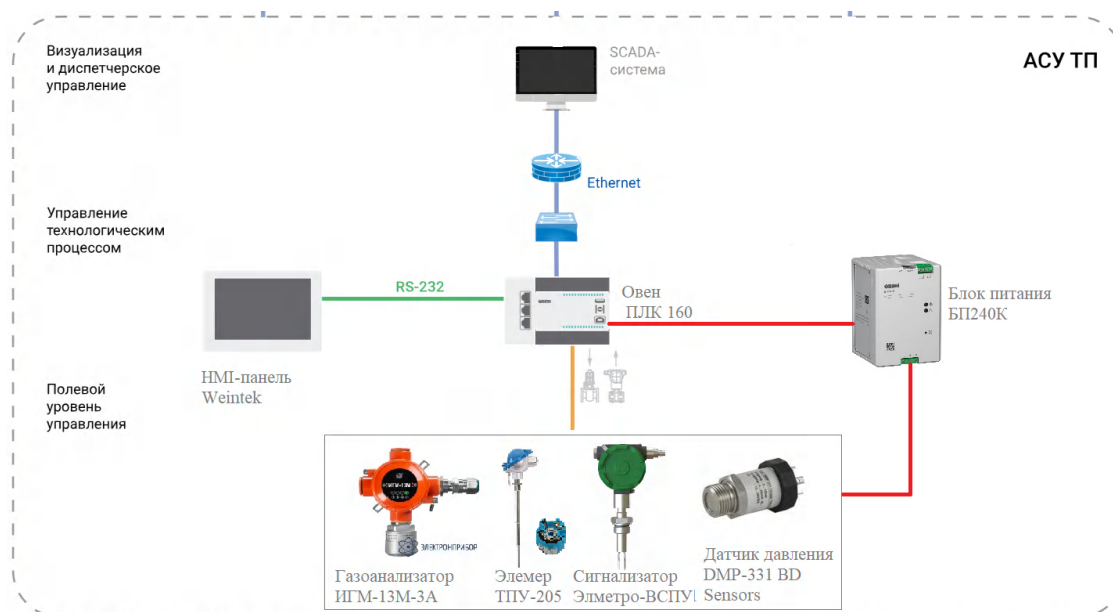


Рис. 1. Структурная схема разработанной АСУ ТП

Для решения второй поставленной задачи был разработан алгоритм управления системой, а также программа управления на языке программирования FBD (FunctionBlockDiagram) в среде программирования CoDeSysv2.3.

При разработке HMI-интерфейса был применен принцип иерархической навигации, соответствующий рекомендациям международного стандарта ISA-101 по эргономике операторских интерфейсов [3]. Архитектура визуализации построена по многоуровневой схеме:

Уровень 0 (Навигационный): постоянная верхняя панель с доступом к основным разде-

лам, индикатором активных аварий и идентификатором пользователя.

Уровень 1 (Обзорный): главная мнемосхема установки со сводкой по ключевым параметрам.

Уровень 2 (Детализированный): расширенное представление отдельных технологических узлов с возможностью локального управления.

Уровень 3 (Сервисный): тренды, журнал событий, архивы, настройки и управление доступом.

Главный экран (рис. 2) предназначен для диспетчера и обеспечивает обзор всей системы в режиме реального времени.

