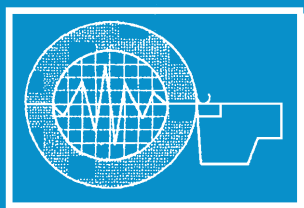


# ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского  
государственного  
технического  
университета

ISSN 1990-5297



Серия  
Прогрессивные технологии  
в машиностроении

16+

№ 3 (310)  
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.  
ВолГТУ

*Носенко В. А.*, д.т.н., проф. ВПИ  
(филиал) ВолГТУ (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) ВолГТУ, (г. Волжский)

*Бочкарев П. Ю.*, д.т.н., проф. КТИ  
(филиал) ВолГТУ, (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) ВолГТУ (г. Волжский)

*Сидякин Ю. И.*, д.т.н., проф. ВолГТУ  
*Тамаркин М. А.*, д.т.н., проф. ДГТУ  
(г. Ростов-на-Дону)

*Яковлев А. А.*, д.т.н., проф. ВолГТУ

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-<br/>rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

**Тел. издательства ВолГТУ:**  
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

**№ 3 (310)**  
**Март**  
**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

*Ingemannson 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

*Yakovlev A. A.*, D. Sc. (Engineering),  
VSTU

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](mailto:zavrio@vstu.ru)

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

**№ 3 (310)**  
**March**  
**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](mailto: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

- Алехин А. Г. 54  
Банников А. И. 7  
Барабанов В. Г. 57  
Битюцков Д. С. 11  
Блохин М. А. 35  
Бочкарев П. Ю. 14  
Васильева Ю. В. 57  
Воронов Р. Д. 35  
Голованчиков А. Б. 46, 65  
Долгов А. Б. 14  
Дуденков А. Ю. 60  
Залипаев П. П. 46  
Залипаева О. А. 46  
Захаров А. Е. 51  
Зебазе Н. Ж. А. 21  
Зуева В. А. 57, 60  
Исламов А. М. 26  
Кожевникова А. А. 7  
Крайнев Д. В. 26  
Кухтик М. П. 51  
Кучков С. А. 54  
Макаров А. М. 70  
Макарова Е. А. 57  
Макарова О. А. 7, 31  
Никифоров А. А. 14  
Носенко В. А. 39  
Овчинников М. А. 11  
Поступаева С. Г. 46, 60  
Прохоренко Н. А. 65  
Рекун Д. Д. 7  
Садыков К. 26  
Саразов А. В. 39  
Толстых А. В. 35  
Тышкевич В. Н. 39  
Цирульников М. А. 31  
Чекомасов П. Д. 26  
Чигиринский Ю. Л. 11, 21  
Шибитова Н. В. 65  
Шмелева Ю. В. 70  
Яковлев А. А. 60  
Якушкин А. С. 35

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

### Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Банников А. И., Макарова О. А., Кожевникова А. А., Режун Д. Д.</i> Влияние метода ударного прессования на структуру абразивного инструмента без связки.....	7
<i>Битюцков Д. С., Чигиринский Ю. Л., Овчинников М. А.</i> Оптимизация управляющей программы обработки путем сокращения времени вспомогательных ходов инструмента.....	11
<i>Бочкарев П. Ю., Долгов А. Б., Никифоров А. А.</i> Моделирование цифрового двойника детали на основе размерно-точностного описания взаимосвязей поверхностей.....	14
<i>Зебазе Н. Ж. А., Чигиринский Ю. Л.</i> Построение и анализ диаграммы железо-углеродного равновесия коррозионностойких сталей.....	21
<i>Крайнев Д. В., Исламов А. М., Чекомасов П. Д., Садыков К.</i> Многоканальная диагностика как направление развития систем адаптивного управления механической обработкой.....	26
<i>Макарова О. А., Цирульников М. А., Крылов Н. А., Овчинников М. А.</i> Исследование влияния упругих деформаций в процессе обработки резанием на точность тонкостенных деталей методом конечных элементов.....	31
<i>Толстых А. В., Воронов Р. Д., Якушкин А. С., Блохин М. А.</i> Исследование зависимости глубины лазерной маркировки и гравировки нержавеющей стали 08X18N10 от частоты излучения при многопроходной обработке.....	35
<i>Тышкевич В. Н., Носенко В. А., Саразов А. В.</i> Методология выбора оптимальных условий закрепления и шлифования маложестких кольцевых и призматических заготовок деталей подшипников.....	39
<b>Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ</b>	
<i>Залипаев П. П., Голованчиков А. Б., Залипаева О. А., Поступаева С. Г.</i> Регулирование структуры насадочного слоя при определении гидродинамических характеристик малотоннажного абсорбера.....	46
<i>Захаров А. Е., Кухтик М. П.</i> Исследование имитационной модели работы цеха мясопереработки.....	51
<i>Кучков С. А., Алёхин А. Г.</i> Модернизация аддитивной установки для печати густыми пищевыми смесями при пониженной температуре.....	54

---

---

<i>Макарова Е. А., Васильева Ю. В., Барабанов В. Г., Зуева В. А.</i> Разработка пользовательского интерфейса АСУ газопоршневой установки.....	57
<i>Поступаева С. Г., Яковлев А. А., Дуденков А. Ю., Зуева В. А.</i> Построение модели физического принципа действия пароэжекторной холодильной установки.....	60
<i>Прохоренко Н. А., Голованчиков А. Б., Шибитова Н. В.</i> Разработка автоматизированной конструкции печи тупикового типа с учетом энергоэффективности.....	65
<i>Шмелева Ю. В., Макаров А. М.</i> Система технического зрения на основе нейронной сети для контроля захвата гибких контейнеров.....	70
К сведению авторов.....	75

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК: 621.922  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-7-11

Научная статья  
Original article

*А. И. Банников, О. А. Макарова, А. А. Кожевникова, Д. Д. Рекун*

### ВЛИЯНИЕ МЕТОДА УДАРНОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА БЕЗ СВЯЗКИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Ольга Александровна Макарова, [olgamakarova5024@gmail.com](mailto:olgamakarova5024@gmail.com)

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы изготовления абразивного инструмента без связки, предназначенного для отделочных методов обработки. Выбор методов получения ударной волны как дробящего и одновременно формообразующего воздействия оказывает большое влияние на структуру и механические свойства получаемого инструмента. Рассмотрено получение ударной волны взрывчатыми веществами и электрогидравлическим эффектом.

**Ключевые слова:** абразивный инструмент без связки, ударное прессование, высокотемпературное спекание, взрывчатые вещества, электрогидравлический эффект

**Для цитирования:** Банников А. И., Макарова О. А., Кожевникова А. А., Рекун Д. Д. Влияние метода ударного прессования на структуру абразивного инструмента без связки. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 7–11. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-7-11.

#### Информация об авторах:

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

**Ольга Александровна Макарова** – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
[orcid.org/0000-0003-2672-136X](https://orcid.org/0000-0003-2672-136X)  
e-mail: [olgamakarova5024@gmail.com](mailto:olgamakarova5024@gmail.com)

**Алла Александровна Кожевникова** – старший преподаватель кафедры ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: [a\\_kozhevnikova@vstu.ru](mailto:a_kozhevnikova@vstu.ru)

**Дмитрий Денисович Рекун** – магистр кафедры ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: [marmatz@mail.ru](mailto:marmatz@mail.ru)

#### Вклад авторов:

**А. И. Банников** – определение цели работы.

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

**А. А. Кожевникова** – научное редактирование текста статьи, участие в обсуждении результатов.

**Д. Д. Рекун** – обработка и анализ результатов исследования.

*A. I. Bannikov, O. A. Makarova, A. A. Kozhevnikova, D. D. Rekun*

### THE IMPACT OF THE IMPACT PRESSING METHOD ON THE STRUCTURE OF AN ABRASIVE TOOL WITHOUT A BOND

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Olga A. Makarova, [olgamakarova5024@gmail.com](mailto:olgamakarova5024@gmail.com)

**Abstract.** The article discusses the issues of manufacturing an abrasive tool without a bond, designed for finishing processing methods. The choice of methods for producing a shock wave, as a crushing and simultaneously shaping effect, has a great influence on the structure and mechanical properties of the resulting tool. The production of a shock wave by explosives and an electrohydraulic effect is considered.

**Keywords:** abrasive tool without a bond, impact pressing, high-temperature sintering, explosives, electrohydraulic effect

**For citation:** Bannikov A. I., Makarova O. A., Kozhevnikova A. A., Rekun D. D. Influence of the Impact pressing method on the structure of an Abrasive tool without a bond. *Izvestiya VolgSTU*. 2026; 3(310): 7–11. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-7-11.

**Information about the authors:**

**Alexander I. Bannikov** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of TMS, VSTU  
orcid.org/0000-0003-4655-3981  
e-mail: Alc19@mail.ru

**Olga A. Makarova** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of TMS, VSTU  
orcid.org/0000-0003-2672-136X  
e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

**Alla A. Kozhevnikova** – Senior lecturer at the Department of TMS, VSTU  
E-mail: a\_kozhevnikova@vstu.ru

**Dmitry D. Rekun** – Magister of the Department of TMS, VSTU  
e-mail: marmatz@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Alexander I. Bannikov** – defining the purpose of the work.

**Olga A. Makarova** – defining the purpose of the work, writing the text of the article, participating in the discussion of the results.

**Alla A. Kozhevnikova** – scientific editing of the text of the article, participation in the discussion of the results.

**Dmitry D. Rekun** – processing and analysis of research results.

**Введение**

На кафедре «Технология машиностроения» ВолгГТУ разработан способ изготовления нового высокопрочного и высокоэффективного одноконтентного абразивного инструмента [1–3]. Его особенностью является то, что, абразивные зерна скрепляются между собой без помощи связки. Технология изготовления этого инструмента без связки состоит из импульсного прессования абразивного порошка с последующим высокотемпературным спеканием в вакууме.

Прессование ударной волной позволяет получить развитую структуру нового абразивного инструмента, что повышает интенсивность процесса микрорезания и обеспечивает процесс самозатачивания за счет скалывания вершин абразивных зерен. Высокотемпературное спекание в вакууме приводит к возникновению прочных связей между абразивными зёрнами, что обеспечивает высокую стойкость нового инструмента без связки [4, 5].

**Методы прессования инструмента без связки ударной волной**

Первый этап изготовления абразивного инструмента без связки – прессование ударной волной – может осуществляться двумя способами:

1) ударная волна образуется в результате сгорания взрывчатых веществ (ампульная схема) [6, 7];

2) ударная волна образуется на специальных установках, например, с использованием электрогидравлического эффекта [7, 8].

Первым способом инструмент прессуется при детонации заряда взрывчатого вещества и образования ударной волны большой интенсивности, воздействующей на ампулу с порошком, находящейся между двух ударников. В прессовке возникают очень высокие уровни действующих нормальных и касательных напряжений, вызывающие чрезвычайно большие скорости деформации материала при практически полном отсутствии теплообмена с окружающей средой.

Ударная волна проходит через порошок, сначала как волна сжатия, а затем как волна растяжения. Волна сжатия вызывает увеличение плотности дефектов в абразивных зёрнах. При прохождении волны растяжения образовавшиеся трещины не закрываются вследствие большой скорости приложения напряжений и сложной геометрии трещины. Возникающие трещины приводят к разрушению абразивных зерен и образованию новых поверхностей.

Эти процессы более характерны для динамического прессования: интенсивное разрушение, и активация порошка. Чем выше скорость приложения нагрузки, тем ниже способность рассеяния упругой энергии, и выше концентрация дефектов в материале. Согласно исследованиям [9], порошок, обработанный взрывным прессованием, обнаруживает большую активацию, чем при дроблении традиционными способами.

Энергия ударного сжатия концентрируется, главным образом, на участках соприкосновения частиц, дробление материала происходит, в основном, в местах их контакта. Это вызывает

увеличение контактных температур, разогрев поверхности и обеспечивают формообразование прессовки. При прессовании абразивного инструмента взрывная обработка не позволяет сразу получать компактные изделия и требует последующего спекания.

Применение взрывчатых веществ для получения ударной волны обеспечивает высокую скорость деформирования и значительное давление прессования, но требует для проведения работ по прессованию специальных полигонов, что крайне неудобно при производстве инструмента в промышленных целях.

Вторым способом инструмент прессуется с использованием электрогидравлического прессы Удар-20, принцип действия которого заключается в преобразовании электрической энергии в механическую посредством электрического разряда в жидкость.

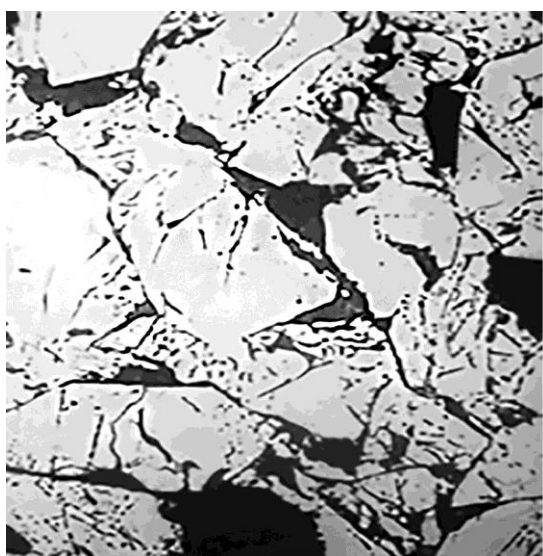
Импульсный электрический заряд в жидкости осуществляется с помощью мгновенного подключения к рабочим электродам заряженной от источника постоянного тока конденсаторной батареи. В результате электрического пробоя межэлектродного промежутка в жидкости образуется токопроводящий канал разряда, частично заполненный ионизированным газом. Под действием протекающего тока разряда большой плотности и благодаря малой сжимаемости жидкости давление в канале разряда значительно возрастает. Благодаря высокому давлению и быстрому расширению искрового канала формируется ударная волна.

Распространяясь в воде со скоростью  $U = 1461$  м/с, ударная волна, взаимодействуя с элементами оснастки, производит работу по дроблению порошка и формообразованию абразивного инструмента.

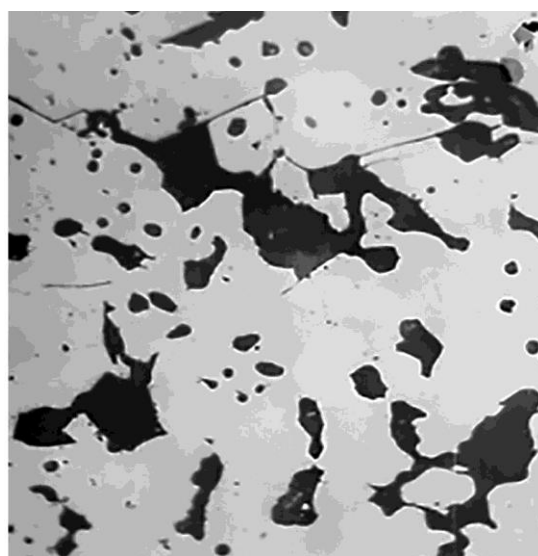
По сравнению с применением взрывчатых веществ этот метод обладает рядом существенных преимуществ. Упрощается конструкция оснастки и происходит равномерное нагружение матрицы. Создается возможность прессования ударной волной в обычных производственных условиях. Появляется возможность управлять процессом нагружения: устанавливается точное количество запасаемой и расходуемой энергии; возможно осуществлять серию разрядов. Процесс прессования легко автоматизируется.

#### Сравнение инструментов без связки, полученных различными методами прессования

Для нового абразивного инструмента без связки характерно мозаичное строение структуры инструмента: чередование сплошных крупных остовов и спекшихся мелких фрагментов зерен; обусловленное различной ориентацией основных их кристаллографических плоскостей по отношению к фронту ударной волны в момент прессования инструмента. На шлифах (рис. 1 и 2) видны светлые абразивные зерна и темные поры, трещины, включения, раковины. Абразивные зерна при прессовании входят между собой в плотный механический и когезионный контакты. При последующем высокотемпературном спекании в вакууме по этим контактными зонам образуются мостики связи.



а



б

Рис. 1. Шлифы прессовок с использованием взрывчатых веществ ( $\times 400$ ):  
а – после прессования; б – после спекания

Прессование взрывом обеспечивает более равномерную структуру, так как реализуется объемное нагружение прессовки (рис. 1).

На рисунке 1, *а* представлен шлиф прессовки после ударного нагружения с использованием взрывчатого вещества. Видны множественные дефекты, трещины в абразивных зернах. После спекания (рис. 1, *б*) поры уменьшаются, трещины исчезают, образуются прочные связи между зернами, прессовка становится значительно прочнее [8].

При прессовании с использованием электрогидравлического эффекта наблюдается неравномерное распределение размеров зерен и неоднородность его плотности. Наблюдается

изменение диаметров абразивных зерен по высоте бруска. Энергия ударной волны рассеивается при ее прохождении через прессовку [9]. В верхней части располагаются более мелкие зерна, а внизу более крупные (рис. 2).

По боковым стенкам прессовки находятся мелкие зерна, что объясняется трением абразивных зерен о стенки матрицы. Абразивные зерна при прессовании внедряются в оснастку, что приводит к большим напряжениям у стенки матрицы при прессовании и при распрессовывании [7, 10]. Значительное трение о стенки пресс-формы при прессовании приводит к появлению «арочного эффекта», заключающегося в возникновении дефекта – трещины в теле прессовки.

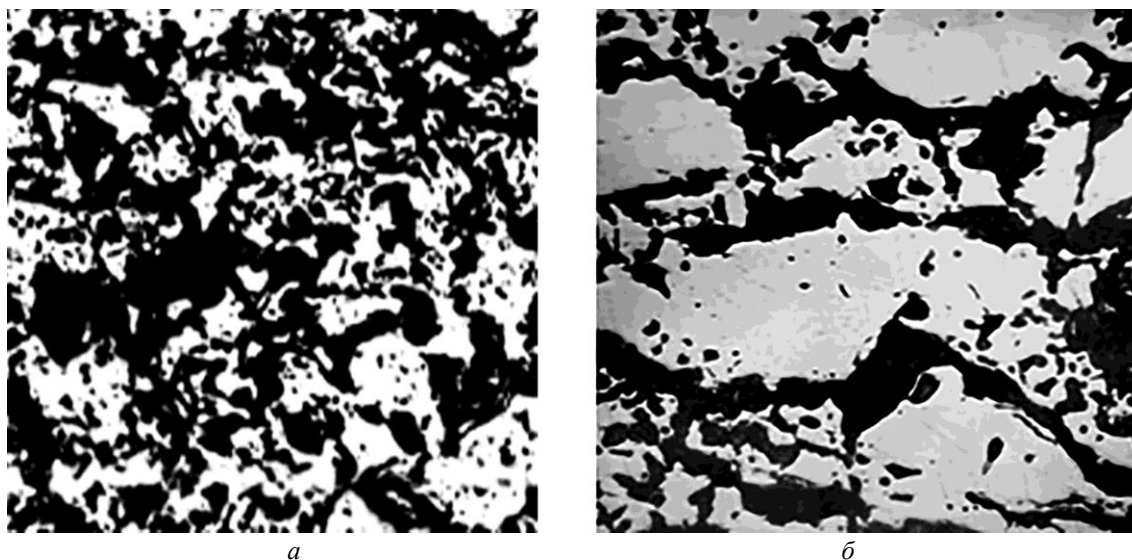


Рис. 2. Шлифы прессовок после ударного нагружения и спекания с использованием электрогидравлического эффекта ( $\times 400$ ):  
*а* – верхняя часть прессовки; *б* – нижняя часть прессовки

Давление ударной волны, развиваемое при взрыве заряда толщиной 60 мм, больше давления, развиваемого установкой «Удар-20», приблизительно в 50 раз, причем с увеличением толщины заряда на каждые 10 мм, давление возрастает в 10 раз [6]. Поэтому прессовки более плотные, пор в инструменте после спекания значительно меньше.

Это увеличивает прочность спеченного инструмента, но ухудшает обрабатываемость, так как уменьшение пористости увеличивает «засаливания» поверхности инструмента.

#### Выводы

Для производства нового инструмента без связки более технологично использовать прессование ударной волной на установках, исполь-

зующих электрогидравлический эффект. Прессование с использованием взрывчатых веществ дает более прочный инструмент, но не технологично в производстве.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. № 1364454 «Способ изготовления абразивных изделий» / В. М. Оробинский, Ю. Л. Чигиринский, А. И. Банников, Н. В. Талантов, Ю. В. Панченко.
2. Пат. РФ № 2071908 «Способ изготовления абразивного и алмазного инструмента» / В. М. Оробинский, Ю. Н. Полянчиков, А. И. Банников.
3. Пат. РФ № 2086395 «Способ изготовления абразивных изделий» / В. М. Оробинский, Ю. Н. Полянчиков, А. И. Курченко, А. И. Банников, А. В. Головкин, Ю. А. Бобынин.
4. Оробинский, В. М. Аналитическое описание изнашивания абразивного инструмента при финишной обработке / В. М. Оробинский, О. А. Макарова, А. И. Банников // Инженерный журнал. – № 10. – 1999.

5. *Оробинский, В. М.* Определение износостойкости абразивного инструмента без связки при суперфинише / В. М. Оробинский, А. И. Банников // Инструмент. – № 10. – СПб., 1996.

6. *Пашков, П. О.* Взрывное обжигание порошка в цилиндрической ампуле / П. О. Пашков, В. Д. Рагозин // Металловедение и прочность материалов : межвуз. сб. научн. тр. / ВПИ. – Волгоград, 1970. – С. 38.

7. *Джонс, В. Д.* Прессование и спекание / В. Д. Джонс. – М. : Мир, 1965. – 380 с.

8. *Гегузин, Я. Е.* Физика спекания / Я. Е. Гегузин. – М. : Наука, 1967. – 360 с.

9. *Прюммер, Р.* Обработка порошкообразных материалов взрывом / Р. Прюммер. – М. : Мир, 1990. – 128 с.

10. *Кипарисов, С. С.* Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – М. : Металлургия, 1972. – 420 с.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 30.01.2026, подписана в печать 24.02.2026

The article was submitted 15.01.2026, revised 30.01.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 621.9.06–529:004.42

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-11-14

Научная статья  
Original article

*Д. С. Битюцков, Ю. Л. Чигиринский, М. А. Овчинников*

### ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ХОДОВ ИНСТРУМЕНТА

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Дмитрий Сергеевич Битюцков, dim.bit@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается возможность применения параметрического программирования для сокращения занимаемого объема памяти и улучшения читаемости программы для фрезерных станков с ЧПУ. Применение циклов для обработки типовых элементов. Оптимизация вспомогательного времени за счет рационального выбора траектории режущего инструмента.

**Ключевые слова:** параметрическое программирование, FANUC, станок с ЧПУ, оптимизация

**Для цитирования:** Битюцков Д. С., Чигиринский Ю. Л., Овчинников М. А. Оптимизация управляющей программы обработки путем сокращения времени вспомогательных ходов инструмента. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 11–14. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-11-14.

#### Информация об авторах:

**Дмитрий Сергеевич Битюцков** – студент-магистр, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: dim.bit@mail.ru

**Юлий Львович Чигиринский** – профессор, д-р техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: techmash@vstu.ru

**Михаил Алексеевич Овчинников** – студент-магистр, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: maochinnikov@mail.ru

#### Вклад авторов:

**Д. С. Битюцков** – изучение темы исследования, написание управляющей программы, написание текста статьи.

**Ю. Л. Чигиринский** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

**М. А. Овчинников** – изучение темы исследования, написание управляющей программы.

*D. S. Bityutskov, Ju. L. Tchigirinsky, M. A. Ovchinnikov*

### OPTIMIZATION OF THE PROCESSING CONTROL PROGRAM BY REDUCING THE TIME OF AUXILIARY TOOL STROKES

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Dmitry S. Bityutskov, dim.bit@mail.ru

**Abstract.** The possibility of using parametric programming to reduce memory footprint and improve program readability for CNC milling machines is explored. Cycles are used for machining typical components. Optimization of idle time is achieved through rational selection of cutting tool paths.

**Keywords:** Parametric programming, FANUC, CNC machine, optimization

**For citation:** Bityutskov D. S., Tchigirinsky Ju. L., Ovchinnikov M. A. Optimization of the control program for machining by reducing the time of auxiliary tool strokes. Izvestiya VSTU. 2026; 3(310): 11–14. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-11-14.

**Information about the authors:**

**Dmitry S. Bityutskov** – Master's Student, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU  
e-mail: dim.bit@mail.ru

**Juliy L. Tchigirinsky** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: techmash@vstu.ru

**Mikhail A. Ovchinnikov** – Master's Student, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: maovchinnikov@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Dmitry S. Bityutskov** – research of the research topic, development of the control program, writing of the article.

**Juliy L. Tchigirinsky** – defining the research objective and participating in the discussion of the results.

**Mikhail A. Ovchinnikov** – researching the research topic and writing the control program.

**Введение**

У станков с системой ЧПУ Fanuc есть серьезные ограничения по внутреннему объему памяти, что ограничивает количество программ, которые можно одновременно загрузить. Так же затруднительно выполнять объемную трехмерную обработку, поскольку она занимает большое место в памяти.

Сократить число строк в программе возможно за счет использования различных параметризованных циклов обработки типовых конструктивных элементов: фасок, радиусов, сфер, резьбы и прочих.

Стандартный объем памяти, встроенный в стойку ЧПУ Fanuc 31i обычно составляет от 256 КБ до 2МБ.

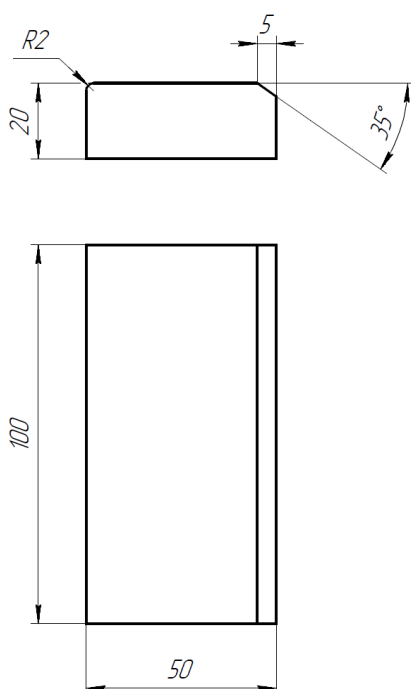


Рис. 1. Эскиз детали

**Материалы и методы исследования**

Рассмотрим фрагмент программы обработки фаски рис. 1 в системе Fanuc 31i mf для фрезерного станка с ЧПУ модели Haas.

Такие сгенерированные программы могут занимать разный объем в зависимости от количества проходов. Чтобы обеспечить качество обработанной поверхности со средней высотой микронеровностей Ra 12,5 мкм требуется несколько проходов концевой фрезой. И такая программа одного контура может занимать до нескольких сотен КБ.

Используя функционал системы программирования рис. 2, можно задать обработку фаски, но читаемость и «редактируемость» будет затруднительной.

```

1  %
- O1
- (MACHINE: HAAS_4AXIS_INDEXING.M4 MPOST Library)
- (PROGRAM Machine HAAS 4 AXIS INDEXER)
5  A0
- G0 G40 G80 G90 Z0
- (T1-FR D20 )
- (FASKA 35GRAD)
- T1 M6 ( Diam: 20. Corner Rad.: )
10 M3 S1900
- M8
- G54 X10.07 Y61.
- G43 H0 Z50.
- G0 Z3.
15 G1 Z-.1 F1350.0
- X5.07
- Y50.
- Y-50.
- Y-52.
20 X10.07
- G0 Z50.
- X10.14 Y61.
- Z2.9
- G1 Z-.2
25 X5.14
- Y50.
- Y-50.
- Y-52.
- X10.14
30 G0 Z50.

```

Рис. 2. Пример программы, сгенерированной САМ системой

Прописывая циклы, можно добиться сокращения числа строк и улучшение «читаемо-сти» программы. Используя фиксированный шаг по оси z и пересчитывая координату x через тангенс угла по (1), можно сделать обработку фаски. Пример фрагмента программы показан на рис. 3.

В кадре 15 (рис. 3) задается координата начала обработки по оси z. В кадре 16 задается конечная координата обработки по оси z. В кадре 17 задается шаг координаты z который будет использоваться для расчета в кадре 21.

```

5  A0
  · G0 G40 G80 G90 Z0
  · (T1-FR D20)
  · (FASKA 35GRAD)
  · T1 M6 ( Diam: 20. Corner Rad.: )
10 M3 S1900
  · M8
  · G54 X10.0 Y61.
  · G43 H0 Z50.
  · G0 Z3.
15 #101=0.(Z.START)
  · #102=-3.5(Z.FINISH)
  · #103=0.1(SHAG PO Z)
  · #105=-5.(X START)
  · N1
20 #101=#101-#103
  · #105=[#103/TAN[35]]+#105
  · IF [#101 LT #102] THEN #101=#102
  · G1 Z#101 F1350.0
  · DOG41X#105
25 Y61.
  · Y-50.
  · Y-52.
  · G40
  · G0 Z3.
30 X#105+11.Y61.
  · IF [#101 GT #102] THEN GOTO1
    
```

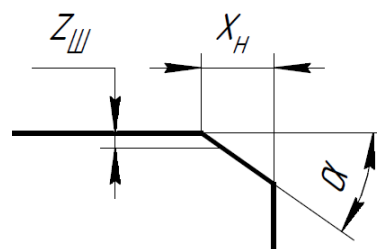


Рис. 3. Пример эскиза и программы, скорректированной программистом

$$x = \frac{z_{III}}{\operatorname{tg}(\alpha_{\phi})} + x_H, \quad (1)$$

где  $z_{III}$  – фиксированный шаг по оси z, мм;  $x_H$  – начальная координата x, мм;  $\alpha_{\phi}$  – угол фаски (рис. 3).

За счет уменьшения длины отхода инструмента и выбора рациональной траектории перемещения на стартовую позицию в цикле удается сократить вспомогательное время. В САМ программе таким образом сделать не получается, поэтому оптимизация времени зависит от опыта программиста.

Параметризировать отход и подвод инструмента является затруднительным из-за индиви-

В кадре 18 задается координата x для подвода фрезы с коррекцией на радиус. В кадре 22 используется условие для проверки значений переменных. В кадре 31 используется проверка условия для повтора цикла

Подготавливая заранее библиотеку типовых подпрограмм под стандартные элементы обработки, можно уменьшить время необходимое на подготовку производства. Разница между этими двумя программами по числу строк и по занимаемому объему памяти приведена в таблице.

Сравнение программ

Показатель	1 (рис. 2)	2 (рис. 3)
Число строк	469	40
Объем, kB	5	1
Время выполнения, мин	8,07	3,325

Покажем траекторию движения инструмента с основными и вспомогательными перемещениями за один проход цикла на рис. 4.

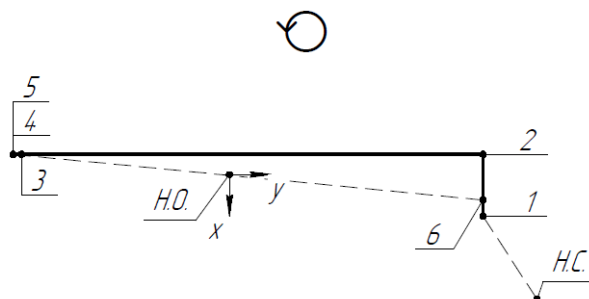


Рис. 4. Траектория движения фрезы

Основными линиями показано движение с рабочей подачей, а пунктирными движение на ускоренной. Точка Н.О. – начало отсчета для заготовки, а Н.С. – ноль станка. При перемещениях на ускоренной подаче станок притормаживает в местах резкого изменения траектории или в точках окончания движения для точности позиционирования.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026, доработана 10.02.2026, подписана в печать 24.02.2026

The article was submitted 30.01.2026, revised 10.02.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 004.942:621.9.06

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-14-21

Научная статья  
Original article

П. Ю. Бочкарев<sup>1</sup>, А. Б. Долгов<sup>2</sup>, А. А. Никифоров<sup>3</sup>

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЕТАЛИ НА ОСНОВЕ РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНОГО ОПИСАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ

<sup>1</sup> Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета, Камышин, Россия

<sup>2</sup> АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», г. Саратов, Россия

<sup>3</sup> Саратовский государственный технический университет  
имени Ю. А. Гагарина, г. Саратов, Россия

✉ Петр Юрьевич Бочкарев, bpu@mail.ru

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности технологической подготовки современного машиностроительного производства. Существующие методы описания деталей в конструкторской документации не обеспечивают полноты информации, необходимой для автоматизированного проектирования технологических процессов. В статье проанализированы ограничения существующих подходов к преобразованию конструкторской информации в машиночитаемый формат. Предложен оригинальный подход к последовательному построению цифрового двойника, включающего геометрические параметры, точностные характеристики, требования к качеству поверхностей и информацию о конструкторских базах. Апробация методики выполнена на примере детали «Валик» с различными вариантами назначенных конструкторских баз. Показано, что предложенный цифровой двойник обеспечивает наглядное представление взаимосвязей между поверхностями и может служить основой для формирования цифровой модели детали в САПР ТП. Научная новизна заключается в комплексном учете размерно-точностных связей при построении графовой модели и ее последовательном насыщении технологической информацией.

**Ключевые слова:** технологическая подготовка производства, цифровой двойник детали, графовая модель, размерные связи, формализация конструкторской информации, фрезерная обработка

**Для цитирования:** Бочкарев П. Ю., Долгов А. Б., Никифоров А. А. Моделирование цифрового двойника детали на основе размерно-точностного описания взаимосвязей поверхностей. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 14–21. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-14-21.