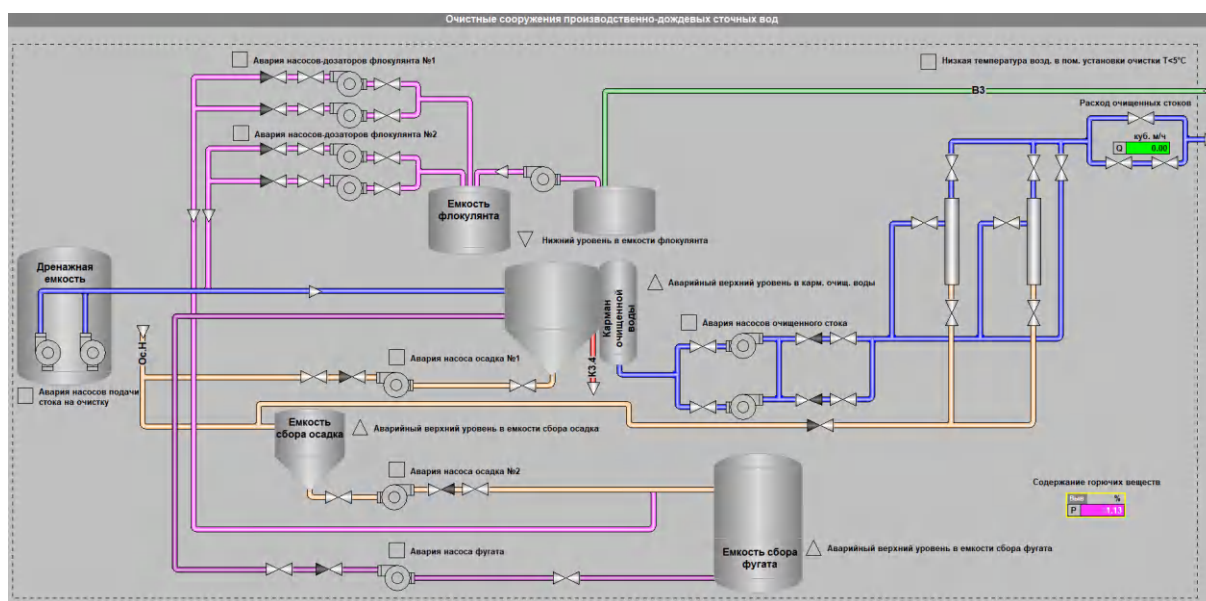


Рис. 2. Главный (основной) экран панели оператора

На экране отображаются: анимированная мнемосхема с динамикой потоков и состоянием запорной арматуры; текущие уровни в резервуарах с цветовой индикацией (зеленый – норма, желтый – предупреждение, красный – авария); мгновенные значения расхода очищенной воды ($\text{м}^3/\text{ч}$); панель активных тревог с приоритетной сортировкой. Цветовая палитра выполнена в нейтральных тонах, что позволяет оператору быстро замечать отклоняющиеся параметры [3].

Для детального контроля разработаны специализированные мнемосхемы (рис. 3) для приемного резервуара, блока коалесцентной очистки, реагентного хозяйства и узла выпуска. Каждый экран содержит цифровые индикаторы с единицами измерения, кнопки ручного управления с подтверждением операции, встроенный мини-тренд по ключевому параметру за 24 часа и кнопку перехода в журнал событий данного контура.

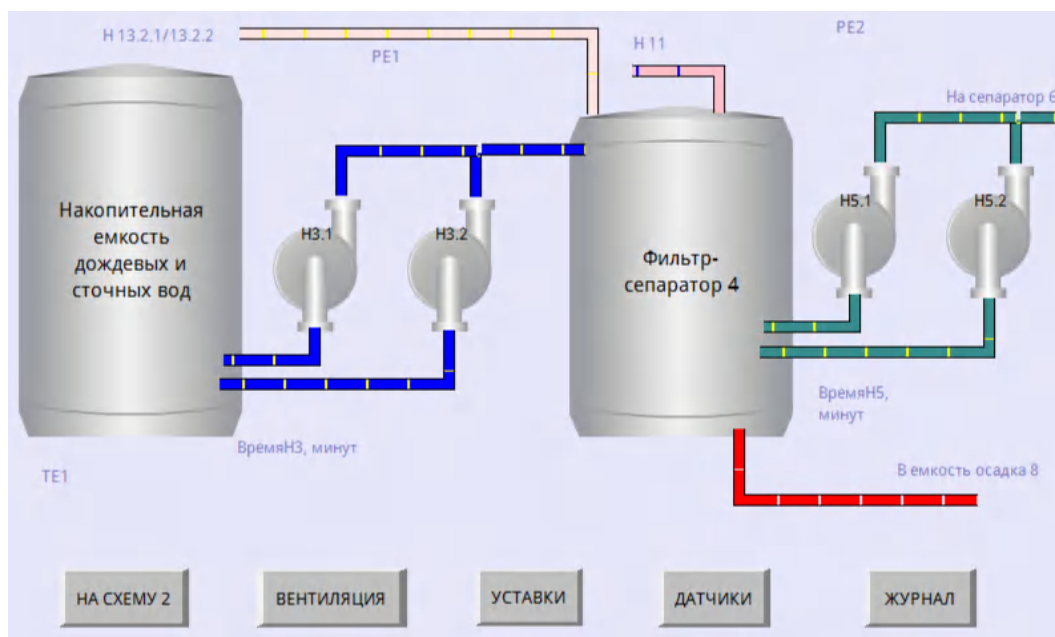


Рис. 3. Экран управления технологическим контуром

Также реализована многоуровневая система тревог с классификацией по приоритетам: критические (красные, требуют немедленной реакции), предупредительные (желтые) и информационные (синие). Все события фиксируются в журнале с указанием времени, текста сообщения и факта квитирования оператором. Для анализа динамики процесса предусмотрены тренды реального времени и исторические архивы с возможностью экспорта данных в формат CSV.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки эффективности внедренной системы был проведен анализ эксплуатационных показателей за шесть месяцев до и после модернизации.