### Выводы

Оптимизация управляющей программы возможна, но требует временных затрат при ее разработке. За счет использования параметрических циклов удается сократить вспомогательное время и число строк в программе.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитин, М. А. Применение параметрического программирования для создания траекторий сложных контуров обработки для системы с ЧПУ FANUC-0i [Электронный ресурс] / М. А. Никитин, А. С. Александров, И. Я. Тариков. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37291659> (дата обращения: 19.01.2026)

2. Овчинников, А. Ю. Параметрическое программирование для создания управляющих программ в современных системах ЧПУ. [Электронный ресурс] / А. Ю. Овчинников, А. И. Казаков, А. Г. Бычков. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37823353> (дата обращения: 19.01.2026)

3. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Суслова. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

**Информация об авторах:**

**Петр Юрьевич Боцкарев** – профессор, д-р техн. наук, кафедра ТМС, Камышинский технологический институт (филиал ВолгГТУ)

РИНЦ AuthorID: 118281

e-mail: bpy@mail.ru

**Андрей Борисович Долгов** – начальник серийного конструкторского бюро АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», г. Саратов

e-mail: andrdolgov@mail.ru

**Александр Анатольевич Никифоров** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (СГТУ)

orcid.org/0000-0002-3879-5457

РИНЦ AuthorID: 1114107

e-mail: ieei\_director@mail.ru

**Вклад авторов:**

**П. Ю. Боцкарев** – научное руководство, разработка теоретических положений, редактирование текста.

**А. Б. Долгов** – разработка методики графоаналитического описания, проведение экспериментальных исследований, подготовка исходного текста.

**А. А. Никифоров** – анализ современных методов формализации, формулировка цели и задач.

*P. Yu. Bochkarev<sup>1</sup>, A. B. Dolgov<sup>2</sup>, A. A. Nikiforov<sup>3</sup>*

**MODELING OF A DIGITAL TWIN OF A PART BASED ON DIMENSIONAL-ACCURACY DESCRIPTION OF SURFACE INTERRELATIONSHIPS**

<sup>1</sup> Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia

<sup>2</sup> JSC "Design Bureau of Industrial Automation", Saratov, Russia

<sup>3</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia

✉ Petr Yu. Bochkarev, bpy@mail.ru

**Abstract.** Abstract. The relevance of this study stems from the need to improve the efficiency of technological preparation in modern machine-building production. Existing methods for describing parts in design documentation do not provide the complete information required for computer-aided process planning. This article analyzes the limitations of current approaches to converting design information into a machine-readable format. An original approach is proposed for the sequential construction of a digital twin, incorporating geometric parameters, accuracy characteristics, surface quality requirements, and information on design bases. The methodology was tested on a "Shaft" type part with various assigned design base options. It is shown that the proposed digital twin provides a clear representation of the interrelationships between surfaces and can serve as a foundation for forming a digital model of the part in CAPP systems. The scientific novelty lies in the comprehensive consideration of dimensional-accuracy relationships during the construction of the graph model and its successive enrichment with technological information.

**Keywords:** technological preparation of production, digital twin of a part, graph model, dimensional relationships, formalization of design information, milling

**For citation:** Bochkarev P. Yu., Dolgov A. B., Nikiforov A. A. Modeling of a digital twin of a part based on dimensional-accuracy description of surface interrelationships. *Izvestiya VolgSTU*. 2026; 3(310): 14–21. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-14-21.

**Information about the authors:**

**Petr Yu. Bochkarev** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology, Kamyshin Technological Institute (branch of VSTU)

RSCI AuthorID: 118281

e-mail: bpy@mail.ru

**Andrey B. Dolgov** – Head of Serial Design Bureau, JSC "Design Bureau of Industrial Automation", Saratov

e-mail: andrdolgov@mail.ru

**Alexander A. Nikiforov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU)

ORCID: 0000-0002-3879-5457

RSCI AuthorID: 1114107

e-mail: ieei\_director@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Petr Yu. Bochkarev** – scientific supervision, development of theoretical provisions, text editing.

**Andrey B. Dolgov** – development of graph-analytical description methodology, experimental research, preparation of the original text.

**Alexander A. Nikiforov** – analysis of modern formalization methods, formulation of goals and objectives.

### Введение

Современное машиностроительное производство характеризуется расширением номенклатуры выпускаемых изделий при одновременном сокращении размеров серий. В этих условиях особое значение приобретает эффективность технологической подготовки производства (ТПП), определяющая сроки освоения новых изделий и их себестоимость. Ключевым этапом ТПП является проектирование технологических процессов (ТП) изготовления деталей, качество которого непосредственно зависит от полноты исходной информации.

Традиционная конструкторская документация ориентирована преимущественно на описание изделия как объекта эксплуатации. Информация, необходимая для технологического проектирования, представлена в ней в неявном виде и требует дополнительной интерпретации. Это приводит к увеличению трудоемкости ТПП и создает предпосылки для субъективных ошибок при принятии технологических решений.

Внедрение систем автоматизированного проектирования (CAD/CAM) создало предпосылки для решения указанных проблем, однако существующие форматы обмена данными не обеспечивают полной передачи технологической информации. Анализ показывает, что такие распространенные CAD-системы, как SolidWorks и КОМПАС-3D, при экспорте в STEP-формат теряют значительную часть инженерных параметров, хотя соответствующие спецификации стандартом предусмотрены [8]. Это ограничивает возможности автоматизации технологического проектирования и требует разработки новых методов формализации описания деталей.

Перспективным направлением исследований является создание формализованных моделей детали, включающих не только геометрию, но и технологические свойства, функциональные взаимосвязи поверхностей, а также требования к точности и качеству. Такой подход позволяет перейти от интуитивных методов проектирования ТП к алгоритмизируемым процедурам, основанным на структурированных данных.

Цель настоящей работы заключается в разработке методики формализованного описания детали как объекта производства на основе графоаналитического представления размерно-точностных связей между поверхностями. В качестве объекта апробации выбрана фрезер-

ная операция как один из наиболее распространенных видов механической обработки.

### Материалы и методы

Теоретическую основу исследования составляют работы в области технологической подготовки производства [1–3], системного анализа технологических процессов [4, 5] и цифровизации машиностроения [7–9]. Методологической базой является применение теории графов для формализации структуры детали.

Предлагаемая методика основана на последовательном выделении элементарных поверхностей детали и установлении связей между ними. Под элементарной поверхностью понимается поверхность, которая может быть обработана самостоятельно, без изменения настройки технологической системы. Каждой поверхности присваивается порядковый номер и код типа в соответствии с классификатором [5, 6].

Информационное насыщение графа выполняется поэтапно:

1. Внесение размерных характеристик поверхностей и связей между ними.
2. Добавление параметров шероховатости.
3. Включение требований к отклонениям формы.
4. Добавление требований к взаимному расположению.
5. Указание конструкторских и технологических баз.
6. Внесение информации о физико-механических свойствах поверхностного слоя.

### Результаты

#### Построение базовой графовой модели детали

Для апробации методики выбрана деталь типа «Валик» (рис. 1), содержащая характерные для фрезерной обработки поверхности: два торца (пов. 1, 3), цилиндрическую поверхность (пов. 4) и лыску (пов. 2). В таблице представлено описание поверхностей с указанием кодов по классификатору технологических процессов согласно методике, рассмотренной в работе [10].

На основе выделенных поверхностей построен граф размерных связей (рис. 2), в котором вершины соответствуют элементарным поверхностям, а ребра – размерным связям между ними. Размерные связи представлены в виде ориентированных векторов, направленных от базовой поверхности к поверхности, положение которой определяется. Например, размер 40H8 ориентирован от цилиндрической поверхности (пов. 4) к поверхности лыски (пов. 2).

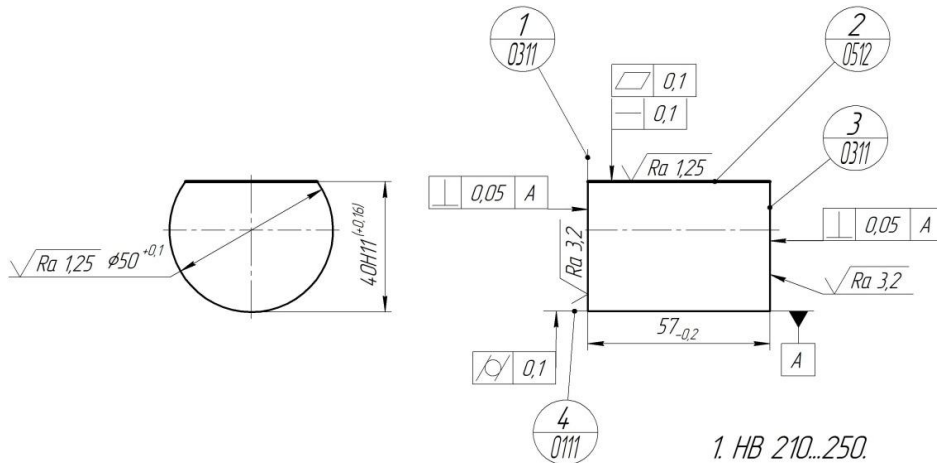


Рис. 1. Деталь «Валик»

**Кодирование элементарных поверхностей детали «Валик»**

Номер поверхности	Наименование	Код по классификатору
1	Торец плоский	0311
2	Лыска плоская	0512
3	Торец плоский	0311
4	Поверхность цилиндрическая	0111

На следующем этапе графовая модель дополняется параметрами шероховатости поверхностей (рис. 3). Значения шероховатости ука-

зываются непосредственно у вершин графа, что позволяет оценить требуемую чистоту обработки каждой поверхности.

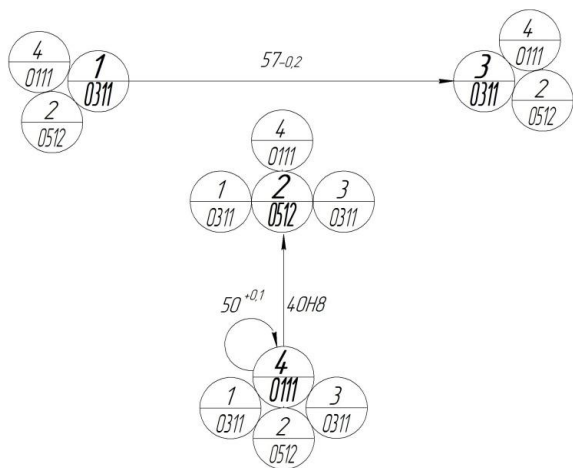


Рис. 2. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Валик»

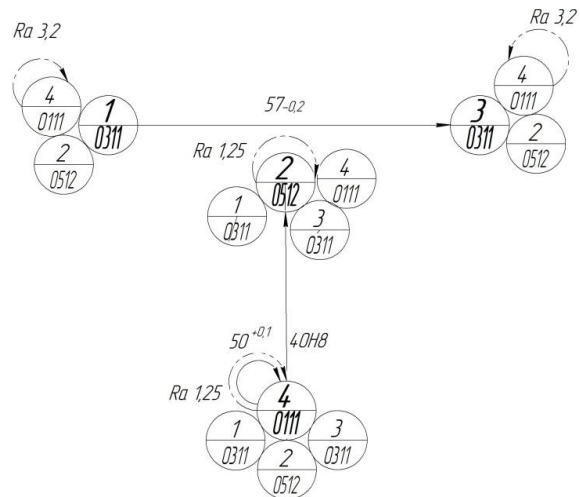


Рис. 3. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали, насыщенный значениями шероховатости элементарных поверхностей

Дальнейшее насыщение графа включает требования к предельным отклонениям формы (рис. 4). Для цилиндрических поверхностей это допуски круглости и профиля продольного сечения, для плоских – допуски плоскостности.

Требования к взаимному расположению

поверхностей (допуски параллельности, перпендикулярности, соосности) добавляются на следующем этапе (рис. 5). Эти параметры критически важны для определения последовательности обработки и выбора технологических баз.

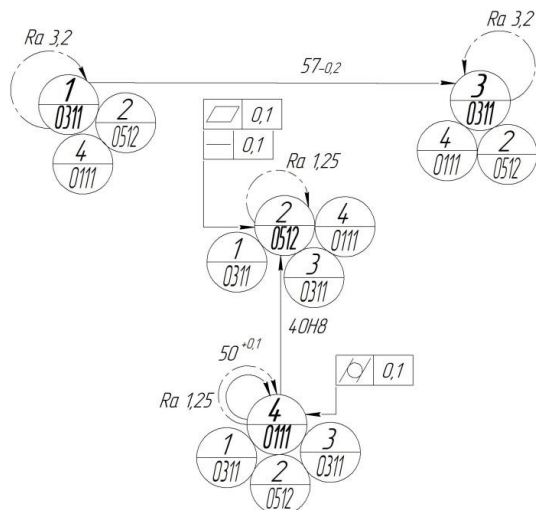


Рис. 4. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Валик», насыщенный значениями предельных отклонений от геометрической формы элементарных поверхностей

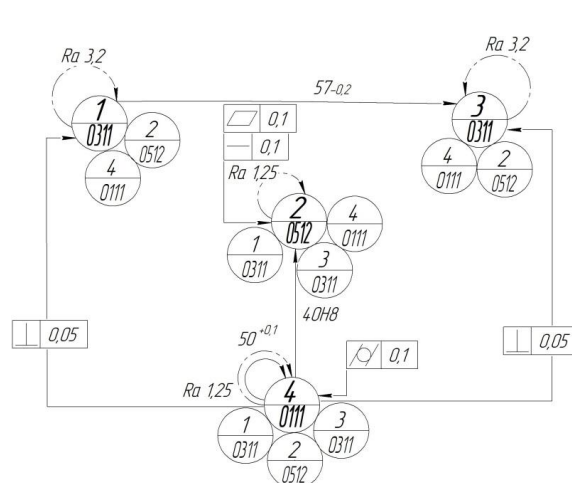


Рис. 5. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Валик», насыщенный характеристикой взаимного расположения поверхностей

Важным элементом модели является указание конструкторских и технологических баз (рис. 6).

В разработанной нотации основные конструкторские базы выделяются утолщенной линией, вспомогательные – пунктирной. Технологические базы, определяющие положение заготовки при обработке, обозначаются штрих-пунктирной линией.

Завершающим этапом является добавление информации о физико-механических свойствах поверхностного слоя, в частности о твердости (рис. 7). Этот параметр влияет на выбор режущего инструмента и режимов резания.

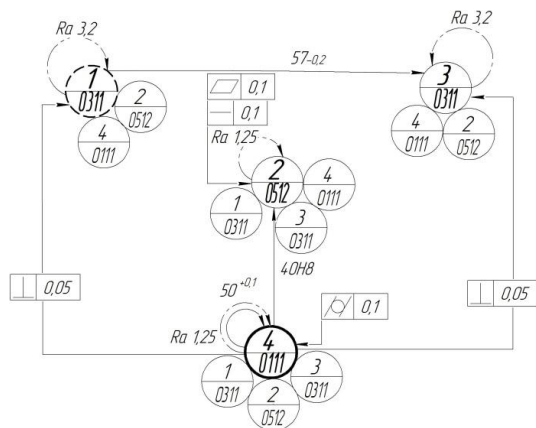


Рис. 6. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Валик», насыщенный информацией о конструкторских базах детали

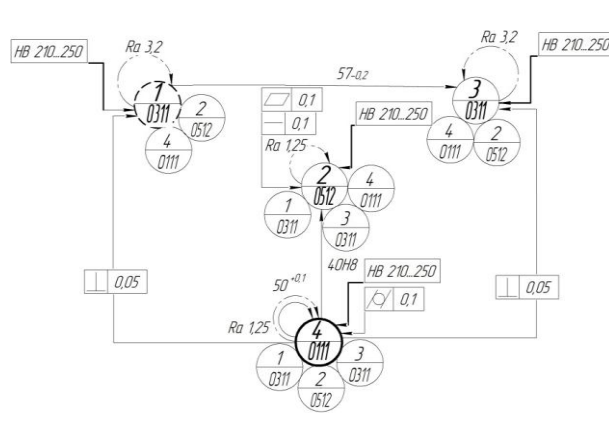


Рис. 7. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Валик», насыщенный информацией о параметре твердости элементарных поверхностей.

Предложенный подход применим не только для описания готовой детали, но и для моделирования заготовки.

#### Анализ вариантов конструктивного исполнения

Для оценки универсальности методики рассмотрены различные способы задания размерных характеристик поверхности «Лыска». На рис. 8 представлен чертеж детали «Валик вари-

ант 2», в котором положение лыски задано иначе, чем в базовом варианте. Соответствующий граф размерных связей показан на рис. 9.

На рисунках 10 и 11 представлен граф размерных связей для третьего варианта исполнения. Сравнительный анализ показывает, что структура графа сохраняется при изменении числовых значений размеров, но может изменяться при изменении способа задания размеров или выборе иных баз.

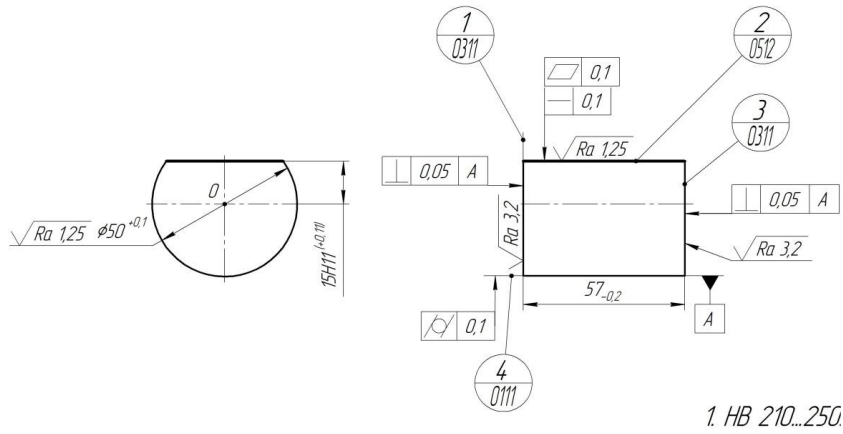


Рис. 8. Чертеж детали «Валик вариант 2»

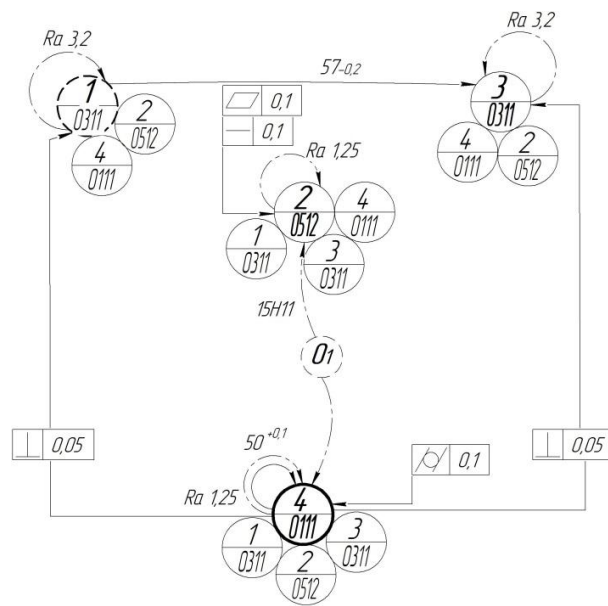


Рис. 9. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Валик вариант 2»

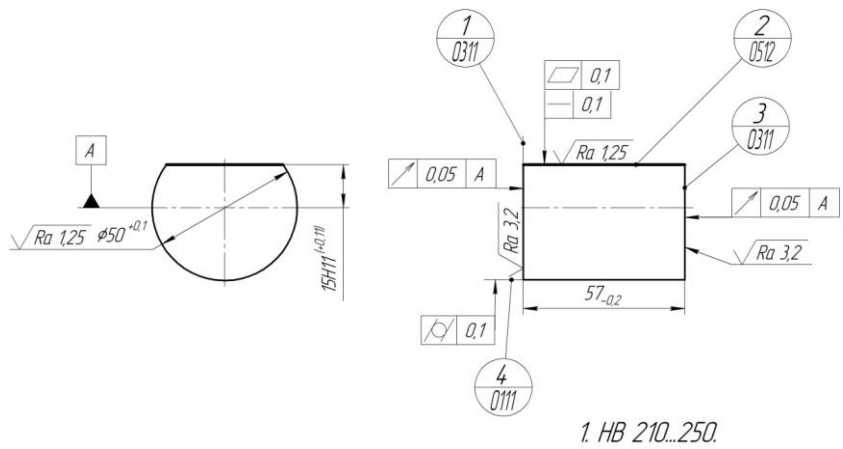


Рис. 10. Чертеж детали «Валик вариант 3»

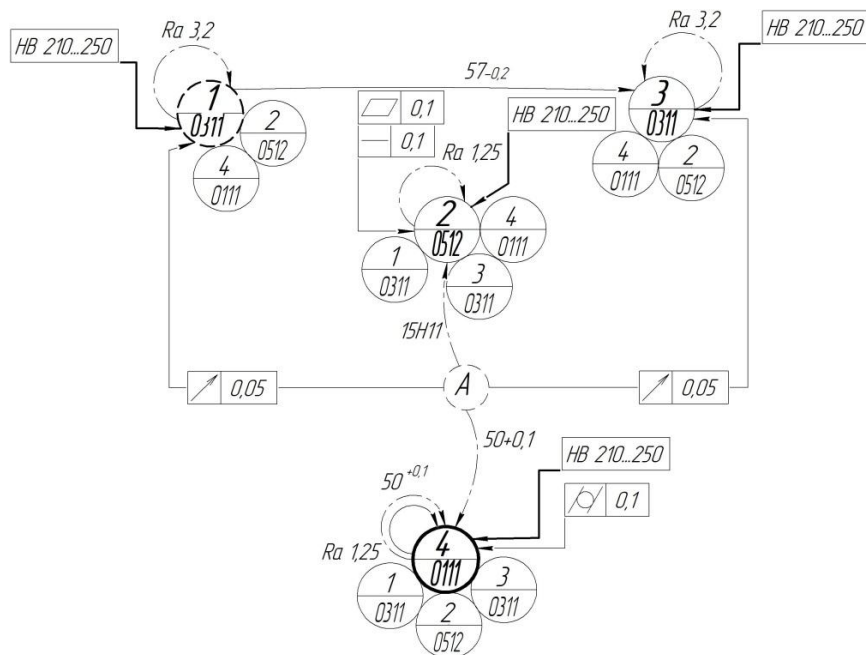


Рис. 11. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Валик вариант 3»

### Обсуждение

Разработанная методика обеспечивает формализованное описание детали как объекта производства в объеме, превышающем информацию, непосредственно представленную на чертеже. Графовая модель наглядно отражает взаимосвязи между поверхностями и может служить основой для автоматизированного принятия технологических решений.

Анализ вариантов конструктивного исполнения показывает, что изменения в чертеже (иные базы, другие способы простановки размеров) приводят к соответствующим изменениям структуры графа. Это позволяет использовать графовую модель для контроля корректности конструкторской документации и выявления потенциально проблемных мест с технологической точки зрения.

Важным преимуществом предложенного подхода является возможность автоматизированного построения графовой модели при наличии электронного чертежа в формате, обеспечивающем доступ к семантической информации. Это открывает перспективы для создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений при технологической подготовке производства.

Ограничением методики на данном этапе является необходимость ручного выделения элементарных поверхностей и установления связей между ними. Дальнейшие исследования

будут направлены на разработку алгоритмов автоматического распознавания поверхностей и их взаимосвязей по трехмерной модели детали.

### Заключение

1. Разработана оригинальная методика формализованного описания детали как объекта производства, основанная на последовательном построении графовой модели, включающей геометрические, точностные и технологические параметры. Методика обеспечивает наглядное представление взаимосвязей между поверхностями и может служить основой для создания цифрового двойника.

2. На примере продемонстрирована реализация предложенной методики, включающая: выделение элементарных поверхностей, построение графа размерных связей, последовательное насыщение модели конструкторскими информационными данными.

3. Показана применимость методики как для описания многовариантной детали и заготовки, что позволит формализовать процесс определения припусков на обработку и выбора рационального способа получения заготовки.

4. Установлено, что предложенная графовая модель сохраняет структуру при изменении числовых значений размеров, но отражает изменения в способах простановки размеров и выборе конструкторских баз, что делает ее чувствительным инструментом анализа конструкторской документации.

5. Разработанная модель ориентирована на интеграцию в системы автоматизированного проектирования технологических процессов. Дальнейшие исследования предполагают разработку форматов представления графовой модели в базах данных и алгоритмов ее автоматического построения по трехмерной модели детали.

6. Перспективным направлением развития методики является распространение ее на описание технологических возможностей оборудования, что позволит в комплексе решать задачи автоматизированной технологической подготовки производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чигиринский, Ю. Л. Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства / Ю. Л. Чигиринский // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – № 8(110). – С. 29–35. – DOI 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35.
2. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Сулова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
3. Базров, Б. М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства: монография / Б. М. Базров. – М.: КУРС, 2023. 324 с.
4. Бочкарев П. Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П. Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. – 2002. – № 1. – С. 10–14.

5. Бочкарев, П. Ю. Повышение качества технологической подготовки механообработывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей / П. Ю. Бочкарев, Е. П. Решетникова // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2023. – № 12 (150). – С. 30–36. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-36.

6. Решетникова, Е. П. Концепция группирования деталей механообработывающих производств при формировании рационального маршрута технологического процесса их изготовления / Е. П. Решетникова, П. Ю. Бочкарев // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2021. – № 3 (117). – С. 19–25.

7. Митин, С. Г. Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Инновационная деятельность. – 2013. – № 4 (27). – С. 36–41.

8. Чигиринский, Ю. Л. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – № 8 (134). – С. 39–48.

9. Ингеманссон, А. Р. Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки / А. Р. Ингеманссон // Известия ВолгГТУ: научный журнал № 1 (248) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 15–18.

10. Митин, С. Г. Совершенствование технологической подготовки многономенклатурных механообработывающих производств при проектировании операций фрезерной обработки: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. ... канд. техн. наук / Митин Сергей Геннадьевич. – Саратов, 2009. – 188 с.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 20.02.2026, подписана в печать 24.02.2026  
The article was submitted 15.01.2026, revised 20.02.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 539.261, 620.187, 691.75  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-21-26

Научная статья  
Original article

*Н. Ж. А. Зебазе, Ю. Л. Чигиринский*

### ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОДНОГО РАВНОВЕСИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Юлий Львович Чигиринский, julio-tchigirinsky@yandex.ru

**Аннотация.** Диаграмма равновесия железо-углерод является фундаментальным инструментом для анализа фазовых превращений в сталях. В данном исследовании была построена диаграмма Fe-C, ограниченная максимальным содержанием углерода 0,8 % и максимальной температурой 1500 °С, которая затем была использована для анализа структурного фазового состава углеродистых и коррозионностойких сталей 40, 40X, 40X13, 12X18H10T. Особое внимание уделяется влиянию легирующих элементов, в частности, хрома и никеля, на фазовую стабильность.

**Ключевые слова:** диаграмма Fe-C, легированные стали, хром, никель, аустенит, феррит, перлит, мартенсит

**Для цитирования:** Зебазе Н. Ж. А., Чигиринский Ю. Л. Построение и анализ диаграммы железо-углеродного равновесия коррозионностойких сталей. Известия ВолгГТУ. 2026; 3 (310): 21–26. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-21-26.

**Информация об авторах:****Нджапоу Жизлейн Анисе Зебазе** – аспирант, кафедра ТМС, ВолгГТУ

RSCI AuthorID: 1285894

e-mail: ndjaze@gmail.com

**Юлий Львович Чигиринский** – профессор, д-р техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ

RSCI AuthorID: 473976

e-mail: julio-tchigirinsky@yandex.ru

**Вклад авторов:****Н. Ж. А. Зебазе** – изучение темы исследования, написание текста статьи.**Ю. Л. Чигиринский** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.**N. G. A. Zebaze, Ju. L. Tchigirinsky****CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF THE Fe-C PHASE EQUILIBRIUM  
DIAGRAM FOR CORROSION-RESISTANT STEELS****Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ July L. Tchigirinsky, julio-tchigirinsky@yandex.ru

**Abstract.** The iron-carbon (Fe-C) equilibrium phase diagram is a fundamental tool for analysing phase transformations in steels. In this study, an Fe-C diagram was constructed, limited to a maximum carbon content of 0,8 % and a maximum temperature of 1500 °C. This diagram was subsequently used to analyze the structural phase composition of carbon and corrosion-resistant steels, including 1040, 5140, AISI 420 and 321 steels. Particular attention is given to the influence of alloying elements – specifically chromium and nickel – on phase stability.

**Keywords:** Fe-C phase diagram, alloy steels, chromium, nickel, austenite, ferrite, pearlite, martensite

**For citation:** Zebaze N. Zh. A., Tchigirinsky Ju. L. Construction and analysis of the Fe-C phase equilibrium diagram for corrosion-resistant steels. Izvestiya VolgSTU. 2026; 3(310): 21–26. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-21-26.

**Information about the authors:****Njapou Zhizlein Anise Zebaze** – Postgraduate Student at the Department of TMS, VSTU

RSCI AuthorID: 1285894

e-mail: ndjase@gmail.com

**Juliy L. Tchigirinsky** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of TMS, VSTU

RSCI AuthorID: 473976

e-mail: julio-tchigirinsky@yandex.ru

**Contribution of the authors:****Njapou Ghislaine Anise Zebaze** – processing and analysis of research results, writing the text of the article.**Juliy L. Tchigirinsky** – defining the purpose of the work, participating in the discussion of the results.**Введение**

Легированные углеродистые стали занимают центральное место в машиностроении и металлообработке благодаря широкому спектру механических и теплофизических свойств. Эти свойства напрямую связаны с фазовыми превращениями, происходящими при термической обработке [1, 2]. Понимание этих превращений основывается главным образом на диаграмме равновесия Fe-C, которая описывает области стабильности фаз в зависимости от содержания углерода и температуры. В зоне резания температуры могут достигать 600–800 °C, что соответствует критическим областям превращения феррит-аустенит [3].

Диаграмма основана на линии  $A_1$ , которая соответствует эвтектоидному превращению ( $\gamma \rightarrow$  феррит + перлит); линия  $A_3$ , – это температура превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  (феррит  $\rightarrow$  аустенит) при нагревании гипозвтектоидных сталей

( $C < \sim 0,77\%$ ). На диаграмме Fe-C,  $A_3$  является границей между областями ( $\alpha + \gamma$ ) и  $\gamma$ . Значения  $A_3$  были оценены на основе математической аппроксимации (регрессии), выполненной на основе экспериментальных данных диаграммы Fe-C. На практике  $A_3$  измеряется экспериментально для различных процентных долей углерода, строится кривая  $A_3(C)$  и для упрощения вычислений она аппроксимируется полиномом второй степени. Полученная формула является эмпирическим законом, действительным в ограниченной области типа:

$$A_3 = 910 - 203C - 80C^2, \quad (1)$$

где  $C$  – содержание углерода (в % по массе), с качественными поправками, связанными с легирующими элементами.

Формула (1) получена в результате экспериментальной корректировки диаграммы Fe-C, которая используется для быстрой оценки  $A_3$ . Это не фундаментальный закон, а практическое

приближение. Изменение  $A_3$  с изменением  $C$  не является линейным. Термин  $C^2$ , используемый для оценки всех характеристик стали (например, твердости, прочности, коррозионной стойкости и т. д.), значительно повышает точность. Это приближение  $A_3$  применимо к нелегированным сталям (чистый Fe-C), массовая доля углерода в которых составляет  $\% C \in [0..0,77]$ . Приближение (1) несправедливо в отношении легированных сталей (Cr, Ni и т. д.).

Для легированных сталей обычно используется эмпирическая аппроксимация следующего вида:

$$A_3 = A_3^{Fe-C} + \sum k_i X_i, \quad (2)$$

где  $X_i$  – атомное или массовое содержание легирующего элемента;  $k_i$  – коэффициент термодинамического влияния.

Для хрома экспериментально  $k_{Cr} > 0$ . В случае атомов необходимо преобразовать массовую долю в атомную долю:

$$X_{Cr}^{at} = \frac{\frac{w_{Cr}}{M_{Cr}}}{\frac{w_{Fe}}{M_{Fe}} + \frac{w_{Cr}}{M_{Cr}} + \frac{w_C}{M_C}}, \quad (3)$$

где  $M_{Fe}=55.85$ ;  $M_{Cr}=52.00$ ;  $M_C=12.01$ .

Хром замещает атомы железа, поэтому такой подход физически оправдан. Для расчета используем зависимость (4):

$$A_3 = 910 - 203C - 80C^2 + \alpha X_{Cr}^{at}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – определяется экспериментально. Обычно (в массовых процентах),  $\alpha \approx +30$  до  $+40$  °C на 1% Cr).

В промышленной практике чистые (нелегированные, без посторонних примесей) углеродистые стали используются крайне редко. Углеродистые стали, называемые «конструкционными», на самом деле являются «микролегированными» из-за присутствия легирующих примесей, таких как сера (S), поступающая из

топлива, используемого при плавке, фосфор (P), естественно присутствующий в железной руде, марганец (Mn), присутствующий в руде в следовых количествах, и т. д.