На основе данных выходного расходомера выполнено сравнение суточной производительности установки.

До автоматизации фактическая производительность установки была недостаточной, что регулярно приводило к переполнению и аварийным переливам из приемных резервуаров. Среднее время реакции оператора на изменение гидравлической нагрузки составляло 15–20 минут из-за недостаточной информированности о текущем состоянии системы.

Внедрение системы автоматического управления с разработанной SCADA-визуализацией позволило:

- полностью исключить аварийные переливы приемных резервуаров за счет своевременного оповещения и автоматического запуска резервных насосов;
- увеличить производительность комплекса на 73 % за счет оптимизации гидравлической нагрузки и дозирования реагентов;
- сократить время реакции оператора на нештатные ситуации с 15–20 до 2–3 минут благодаря наглядной мнемосхеме и приоритизированной системе тревог.

Выводы

В работе представлена визуализация для SCADA-системы верхнего уровня АСУ объектом ПХГ, позволяющая оперативно управлять установкой очистки производственных и ливневых сточных вод.

Основные результаты работы:

1. Обоснован выбор аппаратной части для НМИ-визуализации с учетом требований к интеграции с ПЛК ОВЕН и условиям эксплуатации на объекте ПХГ.

2. Разработана иерархическая архитектура операторского интерфейса, соответствующая принципам эргономики SCADA-систем (стандарт ISA-101).

3. Спроектированы мнемосхемы всех технологических контуров установки с анимацией потоков, цветовой индикацией состояний и возможностью локального управления.

4. Реализована многоуровневая система тревог с приоритизацией событий и протоколированием действий персонала.

5. Промышленная эксплуатация показала повышение производительности очистки производственных и ливневых стоков на 73 % и полное исключение аварийных переливов резервуаров.

Разработанный SCADA-интерфейс обеспечивает операторов эффективным инструментом контроля, повышает скорость принятия реше-

ний и гарантирует соответствие качества очищенной воды нормативным требованиям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод : учеб. для вузов / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – Москва : АСВ, 2002. – 704 с.
2. Геращенко, А. А. Основы водоотведения и очистки сточных вод : учеб. пособие / А. А. Геращенко, Д. О. Игнаткина, Ю. Ю. Юрьев. – Волгоград : ВолгГТУ, 2024. – 142 с.
3. ГОСТ Р МЭК 62443-2-1–2015. Сети коммуникационные промышленные. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы. Часть 2-1. Составление программы обеспечения защищенности системы управления и промышленной автоматизации. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 48 с.
4. ISA-101. Human Machine Interfaces for Process Automation Systems. – International Society of Automation, 2015. – 84 p.

REFERENCES

1. Yakovlev, S. V. Wastewater Disposal and Treatment: University Textbook / S. V. Yakovlev, Yu. V. Voronov. – Moscow : ASV, 2002. – 704 p.
2. Gerashchenko, A. A. Fundamentals of Wastewater Disposal and Treatment: Study Guide / A. A. Gerashchenko, D. O. Ignatkina, Yu. Yu. Yuriev. – Volgograd: VolgSTU, 2024. – 142 p.
3. GOST R IEC 62443-2-1-2015. Industrial communication networks. Network and system security. Part 2-1. Establishing an industrial automation and control systems security program. – Moscow : Standartinform, 2016. – 48 p.
4. ISA-101. Human Machine Interfaces for Process Automation Systems. – International Society of Automation, 2015. – 84 p.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026, доработана 01.07.2026, подписана в печать 15.07.2026

The article was submitted 15.06.2026, revised 01.07.2026, accepted for publication 15.07.2026

Ответственный за выпуск Ольга Александровна **МАКАРОВА**

Оригинал-макет и электронная версия издания подготовлены
редакционно-издательским отделом Издательства ВолгГТУ

Корректурa **Н. Н. Кваши**
Компьютерная верстка: **Е. В. Макарова**

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: ianovakov@vstu.ru

Темплан 2026 г. Поз. № 3ж. Дата выхода в свет 29.09.2026 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,48.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 416.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Требования к оформлению статей

В научном журнале «Известия ВолгГТУ», серии "Прогрессивные технологии в машиностроении" публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований и представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области прогрессивных технологий в машиностроении.