Абсолютная «чистота» (только «железо + углерод») является теоретическим лабораторным понятием. Именно поэтому классическая диаграмма Fe-C, которая в основном описывает нелегированные стали, должна интерпретироваться с осторожностью. Добавление таких элементов, как хром (Cr) и никель (Ni), значительно изменяет положение критических линий  $A_1$  и  $A_3$ , растворимость углерода, а также природу ферритной ( $\alpha$ ), аустенитной ( $\gamma$ ) и карбидной фаз, присутствующих в равновесии. Настоящая статья направлена на анализ этих эффектов в диапазоне температур, ограниченном 800 °C, что соответствует условиям резания, определенным экспериментально [4, 5].

**Цель данного исследования** состоит в построении диаграммы Fe-C, в диапазоне температур до 1500 °C, концентрации углерода  $C \leq 0,8$  %, хрома  $Cr \leq 18$  %, никеля  $Ni \leq 18$  %, анализе фазовых состояний сталей 40, 40X, 40X13, 12X18H10T в зависимости от температуры и содержания легирующих элементов.

**Материалы и методы исследования**

Для построения диаграммы железо-углерод используется численный подход, реализованный с помощью программы Python, при допущении термодинамического равновесия, ограниченного областью гиперэвтектоидных сталей, и с использованием критических линий  $A_1$  и  $A_3$ , приближенной эмпирической зависимостью (4), действительной для углеродистых сталей. Химические характеристики исследуемых сталей приведены в таблице в соответствии с ГОСТ 4543–2016 и ГОСТ 5632–2014.

**Химические характеристики сталей**

Сталь	C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Тип
40	~0,40	–	–	Углеродистая сталь
40X	~0,40	~1	–	Низколегированная сталь
40X13	~0,40	~13	–	Мартенситная коррозионностойкая сталь
12X18H10T	~0,10	~18	~10	Аустенитная коррозионностойкая сталь

**Результаты исследования и их обсуждение**

Классическая диаграмма (рис. 1) Fe-C показывает равновесие для бинарных сплавов (только железо + углерод).

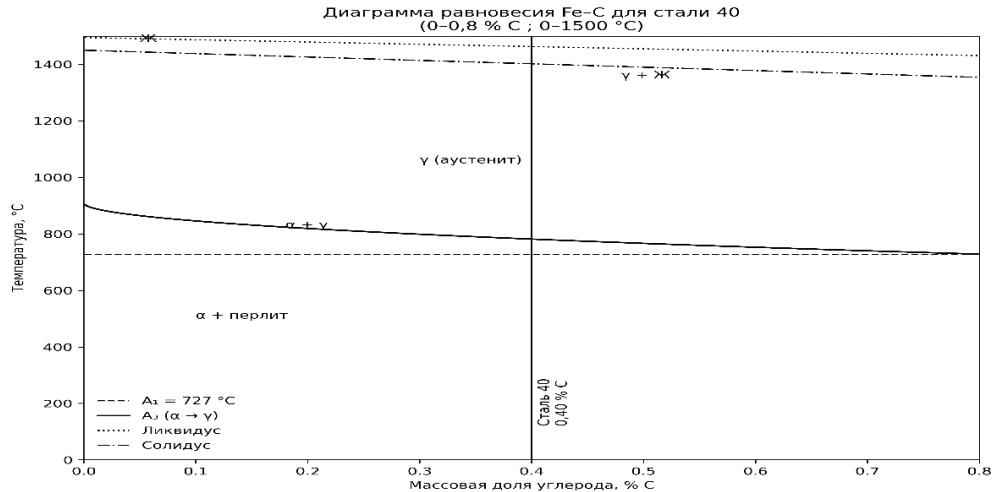


Рис. 1. Диаграмма равновесия Fe-C для стали 40

В исследуемой области выделяются три основные зоны: феррит + перлит ( $T < A_1$ ), феррит + аустенит ( $A_1 < T < A_3$ ) и аустенит ( $T > A_3$ ).

```
# =====
# ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ
# =====
C_max = 0.8          % максимальное содержание углерода
T_max = 1500        % максимальная температура, °C
steels = [
    {"name": "40X", "C": 0.40, "Cr": 1.0, "Ni": 0.0},
    {"name": "40X13", "C": 0.40, "Cr": 13.0, "Ni": 0.0},
    {"name": "12X18H10T", "C": 0.10, "Cr": 18.0, "Ni": 10.0}
]
# =====
# ШАГ 1. БАЗОВАЯ ДИАГРАММА Fe-C
# =====
C = np.linspace(0.001, C_max, 400)
A1 = 727.0          # эв-
                    тектоид
A3_base = 910 - 203 * C - 80 * np.sqrt(C)  # Ан-
                    тропов
liquidus = 1495 - 80 * C
solidus = 1450 - 120 * C
# =====
# ШАГ 2. КОРРЕКЦИЯ A3 (Cr)
# =====
k_Cr = 18.0 # °C / %Cr
A3 = {}
for steel in steels:
    if steel["Ni"] < 8:
        A3[steel["name"]] = A3_base + k_Cr * steel["Cr"]
    else:
        A3[steel["name"]] = None # γ-сталь
# =====
# ШАГ 3. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ
# =====
plt.figure(figsize=(9, 7))

# Базовые линии
plt.plot(C, np.full_like(C, A1), 'k-', label='A1 = 727 °C')
plt.plot(C, liquidus, 'k:', label='Ликвидус')
plt.plot(C, solidus, 'k-', label='Солидус')
# Линии A3
plt.plot(C, A3["40X"], 'k', label='A3 - 40X')
plt.plot(C, A3["40X13"], 'k-', label='A3 - 40X13')

# Область γ для 12X18H10T (условно)
plt.fill_between(C, 0, solidus, hatch='///',
                facecolor='none', edgecolor='black',
                label='γ-область - 12X18H10T')

# Вертикали состава
plt.axvline(0.40, color='black')
plt.text(0.405, 200, '40X / 40X13\n0,40 % C', rotation=90, va='bottom')

plt.axvline(0.10, color='black')
plt.text(0.105, 200, '12X18H10T\n0,10 % C', rotation=90, va='bottom')

# Подписи фаз
plt.text(0.12, 600, 'α + перлит')
plt.text(0.15, 820, 'α + γ')
plt.text(0.30, 980, 'γ (аустенит)')
plt.text(0.35, 1200, 'γ + L')
plt.text(0.05, 1450, 'L')

# Оформление
plt.xlim(0, 0.8)
plt.ylim(0, 1500)
plt.xlabel('Содержание углерода, % C')
plt.ylabel('Температура, °C')
plt.title('Сравнительная диаграмма состояния Fe-C\n(40X, 40X13, 12X18H10T)')
plt.legend(frameon=False)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Рис. 2. Программный код Python, реализующий зависимость (4)

**Анализ положений сталей на диаграмме**

При комнатной температуре структура стали 40 включает феррит и перлит. При температуре выше  $A_1$  (727 °C) перлит превращается в аустенит. Между  $A_1$  и  $A_3$  структура является двухфазной (феррит и аустенит). Точка  $A_3$  соответствует температуре, при которой при охлаждении начинает образовываться феррит. Она изменяется от 912 °C (чистое железо) до

727 °C (0,76 % C). При температуре около 800 °C сталь 40 становится преимущественно аустенитной.

Стали 40X соответствует вертикаль 0,4 % C. Однако хром (X) незначительно (содержание около 1 %) поднимается по линии  $A_3$ . Структура стали 40X при 800 °C остается близкой к структуре стали 40 ( $\alpha+\gamma$ ). Эффект хрома остается умеренным из-за его низкого содержания.

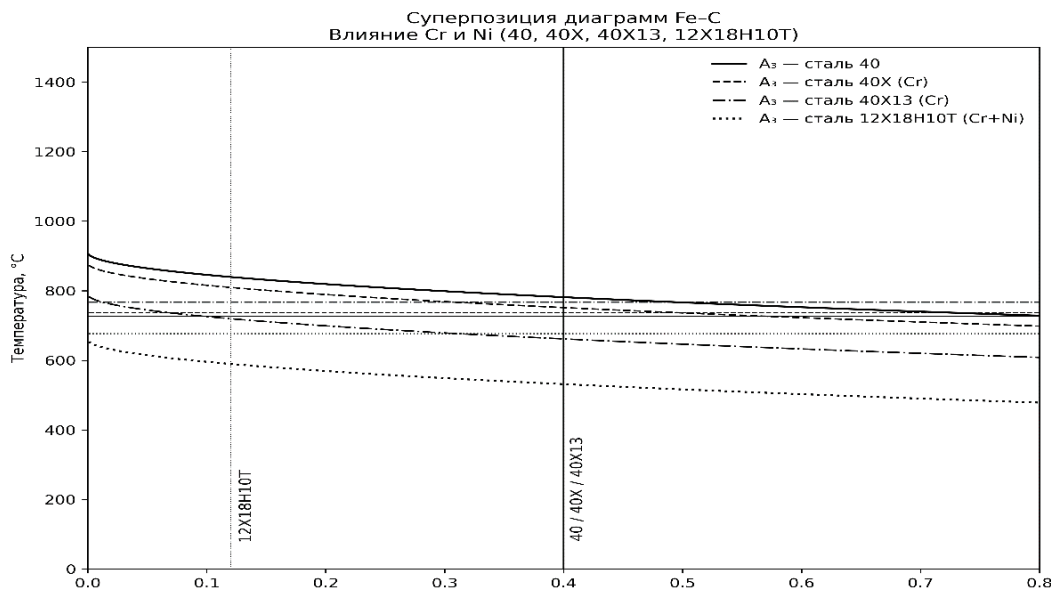


Рис. 3. Диаграмма равновесия Fe-C для сталей 40, 40X, 40X13 и 12X18H10T

Точка эвтектоида на диаграмме Fe-C стали 40X13 сильно смещена влево (примерно 0,3 % C вместо 0,8 %) из-за 13 % содержания хрома. Хром радикально изменяет диаграмму, обеспечивает коррозионную стойкость и способствует образованию карбидов хрома ( $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$ ). Хром, являясь альфа-генным элементом, замыкает аустенитный цикл. При 800 °C сталь 40X13 находится в отожженном состоянии, состоящем из феррита и сложных карбидов.

Сталь 12X18H10T содержит 0,12 % углерода, около 10 % никеля (гамма-генного элемента) и 18 % хрома. На стандартной диаграмме Fe-C она выглядит ферритной, но на самом деле является полностью аустенитной даже при температуре -200 °C благодаря никелю, который стабилизирует аустенит. Область аустенита остается стабильной до комнатной температуры.

Таким образом, диаграмма Fe-C описывает его поведение лишь частично; фактическая система представляет собой систему Fe-Cr-Ni-C, в которой феррит не появляется в состоянии равновесия.

**Роль легирующих элементов**

Сравнительный анализ [6] показывает, что углерод определяет и стабилизирует количество перлита и общее положение  $A_3$ . Хром стабилизирует феррит, способствует образованию карбидов и повышает температуру  $A_3$ . Никель стабилизирует аустенит и подавляет ферритные превращения. Титан предотвращает межкристаллитную коррозию, удерживая углерод, чтобы избежать образования карбидов хрома. Без титана хром и углерод соединяются, образуя карбиды на границах зерен, что «обедняет» сталь хромом и приводит к ее коррозии.

В процессе механической обработки, аустенитная сталь 12X18H10T демонстрирует самые высокие температуры резания. Ферритно-перлитные стали (40, 40X), теплопроводность которых существенно выше лучше «рассеивают» тепло, в то время как мартенситная сталь 40X13 концентрирует тепловую энергию локально. Эти результаты напрямую объясняют различия в поведении типифизических, механических и коррозионностойких свойств присутствующих фаз [7, 8].

### Заключение

Диаграмма равновесия системы Fe-Cr-Ni-C позволяет оценить структурно-фазовый состав коррозионно-стойких сталей с учетом особенностей химического состава в диапазоне температур, соответствующем условиям процесса резания. Можно заключить, что рациональные режимы лезвийной обработки коррозионно-стойкой стали 12X18H10T должны обеспечивать среднеинтегральную температуру в зоне контакта рабочих поверхностей инструмента, заготовки и стружки в «аустенитной» области диаграммы – диапазон температур 850...900 °С. В этом диапазоне температур интенсивность изнашивания инструмента снижается вследствие повышенной пластичности обрабатываемого материала, определяемой свойствами кубической гранцентрированной (СFC) кристаллической решетки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – Москва : Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Липатов, А. А. Влияние характера зависимости теплопроводности обрабатываемого материала от температуры на закономерности контактного взаимодействия

и тип стружкообразования / А. А. Липатов // СТИН. – 2006. – № 8. – С. 37–40.

3. Липатов, А. А. Расчет температуры на режущих поверхностях инструмента с учетом зависимости теплопроводности обрабатываемого материала от температуры / А. А. Липатов, Ю. Л. Чигиринский // СТИН. – 2012. – № 7. – С. 28–30.

4. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания / Н. В. Талантов // Физические процессы при резании металлов: сб. науч. трудов. – Волгоград : Изд. ВПИ. – 1984. – 179 с.

5. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.

6. Антропов, В. Ю. Диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов / В. Ю. Антропов. – Металлургия, 1986.

7. Зебазе, Н. Ж. А. Изменение теплофизических и механических свойств сталей при механической обработке / Н. Ж. А. Зебазе, Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Моисеев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (308) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2026. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 27–32. – DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-27-32.

8. Липатов, А. А. Температурно-силовые характеристики контактного взаимодействия на площадке износа задней поверхности инструмента при точении аустенитной стали / А. А. Липатов, Ю. Л. Чигиринский, С. И. Кормилицин // Обработка металлов. – 2012. – № 2. – С. 38–42.

9. Солнцев, Ю. П. *Материаловедение : учеб. для вузов по металлург., машиностроит. и общетехн. спец. / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, Ф. Войткун ; под общ. ред. Ю. П. Солнцева.* – Москва : МИСИС, 1999. – 600 с.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 20.02.2026, подписана в печать 24.02.2026  
The article was submitted 15.01.2026, revised 20.02.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 539.261, 620.187, 691.75  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-26-31

Научная статья  
Original article

## Д. В. Крайнев, А. М. Исламов, П. Д. Чекомасов, К. Садыков МНОГОКАНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА КАК НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Дмитрий Вадимович Крайнев, krainevdv@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются исследования, направленные на повышение эффективности адаптивного управления механической обработкой в условиях неопределенности технологической информации за счет многоэтапного мониторинга процесса обработки на основе многоканальной диагностики.

**Ключевые слова:** многоканальная диагностика процесса резания; снижение неопределенности технологической информации; адаптивное управление механической обработкой

**Для цитирования:** Крайнев Д. В., Исламов А. М., Чекомасов П. Д., Садыков К. Многоканальная диагностика как направление развития систем адаптивного управления механической обработкой. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 26–31. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-26-31.

### Информация об авторах:

**Дмитрий Вадимович Крайнев** – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
orcid.org/ 0000-0001-8762-4251  
e-mail: krainevdv@mail.ru

**Александр Максимович Исламов** – аспирант, кафедра ТМС, ВолгГТУ

e-mail: sanya.islamov.99@mail.ru

**Павел Дмитриевич Чекомасов** – магистрант, кафедра АПП, ВолгГТУ

e-mail: pavel12092002@mail.ru

**Керим Садыков** – магистрант, кафедра ТМС, ВолгГТУ

e-mail: kerim.sadikov@yandex.ru

**Вклад авторов:**

**Д. В. Крайнев** – определение цели работы, координация работы соавторов, написание текста статьи.

**А. М. Исламов** – обзор литературных источников, анализ и обработка результатов исследования, написание текста статьи.

**П. Д. Чекомасов** – сбор и анализ результатов исследования.

**К. Садыков** – обзор литературных источников, обработка и анализ результатов исследования.

*D. V. Kraynev, A. M. Islamov, P. D. Chekomasov, K. Sadykov*

**MULTI-CHANNEL DIAGNOSTICS AS A DIRECTION  
FOR THE DEVELOPMENT OF ADAPTIVE MACHINING CONTROL SYSTEMS**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Dmitriy V. Kraynev, krainevdv@mail.ru

**Abstract.** The article discusses research aimed at improving the efficiency of adaptive control of mechanical processing in conditions of uncertainty of technological information through multi-stage monitoring of the processing process based on multichannel diagnostics.

**Keywords:** multi-channel diagnostics of the cutting process; reduction of uncertainty of technological information; adaptive machining control

**For citation:** Kraynev D. V., Islamov A. M., Chekomasov P. D., Sadykov K. Multi-channel diagnostics as a direction for the development of adaptive machining control systems. *Izvestiya VSTU*. 2026; 3(310): 26–31. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-26-31.

**Information about the authors:**

**Dmitriy V. Kraynev** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

orcid.org/ 0000-0001-8762-4251

e-mail: krainevdv@mail.ru

**Alexander M. Islamov** – Graduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

E-mail: sanya.islamov.99@mail.ru

**Pavel D. Chekomasov** – Magister, Department of of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: pavel12092002@mail.ru

**Kerim Sadykov** – Magister, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: kerim.sadikov@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Dmitriy V. Kraynev** – defining the purpose of the work, coordinating the work of co-authors, writing the text of the article.

**Alexander M. Islamov** – review of literary sources, analysis and processing of research results, writing the text of the article.

**Pavel D. Chekomasov** – collection and analysis of research results.

**Kerim Sadykov** – review of literary sources, processing and analysis of research results.

**Введение**

Мировые тренды на цифровую трансформацию производственных процессов нацелены на повышение эффективности и конкурентоспособности предприятий за счет роста уровня автоматизации и автономности технологического оборудования. Однако, ключевыми барьерами реализации концепции являются ограниченная адаптивность и способность даже современных станков с ЧПУ нивелировать нега-

тивное влияние неопределенности технологической информации на надежность обеспечения результатов обработки. Искусственный интеллект (ИИ) имеет высокие оценки потенциала в сфере металлообработки, но требует значительных финансовых затрат. При том, функционирующие алгоритмы успешно справляются лишь с рутинными задачами. Кроме того, для обучения моделей ИИ требуются большие объемы структурированных и актуальных дан-

ных, чего сложно добиться в реальных условиях машиностроительного предприятия [1]. Контроль и управление технологическими процессами требует непрерывного мониторинга. Современные высокоточные измерительные средства, в частности контактные и оптические профилометры, незаменимы для лабораторных исследований и приемочного контроля, но их конструктивные и эксплуатационные ограничения делают невозможным применение в системах автоматизированного мониторинга в реальном времени [2]. Именно поэтому косвенные методы (анализ вибраций, акустической эмиссии, силы резания) становятся единственным возможным решением для интеграции в контуры адаптивного управления технологическим оборудованием, что подчеркивает актуальность данного направления исследования.

#### Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования процесса резания проводились на токарно-револьверном станке с ЧПУ OKUMA-Pumori Genos L300-M, оснащенный системой ЧПУ OSP-P300L, а также датчиком привязки инструмента. В качестве обрабатываемых материалов применялись стали групп обрабатываемости «Р» (стали 40X и 30XMA), «М» (стали: 40X13, 12X13, 14X7H2 и 12X18H10T согласно ГОСТ Р ИСО 513–2019, а также жаропрочные высоколегированные стали 13X11H2B2MФ и 08X21H6M2T ГОСТ 5632–2014 в состоянии поставки).

В качестве инструментального материала при проведении экспериментальных исследований применялись сменные многогранные пластины (СМП) для чистовой и получистовой обработки с *PVD* и мультислойным *CVD* покрытием (включая слои  $Ti(CN)/Al_2O_3/TiN$ ).

Измерение силы резания производилось с помощью тензометрического токарного динамометра DKM 2010 (фирмы «TeLC» Германия). Измерение вибрационного сигнала в процессе резания производилась с помощью виброметра ZETLAB ZET 110, оснащенного акселерометром BC 110. Параметры микропрофиля обработанной поверхности СМП регистрировались с помощью профилометров «Mahr» MarSurf M 300 и Mitutoyo surftest sj-210.

В исследовании применен комплекс статистических методов обработки данных. Экспериментальные исследования базировались на методологии полнофакторного эксперимента  $3^3$ .

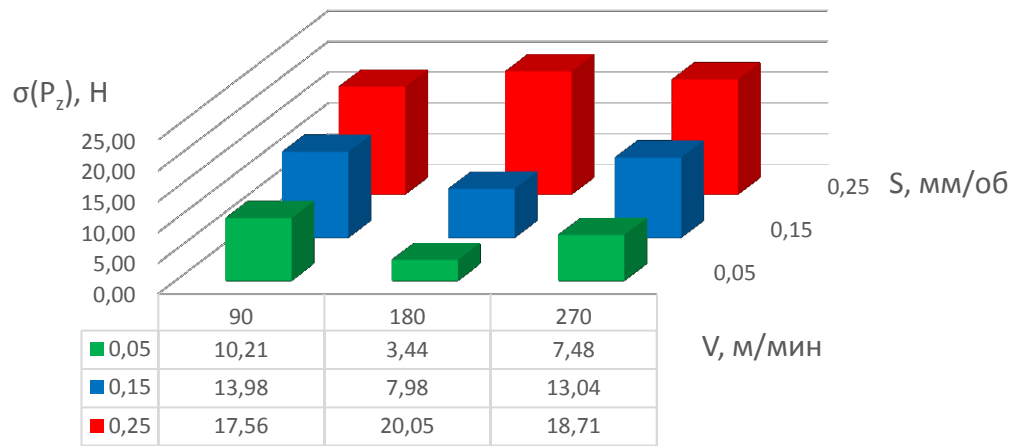
#### Результаты исследования и их обсуждение

Исследования режущих пластин различных производителей выявили существенный разброс физико-механических и теплофизических свойств, определяемый технологическими факторами и ведущий к нестабильности режущих свойств и вариативности периода стойкости СМП [3, 4]. Подтверждено, что в качестве комплексного метода оценки, учитывающего свойства инструментального и конструкционного материалов достаточно высокую надежность имеет величина термо-ЭДС пробного рабочего хода [5]. Это позволяет снизить уровень неопределенности технологической информации, а также применять данный показатель в качестве проактивного критерия работоспособности инструмента на стадии подготовки производства и для предварительной диагностики контактной пары «инструмент-заготовка» [6].

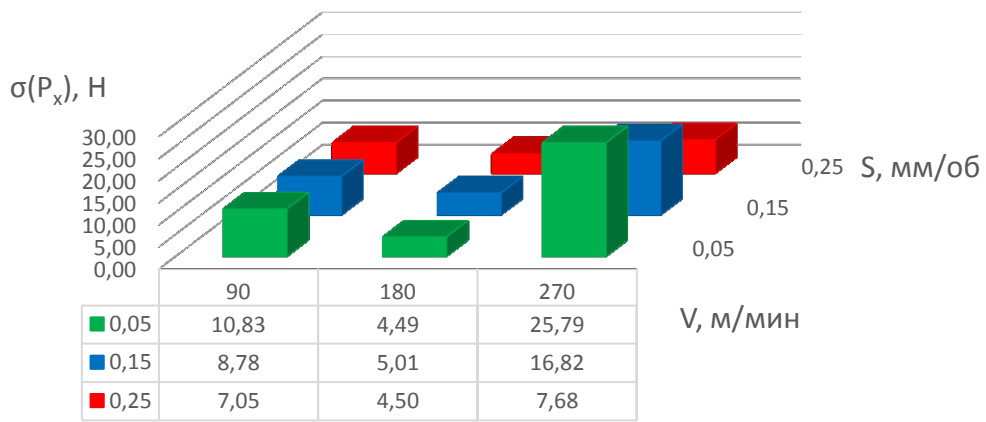
В результате проведенных исследований выявлена чувствительность тензометрических измерений силы резания к вариативности теплофизических свойств режущего инструмента, уровню температурно-силовой напряженности, виду контактного взаимодействия и стабильности процесса резания. Взаимосвязь вида контактного взаимодействия, неустойчивости процесса резания и формирование параметров шероховатости обработанной поверхности (*Ra*) иллюстрируют диаграммы (рис. 1).

Повышенные колебания составляющих силы резания в зоне низких (по причине наростообразования на режущей кромке) и в зоне высоких скоростей (вследствие циклического стружкообразования) сопровождаются существенным увеличением параметра *Ra* при малой подаче. С ростом подачи увеличивается влияние кинематического фактора на микропрофиль обработанной поверхности и уменьшением влияния неустойчивости контактного взаимодействия.

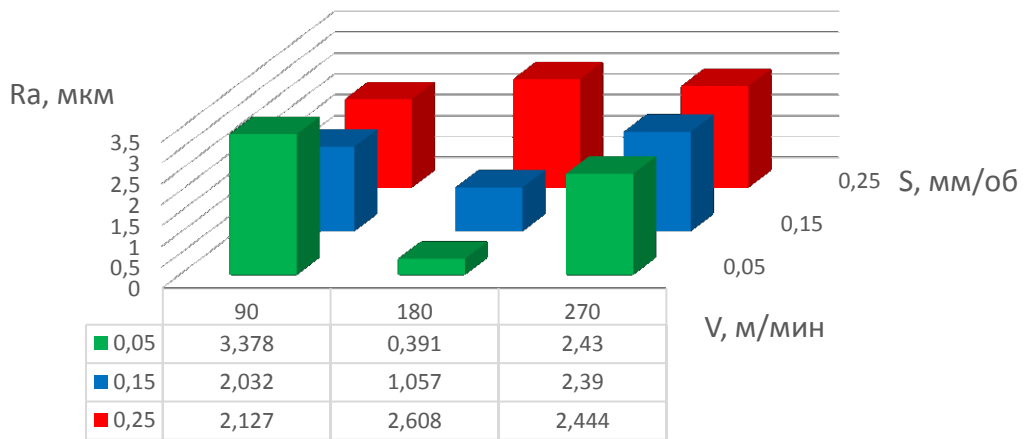
Отслеживать неустойчивость процесса в широком частотном диапазоне и определять его критический уровень позволяет интегральная виброэнергия, определяемая как площадь спектрограммы вибрационного сигнала. Установлено, что уровень и интенсивность роста вибрации зависит от обрабатываемого материала, применяемой СМП и режимов обработки. Стабильное развитие износа ведет к монотонному увеличению площади спектрограммы, в то время как образование дефектов режущей кромки таких как нарост сопровождается резким ростом площади спектрограммы.