В журнале «Известия ВолгГТУ» серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» для Перечня ВАК лицензированы три специальности:

2.3.3 – шифр специальности «**Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами**» (технические науки).

2.5.5 – шифр специальности «**Технология и оборудование механической и физико-технической обработки**» (технические науки).

2.5.6 – шифр специальности «**Технология машиностроения**» (технические науки).

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором, без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. Направления исследований в статье должны соответствовать основной специальности и могут затрагивать смежные специальности.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия сборника, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

К публикации допускается не более двух статей автора в выпуске. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек.

Оформление рукописи

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word 2003-2010. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей в электронном виде в форматах *.docx(*.doc) и *.pdf.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный. Текст в таблицах и на рисунках допускается оформлять 12 кеглем через 1 интервал.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль / Размеры) для основного символа 14 кегль. Формулы размещаются по центру строки, сквозная нумерация формул в круглых скобках выполняется по правому полю страницы.

Рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor. На сайте ВолгГТУ журнал выкладывается в цветном виде, а печатается в черно-белом, это надо учесть при вставке рисунков.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. В заглавии статьи нежелательно использовать аббревиатуры и формулы, выполненные в формульных редакторах.

Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи (с указанием города и страны), адрес электронной почты, а также аннотация и ключевые слова на русском языке. В аннотации не допускается включать таблицы, сноски и перекрестные ссылки на источники из полного текста, а также аббревиатуры, которые раскрываются только в полном тексте. В качестве ключевых

чевых слов могут использоваться как одиночные слова, так и словосочетания (не более чем из трех слов). В ключевых словах не применяются причастные и деепричастные обороты.

Затем указываются разделы «Благодарности» (если есть) и «Финансирование» (если есть). Выделяется информация для цитирования статьи, а также информация о каждом авторе (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, название организации, E-mail, ORCID). Указываются сведения о вкладе каждого автора.

На английском языке повторяются инициалы и фамилия авторов (транслитерация выполняется по ГОСТ 7.79–2000), заглавие статьи, организация или предприятие, в котором работает автор статьи, аннотация и ключевые слова, благодарности, финансирование (если есть), информация для цитирования, сведения об авторах, сведения о вкладе каждого автора.

Текст статьи рекомендуется оформлять с выделением разделов: «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования и их обсуждение», «Выводы». Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подраз рубрики.

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются. При оформлении библиографического списка не используется автоматическая расстановка сносков, при наличии у источников DOI – указывать обязательно. Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

После текста статьи оформляется библиографический список. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

После библиографического списка указываются даты поступления в редакцию, до работки статьи и подписания в печать – на русском и английском языках.

Объем статьи не должен превышать 8 страниц формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – рекомендуется не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами а, б, и т. д. Допустимо заверстывать рисунки в таблицу.

В конце статьи ставится дата и подпись автора (всех авторов).

Сопроводительные документы

К статье должны быть приложены:

- сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, адрес организации, номер телефона служебный, домашний, E-mail, ORCID);
- сведения о вкладе каждого автора, если статья имеет несколько авторов («Вклад автора (авторов)»);
- рецензия доктора наук, компетентного в предметной области предоставляемой статьи или кандидата наук руководителя подразделения или ведущего специалиста пром. предприятия (сторонние по отношению к авторам статьи) (цветной скан в формате *.PDF с печатью и заверенной подписью и текст рецензии в формате MS Word);
- справка о проверке на оригинальность текста в системе Антиплагиат. К публикации допускаются статьи с общим уровнем оригинальности (% оригинальности + % самодитирования) не менее 75 %, уровнем цитирования в пределах 5...25 %, уровнем совпадений не более 2 %, без использования маскирований и искусственного интеллекта;
- цветные сканы разрешительных документов, подтверждающих возможность открытого опубликования (экспертное заключение о возможности опубликования статьи, акт идентификации статьи или аналогичные документы);
- цветной скан сопроводительного письма, подписанного корреспондирующим автором, на имя председателя редакционного совета серии (для сторонних авторов), сопроводительное письмо оформляется на бланке организации, в которой работают авторы.

ISSN 1990-5297



9 771990 529000 >