а



б



в

Рис. 1. Изменение величины стандартного отклонения составляющих силы резания  $P_z$  (а),  $P_x$  (б) и среднеарифметического отклонения профиля  $R_a$  (в) при точении стали 12X18H10T твердосплавной пластиной Korloy NC5330 (глубина резания  $t=0,5$  мм)

Систематизация экспериментальных данных позволяет выявить закономерности изменения площади спектрограммы вибрационного сигнала (рис. 2) и прогнозировать остаточный

ресурс инструмента, оценивать управляемость процесса резания и формирования параметров качества обработанной поверхности.

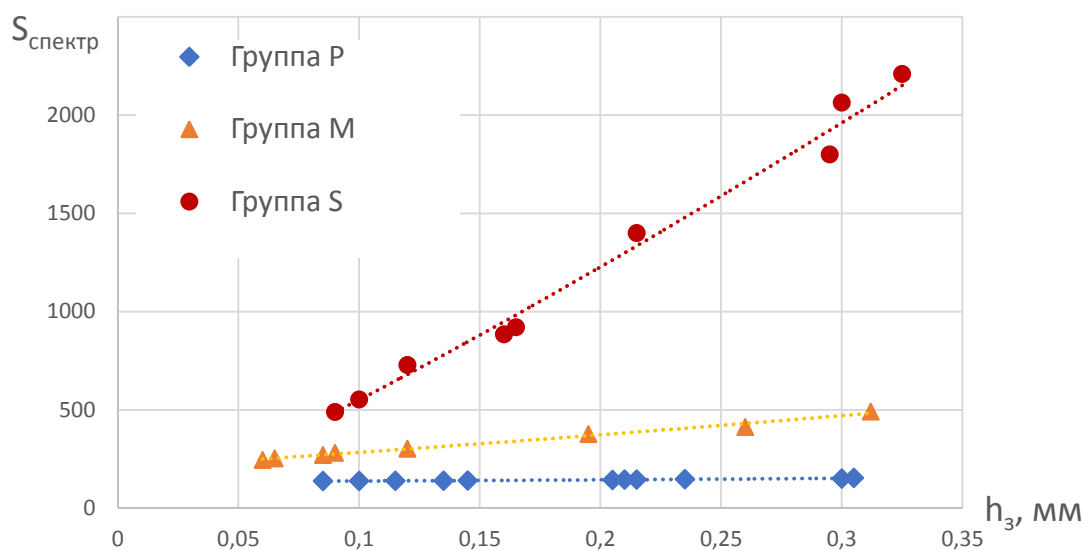


Рис. 2. Зависимость изменения величины интегральной виброэнергии от величины фаски износа по задней грани СМП

Установлено, что развитие износа СМП сопровождается трансформацией характера микропрофиля обработанной поверхности. При начальном износе инструмента наблюдается минимальное искажение регулярного характера профиля поверхности, определяемого главным образом кинематической составляющей (то есть радиусом скругления при вершине СМП и величиной продольной подачи). Дegradaция геометрии режущего инструмента со временем ведет к искажению микропрофиля. Интенсифицируется влияние вибраций и деформационных процессов. При том первоначальное снижение высотных параметров шероховатости сопровождается потерей регулярности, снижением достоверности и надежности прогнозных оценок и завершается общей дестабилизацией микропрофиля.

### Выводы

Управления процессами механической обработки и построение интеллектуальных технологических систем предполагает учет физических принципов контактного взаимодействия, механизмов изнашивания режущего клина, взаимосвязей условий обработки с параметрами микропрофиля поверхности.

Повышение эффективности управления процессом резания возможно при реализации многоэтапного мониторинга с применением многоканальной диагностики, что обеспечивает комплексную оценку состояния технологической системы, своевременное выявление отклонений, а также возможность адаптивной корректировки режимов обработки.

Оценить ресурс работоспособности СМП до начала обработки, а также снизить неопределенность технологической информации позволяет измерение сигнала термо-ЭДС в ходе пробного прохода:

Для оценки температурно-силовой напряженности и стабильности процесса обработки, а также сопоставления текущих параметров с теоретическими физическими моделями в режиме реального времени необходим мониторинг составляющих силы резания.

Мониторинг интегральной виброэнергии позволяет оценить стабильность процесса резания, текущее состояние режущего инструмента, а также прогнозировать остаточный ресурс работоспособности СМП.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проблемы внедрения искусственного интеллекта на производстве [Электронный ресурс] // Ведомости / АО «Бизнес Ньюс Медиа». – Москва, 2026. – Дата публикации: 03.02.2026. – Режим доступа: URL: [https://www.vedomosti.ru/press\_releases/2026/02/03/problemi-vnedreniya-iskusstvennogo-intellekta-na-proizvodstve] (дата обращения: 02.02.2026).
2. Дедкова, А. А. Возможности и ограничения метода контактной профилометрии при определении перепада высот для контроля топологических элементов и толщины слоев [Электронный ресурс] / А. А. Дедкова, В. Ю. Киреев, М. А. Махиборода // Nano Journal. 20XX. – № 38. – С. 23–40. – Режим доступа: URL: [https://nano-journal.ru/pdf/38\_23-40\_Dedkova.pdf] (дата обращения: 02.02.2026).
3. Азиков, Н. С. Влияние низкотемпературной плазменной модификации на контактные взаимодействия режущего инструмента / Н. С. Азиков, Б. М. Бржозовский, Д. В. Крайнев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 4. – С. 19–25. – DOI: 10.31857/S0235711923040041.

4. Чигиринский, Ю. Л. Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многономенклатурного производства / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова // Научные труды в машиностроении. – 2024. – № 4(154). – С. 29–40. – DOI: 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40.

5. Tikhonova, Z. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs / Z. Tikhonova, D. Kraynev, E. Frolov // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) : Confer-

ence proceedings ICIE 2019, Sochi, Russia, 25–29 March 2019. – Sochi, Russia : Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. – P. 1097–1105. – DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1\_117. – EDN: YEAGZO.

6. Крайнев, Д. В. Снижение неопределенности технологической информации за счет многоэтапной диагностики процесса резания / Д. В. Крайнев, Ю. Л. Чигиринский, Ж. С. Тихонова // Materials. Technologies. Design. – 2025. – Т. 7, № 4(23). – С. 98–110. – DOI: 10.54708/26587572\_2025\_742398. – EDN: IPYDTD.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 20.02.2026, подписана в печать 24.02.2026  
The article was submitted 15.01.2026, revised 20.02.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 621.941.01  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-3-310-31-34

Научная статья  
Original article

*О. А. Макарова, М. А. Цирульников, Н. А. Крылов, М. А. Овчинников*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ  
В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ НА ТОЧНОСТЬ  
ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Михаил Александрович Цирульников, peasecrediv@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема определения глубины резания при обработке нежестких деталей. Предложена математическая модель, позволяющая производить расчет упругих деформаций в процессе обработки.

**Ключевые слова:** упругие деформации, метод конечных элементов, точность, нежесткие детали, резание

**Для цитирования:** Макарова О. А., Цирульников М. А., Крылов Н. А., Овчинников М. А. Исследование влияния упругих деформаций в процессе обработки резанием на точность тонкостенных деталей методом конечных элементов. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 31–34. DOI 10.35211/1990-5297-2026-3-310-31-34.

**Информация об авторах:**

**Ольга Александровна Макарова** – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

**Михаил Александрович Цирульников** – студент-магистр, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: peasecrediv@gmail.com

**Никита Алексеевич Крылов** – студент-магистр, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: nikita\_krylov\_02@mail.ru

**Михаил Алексеевич Овчинников** – студент-магистр, кафедра ТМС, ВолгГТУ  
e-mail: maochinnikov@mail.ru

**Вклад авторов:**

**О. А. Макарова** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

**М. А. Цирульников** – изучение темы исследования, обработка и анализ результатов исследования.

**Н. А. Крылов** – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

**М. А. Овчинников** – изучение темы исследования, участвовал в обсуждении результатов.

*O. A. Makarova, M. A. Tsurulnikov, N. A. Krylov, M. A. Ovchinnikov*

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF ELASTIC DEFORMATIONS  
DURING CUTTING ON THE ACCURACY OF THIN-WALLED  
PARTS USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Mikhail A. Tsurulnikov, peasecrediv@gmail.com

**Abstract.** This article examines the problem of determining the cutting depth when machining non-rigid parts. A mathematical model is proposed for calculating elastic deformations during machining.

**Keywords:** elastic deformations, finite element method, accuracy, non-rigid parts, cutting

**For citation:** Makarova O. A., Tsirulnikov M. A., Krylov N. A., Ovchinnikov M. A. Research of the influence of elastic deformations during cutting on the accuracy of thin-walled parts using the finite element method. *Izvestiya VSTU*. 2026; 3(310): 31–34. DOI 10.35211/1990-5297-2026-3-310-31-34.

**Information about the authors:**

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

e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

**Mikhail A. Tsirulnikov** – Master's Student, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: peacecrediv@gmail.com

**Nikita A. Krylov** – Master's Student, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: nikita\_krylov\_02@mail.ru

**Mikhail A. Ovchinnikov** – Master's Student, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: maovchinnikov@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Olga A. Makarova** – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

**Mikhail A. Tsirulnikov** – study of the research topic, processing and analysis of the research results.

**Nikita A. Krylov** – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

**Mikhail A. Ovchinnikov** – study of the research topic, participated in the discussion of the results.

**Введение**

Нежесткие изделия весьма подвержены размерным отклонениям, которые обусловлены возникновением упругих деформаций технологической системы под действием сочетания механических и термических явлений в зоне резания [1, 2].

В существующих нормативно-справочных материалах по технологии машиностроения как российских, так и зарубежных авторов, давно разработаны эмпирические формулы расчета составляющих сил резания, применяются формулы сопротивления материалов для расчета прогиба заготовки, инструмента под их воздействием.

Однако, когда возникает потребность в изготовлении нежестких, прецизионных или сложных деталей, то становится затруднительно произвести все необходимые поправки и расчеты, пользуясь только данными справоч-

никами, поскольку, как отмечается в работах [3–5], эти справочные данные содержат значительные погрешности вплоть до 100 % и более. Что может приводить к увеличению брака, временных и ресурсных затрат. Более того, на данный момент в существующих российских справочниках наблюдается дефицит в поправочных коэффициентах для расчета сил резания по эмпирическим формулам при обработке заготовок из сплавов цветных металлов.

Таким образом, данное исследование ставит перед собой актуальную задачу – предложить методику определения упругих деформаций с целью компенсации глубины резания для обработки заготовок деталей из сплавов цветных металлов. Потому исследование проводилось на тонкостенном корпусе из материала Д16Т ГОСТ 4784–2019 (рис. 1).

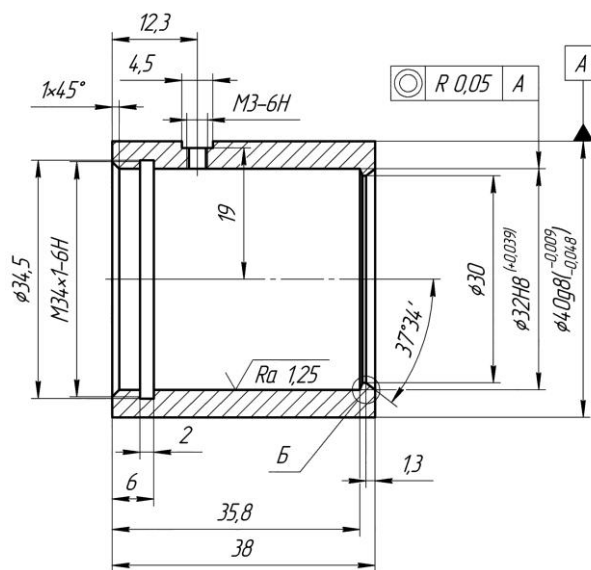


Рис. 1. Чертеж тонкостенного корпуса

**Материалы и методы исследования**

Для решения данной задачи авторами предлагается использовать метод конечных элементов, реализованный в инженерном программном обеспечении SIMULIA Abaqus CAE. С его помощью измеряются упругие и пластические деформации, значение которых будет зависеть от вносимых инженером-технологом физико-

механических свойств обрабатываемого материала, конструкции детали, ее размерной точности, способа закрепления, геометрии режущей части инструмента и других факторов и параметров.

Величина припуска определяется расчетно-аналитическим способом по методу В. М. Кована [2, 6] и представлена в таблице.

**Расчет величины припуска для наружной поверхности диаметром 40g8**

Тех. переходы	Элементы припуска, мкм				Z <sub>min</sub> , мкм	d <sub>p</sub> , мм	Допуск T, мкм	Пред. размеры, мм		Пред. знач. прип., мм	
	Rz	h	ρ	ε <sub>y</sub>				d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	Z <sub>min</sub>	Z <sub>max</sub>
Заг.	160	250	40	–	–	42,722	1000	42,7	43,7	–	–
Черн. точение	125	120	2,4	470	2·882	40,958	620	40,96	41,58	1,74	2,12
Получист. точение	63	60	2	28,2	2·273	40,412	250	40,41	40,66	0,55	0,92
Получист. точение	25	30	2	28,2	2·151	40,110	100	40,1	40,2	0,31	0,46
Чист. точение	12,5	–	1,6	23,5	2·79	39,952	39	39,952	39,991	0,148	0,209

Минимальный общий припуск z<sub>min</sub> = 2,748 мм.

Максимальный общий припуск z<sub>max</sub> = 3,709 мм.

Номинальный припуск z<sub>ном</sub> = 3,287 мм.

Согласно ГОСТ 18482–2018, габаритные размеры заготовки: 45×25×1000 мм (наружный диаметр, внутренний диаметр, длина). Чтобы обеспечить допуск соосности необходимо обработать наружную и внутреннюю поверхности с одной установки, для этого заготовка устанавливается с вылетом 48 мм из кулачков патрона, остальная часть прутка остается в передней бабке станка. Для оптимизации модели назначена общая длина заготовки 105 мм.

Обработка в трехкулачковом самоцентрирующемся патроне 7100-0035 ГОСТ 2675–80. В качестве режущей пластины используется Sandvik CCMT 09 T3 08-UM 1125, державка SCACR 103C-S. Инструмент, патрон и кулачки моделируются как абсолютно жесткие тела.

Для расчета использовались квадратичные тетраэдрические элементы и метод построения «Free», что позволяет выполнять построение сетки на любых сложных поверхностях и при этом экономить время, не занимаясь разбиением модели на сектора (рис. 2).

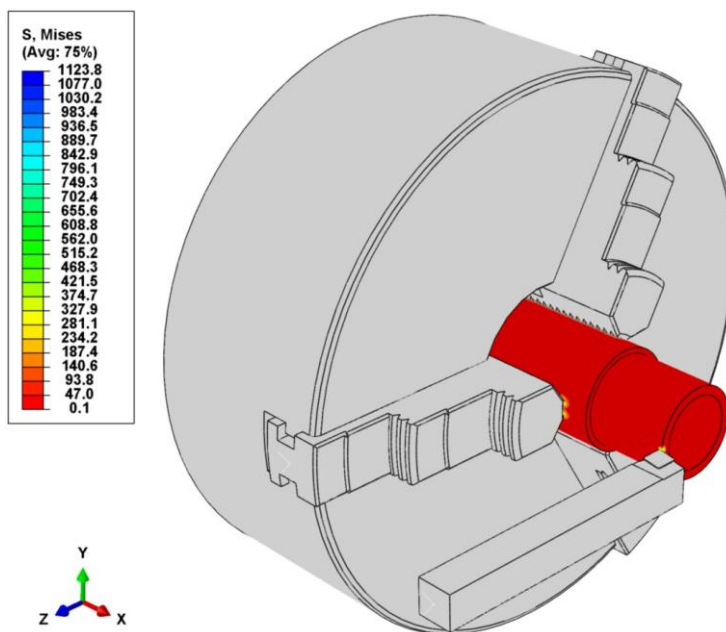


Рис. 2. Общий вид модели и распределение напряжений по Мизесу

Кулачки связаны единой цилиндрической системой координат, позволяющей имитировать механизм самоцентрирующегося патрона.

Вычислительные мощности тестового стенда (ЭВМ) позволили установить размер элемента 100 мкм в области резания. Количество элементов деформируемого корпуса составило не более 150000.

Качество построенной сетки оценивалось проверкой элементов на «Aspect Ratio», которое находилось в пределах от 1.5 до 5, что является положительным значением, не вносящим грубых погрешностей в расчет.

При расчете были учтены:

- геометрическая форма кулачков и резца (рис. 3) в зоне контакта;
- трение покоя кулачков и резца в зоне контакта;
- процесс формирования стружки через удаление элементов на основе накопленной пластической деформации;
- геометрическая нелинейность «Nlgeom» для адекватного моделирования течения металла.

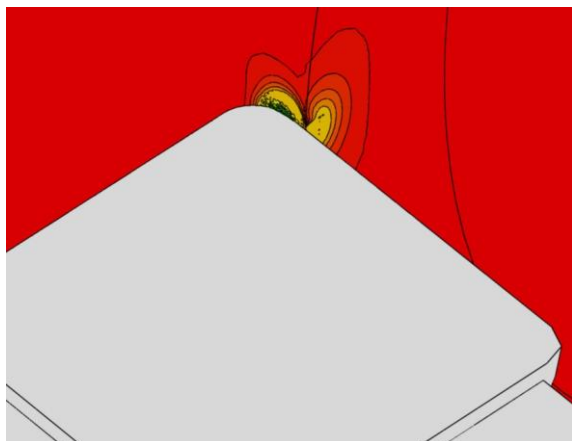


Рис. 3. Зона резания

Решение было разделено на 3 этапа: зажим заготовки кулачками, внедрение резца на определенную глубину резания, отвод резца.

### Выводы

Расчет упругих деформаций методом конечных элементов является пригодным для задач технологии машиностроения и способен снизить количество реально проводимых опытов, в ряде случаев заменить их. Однако, требует серьезных вычислительных мощностей или тщательной оптимизации рабочей модели при анализе поверхностей с предельными отклонениями размеров по критериям точности ниже 9.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учеб. для вузов / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отдел. – 1985. – 514 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т 1. / под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. – 7-е изд. испр. – Москва : Машиностроение, 2023. – 756 с.
3. Анализ причин ошибок при расчете погрешностей из-за упругих перемещений элементов технологической системы при токарной обработке / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ж. С. Тихонова, Р. И. Аржуханов // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 1(248) / ВолГГТУ. – 2021. – С. 12–15.
4. Козлов, В. Н. Определение погрешности расчета сил резания при концевом фрезеровании стали / В. Н. Козлов, А. С. Бабаев, А. С. Шевчук // Современные проблемы машиностроения : сб. ст. XVI Междунар. науч.-технич. конф., г. Томск, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. – Томский политехнический университет, 2024. – С. 212–216.
5. Волков, А. В. Гипотеза о точности расчета силы резания. Разработка математической модели / А. В. Волков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 5. – С. 158–167.
6. Горбачевич, А. Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., стер. / А. Ф. Горбачевич, В. А. Шкред. – Минск: Высшая школа, 2007. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 30.01.2026, подписана в печать 24.02.2026  
The article was submitted 15.01.2026, revised 30.01.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 621.373.826  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-35-39

Научная статья  
Original article

*А. В. Толстых, Р. Д. Воронов, А. С. Якушкин, М. А. Блохин*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ГЛУБИНЫ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ  
И ГРАВИРОВКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08Х18Н10  
ОТ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

✉ Роман Дмитриевич Воронов, smr.rom@yandex.ru

**Аннотация.** Работа направлена на исследование зависимости глубины лазерной маркировки от частоты излучения при многопроходной маркировке. Выводится искомая зависимость, которая подтверждает гипотезу авторов о наличии эффекта накопления внутренней энергии в материале и может быть применена для расчета режимов маркировки и гравировки маркировочных установок.

**Ключевые слова:** лазерная маркировка, глубина маркировки, нержавеющая сталь, частота излучения, лазерная обработка

**Для цитирования:** Толстых А. В., Воронов Р. Д., Якушкин А. С., Блохин М. А. Исследование зависимости глубины лазерной маркировки и гравировки нержавеющей стали 08Х18Н10 от частоты излучения при многопроходной обработке. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 35–39. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-35-39.

**Информация об авторах:**

**Александр Владимирович Толстых** – студент кафедры ОТМП, ТГУ  
e-mail: dominys12@mail.ru

**Роман Дмитриевич Воронов** – преподаватель кафедры ОТМП, ТГУ  
e-mail: smr.rom@yandex.ru

**Александр Сергеевич Якушкин** – аспирант кафедры ОТМП, ТГУ  
e-mail: asy001@list.ru

**Максим Александрович Блохин** – аспирант кафедры ОТМП, ТГУ  
e-mail: m4ax@mail.ru

**Вклад авторов:**

**А. В. Толстых** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов, проведение эксперимента.

**Р. Д. Воронов** – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

**А. С. Якушкин** – обработка и анализ результатов исследования, формирование гипотезы исследования.

**М. А. Блохин** – поиск и анализ научных источников, участие в обсуждении результатов, формирование выводов работы.

*A. V. Tolstykh, R. D. Voronov, A. S. Yakushkin, M. A. Blokhin*

**STUDY OF THE DEPENDENCE OF LASER MARKING  
AND ENGRAVING DEPTH ON RADIATION FREQUENCY OF 08H18N10  
STAINLESS STEEL UNDER MULTI-PASS PROCESSING**

Togliatti State University, Togliatti, Russia

✉ Roman D. Voronov, smr.rom@yandex.ru

**Abstract.** The work is aimed at investigating the dependence of the depth of laser marking on the frequency of radiation during multi-pass marking. The desired relationship is derived, which confirms the authors' hypothesis about the effect of accumulation of internal energy in the material and can be used to calculate the marking and engraving modes of marking installations.

**Keywords:** laser marking, marking depth, stainless steel, radiation frequency, laser processing

**For citation:** Tolstykh A. V., Voronov R. D., Yakushkin A. S., Blokhin M. A. Study of the dependence of laser marking and engraving depth on radiation frequency of 08H18N10 stainless steel under multi-pass processing. Izvestiya VSTU. 2026; 3(310): 35–39. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-35-39.

**Information about the authors:**

**Aleksandr V. Tolstykh** – Student of the Department of Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production, TSU

E-mail: dominys12@mail.ru

**Roman D. Voronov** – lecturer of the Department of Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production, TSU

E-mail: smr.rom@yandex.ru

**Aleksandr S. Yakushkin** – Postgraduate student of the Department of Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production, TSU

E-mail: asy001@list.ru

**Maksim A. Blokhin** – Postgraduate student of the Department of Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production, TSU

E-mail: m4ax@mail.ru

#### Contribution of the authors:

**Aleksandr V. Tolstykh** – definition of the research objective, participation in the discussion of results, conducting the experiment.

**Roman D. Voronov** – processing and analysis of research results, writing the manuscript.

**Aleksandr S. Yakushkin** – processing and analysis of research results, formulation of the research hypothesis.

**Maksim A. Blokhin** – search and analysis of scientific sources, participation in the discussion of results, formulation of the study conclusions.

#### Введение

В настоящий момент вопросы, связанные с глубиной лазерной маркировки и гравировки рассмотрены весьма узко. Большинство современных научных работ по тематике лазерной маркировки и гравировки направлены на оптимизацию режимов обработки [1], установление зависимостей структуры поверхности и цвета маркировки от режимов излучения [2], и исследования, связанные с деформацией и изменениями шероховатости маркируемых поверхностей [3].

Наряду с ними существуют не менее актуальные, фундаментальные исследования, устанавливающие теоретические и экспериментальные связи между основными параметрами режимов лазерного излучения [4], [5], [6]. Из них следует, в том числе и теоретическая взаимосвязь между глубиной маркировки и частотой лазерного излучения.

Цель настоящего исследования – выявить зависимость глубины лазерной маркировки от частоты излучения при многопроходной обработке на примере стали 08X18H10. Соответственно, задачами является получение набора экспериментальных данных, а затем регрессионный анализ для получения функции, описывающей искомую зависимость.

Глубина лазерной маркировки зависит главным образом от мощности излучения, плотности энергии лазерного излучения, а также частоты импульсов, поскольку эти параметры влияют на температурные процессы в материале [7]. В случае увеличения частоты излучения наблюдается снижение энергии, сообщаемой одним отдельным импульсом и, как следствие, снижение результирующей глубины маркиров-

ки, в чем можно убедиться, рассмотрев исследование – [8].

#### Материалы и методы исследования

Для теоретической оценки глубины, получаемой за один импульс определенной энергии, воспользуемся известной зависимостью [9]. Умножим глубину, полученную за один проход  $D$ , на  $n$  проходов. Тогда, формула имеет вид (1):

$$D = \frac{E_0}{A \cdot \rho \cdot (c \Delta T + L)} \cdot n, \quad (1)$$

где сохранены оригинальные обозначения [9].

Для случая образца в виде пластинки из стали 08X18H10 толщиной 2 мм, подвергаемой многопроходному (100 раз) облучению при постоянной мощности в 30 Вт и скорости 100 мм/с, получаем теоретическую зависимость, представленную на рис. 1.

Диапазон изменения частот выбран от 20 до 80 кГц, так как он включает в себя большинство частот, применяемых при цветной лазерной маркировке [7] и применим на маркираторе «DASKTOOLS DX-30W», используемом в экспериментальной части.

Данная зависимость не учитывает эффекты накопления внутренней тепловой энергии внутри материала, что, согласно гипотезе авторов, занижает значения глубины маркировки.

Для вывода зависимости, учитывающей данный эффект, выполнена серия экспериментов по лазерной маркировке. Для экспериментальной проверки гипотезы получены области многопроходной маркировки на указанном диапазоне частот с шагом 5 Гц и режимах, обозначенных выше. Каждая область маркировки подвергалась 100 проходам и представляет собой квадрат со стороной 7 мм. Результат экспериментальной многопроходной маркировки показан на рис. 2.

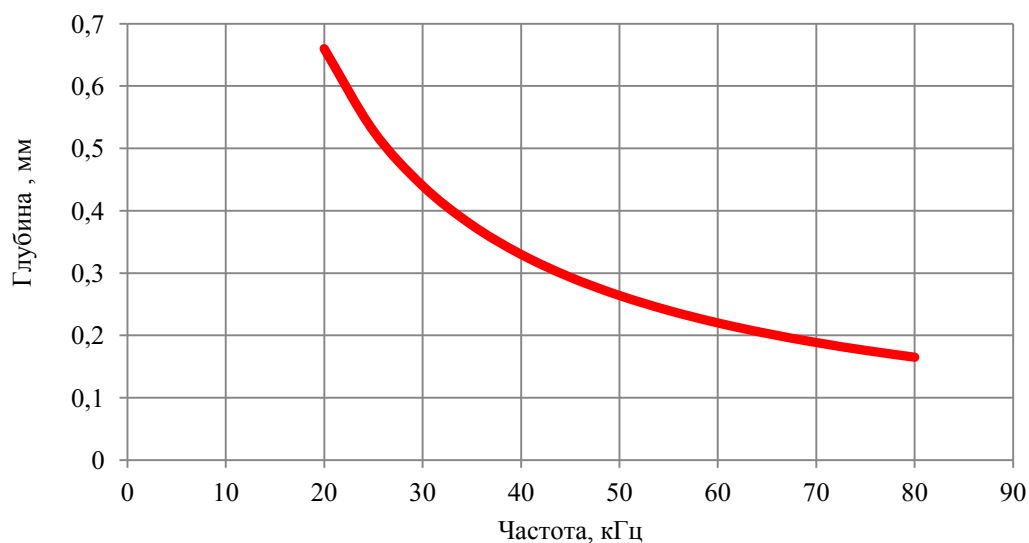


Рис. 1. Теоретическая зависимость глубины маркировки от частоты излучения



Рис. 2. Экспериментальная многопроходная маркировка при различных частотах

Эксперимент с пластиной для усреднения расчета случайных погрешностей был проведен несколько раз. Полученные наборы квадратных углублений представляют собой результат маркирования и рассматриваются как набор искомым экспериментальных данных, которые были зафиксированы при помощи гладкого микрометра МК-25 0,01 «ЧИЗ» (измерена глубина).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Отобразим графически полученные экспериментальные данные совместно с теоретической зависимостью, для оценки сходимости и интерпретации результатов эксперимента (рис. 3).

Экспериментальная глубина маркировки оказалась значительно больше теоретической. Разница между теоретической и эксперимен-

тальной глубинами достигает 55 % на интервале 35–50 Гц, но при более низких частотах наблюдается улучшение сходимости до 25 %, что связано, вероятно, с крайне интенсивным ростом теоретической зависимости в данной области. Расходимость не превышает 10–12 % в высокочастотной области около 80 кГц, что объясняется близостью к идеальному теоретическому случаю непрерывного излучения.

В целом, полученные экспериментальные данные соотносятся с приведенными выше исследованиями, указывающими на переходные тепловые процессы внутри материала, как на определяющий фактор формирования углублений на каждом переходе маркирования, а также согласуются с гипотезой авторов относительно повышения реальной глубины маркировки вследствие эффекта теплонакопления.

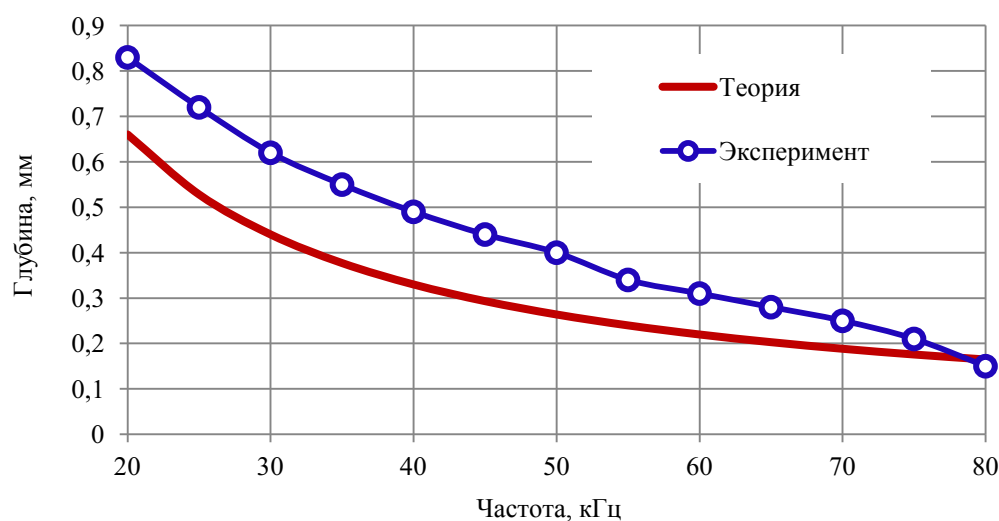


Рис. 3. Сопоставление теоретической и экспериментальной зависимости

Выполним моделирование экспериментальной зависимости, при помощи известных уравнений регрессии. Выбрана экспоненциальная регрессия, так как она обеспечила наименьший процент средней погрешности относительно экспериментальных данных. Полу-

ченное уравнение регрессии имеет вид (2):

$$D = 1,382 \cdot e^{-0,026\nu}, \quad (2)$$

где  $\nu$  – частота излучения, кГц.

Графически, полученная регрессия показана на рис. 4.

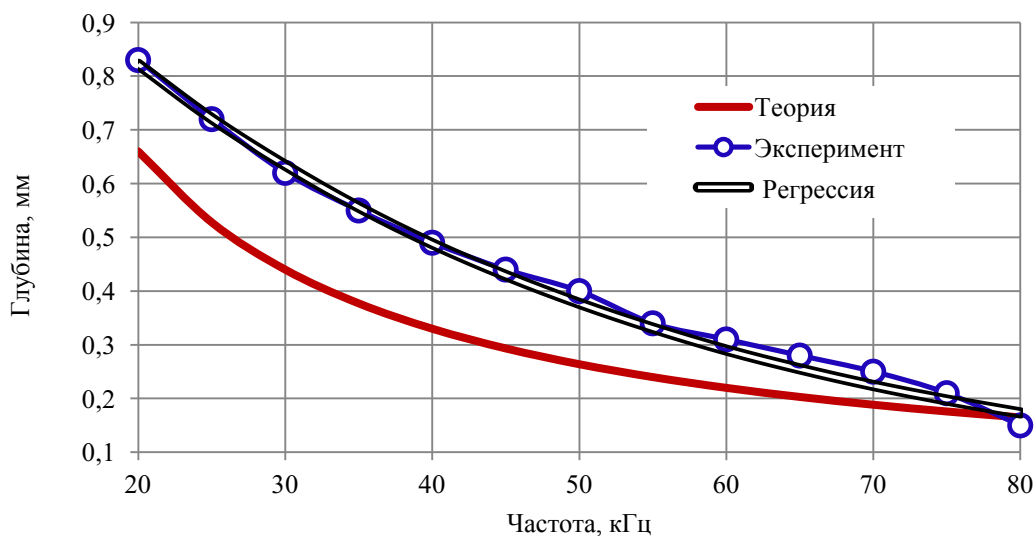


Рис. 4. Выведенная зависимость для многопроходной маркировки

#### Выводы

Получена эмпирически обоснованная зависимость глубины лазерной маркировки и гравировки стали 08X18H10 от частоты излучения при многопроходной лазерной обработке, представленная в виде функции. Полученная формула применима для любого произвольного значения проходов и различных мощностей излучения, для чего достаточно выполнить корректировку коэффициента регрессии 1,382.

Варьирование этого коэффициента является направлением дальнейших исследований. Полученная зависимость позволяет снизить трудоемкость этапа выбора режимов лазерного оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang A. et al. Femtosecond laser marking depth of field 3D code //Infrared Physics & Technology. – 2023. – Т. 131. – С. 104680. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104680>

2. Konchus D. A., Pryakhin E. I., Sivenkov A. V. Structural variations on the surface of metallic products at laser marking // CIS Iron Steel Rev. – 2021. – Т. 22. – С. 96-101. DOI: 10.17580/cisr.2021.02.18

3. Singh S. et al. Investigations on NiTi shape memory alloy thin wall structures through laser marking assisted wire arc based additive manufacturing // Journal of manufacturing processes. – 2021. – Т. 66. – С. 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.004>

4. Ганзуленко, О. Ю. Технология лазерной маркировки серийных изделий из металлических и полимерных материалов в целях их учета и идентификации / О. Ю. Ганзуленко, Е. В. Ларионова, А. П. Петкова // Металлообработка. – 2014. – №. 1 (79). – С. 21–26.

5. Притоцкий, Е. М. Экспериментальные исследования по формированию цветности на поверхности металлов лазерным излучением / Е. М. Притоцкий [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий,

механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – №. 4. – С. 581–587. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-581-587

6. Byskov-Nielsen J. Short-pulse laser ablation of metals: Fundamentals and applications for micro-mechanical interlocking : дис. – Aarhus : Department of physics and Astronomy, University of Aarhus, 2010.

7. Горный, С. Цветная лазерная маркировка поверхности металлов / С. Горный [и др.] // Фотоника. – 2013. – №. 6. – С. 034–044.

8. Haasler D., Schneider T., Poprawe R. Investigation of the Ablation Rate of Stainless Steel by means of few Ultrashort Laser Pulses up to 150 J/cm<sup>2</sup> // Journal of Laser Micro Nanoengineering. – 2019. – Т. 14. – №. 3. – С. 236-244. DOI: 10.2961/jlmn.2019.03.0007

9. Коденко, Н. Технология лазерной маркировки материалов / Н. Коденко, А. Иванов // Современная светотехника. – 2010. – Т. 2. – С. 31–36.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 10.02.2026, подписана в печать 24.02.2026

The article was submitted 15.01.2026, revised 10.02.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 621.923.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-39-45

Научная статья

Original article

**В. Н. Тышкевич, В. А. Носенко, А. В. Саразов**

## **МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ И ШЛИФОВАНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ КОЛЬЦЕВЫХ И ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ**

**Волжский политехнический институт (филиал)**

**Волгоградского государственного технического университета, Волгоский, Россия**

✉ Владимир Николаевич Тышкевич, [tubem@mail.ru](mailto:tubem@mail.ru)

**Аннотация.** Исследуется плоское шлифование торцовых поверхностей колец малой кривизны и малой осевой жесткости и боковых граней призматических заготовок малой жесткости. Предлагаемый методологический подход к выбору оптимальных условий закрепления и плоского шлифования маложестких кольцевых и призматических заготовок деталей подшипников с учетом их упругого деформирования при закреплении и шлифовании, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности при максимальной производительности процесса, включает в себя два этапа оптимизации процесса. На первом этапе заготовку рассматривали как абсолютно жесткую, оптимизацию осуществляли из условия выполнения требований к таким параметрам качества обработанной поверхности, как шероховатость, волнистость, отсутствие шлифовочных прижогов, трещин и др., за исключением допуска плоскостности. Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе оптимизации при варьировании, для уменьшения максимальных прогибов заготовки, величин: сил резания, притяжения магнитного поля стола станка и изгибной жесткости заготовки.

**Ключевые слова:** плоское шлифование, упругие деформации, кольцевая заготовка, призматическая заготовка, малая жесткость

**Для цитирования:** Тышкевич В. Н., Носенко В. А., Саразов А. В. Методология выбора оптимальных условий закрепления и шлифования маложестких кольцевых и призматических заготовок деталей подшипников. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 39–45. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-39-45.

### **Информация об авторах:**

**Владимир Николаевич Тышкевич** – доцент, канд. техн. наук, кафедра ВМФМ, Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

РИНЦ AuthorID: 614013

e-mail: [tubem@mail.ru](mailto:tubem@mail.ru)

**Владимир Андреевич Носенко** – профессор, д-р техн. наук заведующий кафедрой ВТО, ВПИ (филиал) ВолгГТУ

РИНЦ AuthorID: 171385

e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

**Александр Васильевич Саразов** – доцент, канд. техн. наук заведующий кафедрой ВМФМ, ВПИ (филиал) ВолгГТУ

РИНЦ AuthorID: 619804

e-mail: sarazov\_av@mail.ru

**Вклад авторов:**

**В. Н. Тышкевич** – определение цели работы, разработка методологии, анализ результатов исследования, составление статьи, написание текста статьи.

**В. А. Носенко** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

**А. В. Саразов** – анализ блок-схемы алгоритма, участие в обсуждении результатов.

*V. N. Tyshkevich, V. A. Nosenko, A. V. Sarazov*

**METHODOLOGY FOR SELECTING OPTIMAL CONDITIONS  
FASTENING AND GRINDING OF LOW-RIGIDITY RING  
AND PRISMATIC BLANKS BEARING PARTS**

**Volzhsy Polytechnical Institute (Branch) of  
Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia**

✉ Vladimir N. Tyshkevich, tubem@mail.ru

**Abstract.** Flat grinding of end surfaces of rings of low curvature and low axial rigidity and side faces of prismatic workpieces of low rigidity is investigated. The proposed methodological approach to selection of optimal conditions for fastening and flat grinding of low-rigidity ring and prismatic workpieces of bearing parts taking into account their elastic deformation during fastening and grinding, providing the specified requirements for the quality of the treated surface at maximum process efficiency, includes two stages of process optimization. At the first stage, the workpiece was considered as absolutely rigid, optimization was carried out to meet the requirements for such quality parameters of the treated surface as roughness, waviness, absence of grinding burns, cracks, etc., with the exception of flatness tolerance. The required flatness tolerance is provided at the second stage of optimization when varying, to reduce the maximum deflections of the workpiece, the values: cutting forces, magnetic field attraction of the machine table and bending stiffness of the workpiece.

**Keywords:** flat grinding, elastic deformations, ring blank, prismatic blank, low rigidity

**For citation:** Tyshkevich V. N., Nosenko V. A., Sarazov A. V. Methodology for selecting optimal conditions fastening and grinding of low-rigidity ring and prismatic blanks bearing parts. *Izvestiya VSTU*. 2026; 3(310): 39–45. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-39-45.

**Information about the authors:**

**Vladimir N. Tyshkevich** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanics, Physics, and Mathematics, Volzhsky Polytechnical Institute (branch of VSTU)

RSCI AuthorID: 614013

e-mail: tubem@mail.ru

**Vladimir A. Nosenko** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of Department of VTO, Volzhsky Polytechnical Institute (branch of VSTU)

RSCI AuthorID: 171385

e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

**Alexander V. Sarazov** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of Department of VMFM, Volzhsky Polytechnical Institute (branch of VSTU)

RSCI AuthorID: 619804

e-mail: sarazov\_av@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Vladimir N. Tyshkevich** – defining the purpose of the work, development of methodology, analyzing the research results, writing the article, and drafting the article text.

**Vladimir A. Nosenko** – definition of the work purpose, participation in the discussion of the results.

**Alexander V. Sarazov** – algorithm flowchart analysis, participation in the discussion of the results.

**Введение**

Детали малой жесткости типа колец малой кривизны и призматических стержней, широко

применяются в различных отраслях машиностроения. Наиболее ответственные и дорогостоящие изделия, в которых используются по-

добные детали – крупногабаритные подшипники, рельсовые направляющие качения [1–3].

Качество поверхностного слоя деталей, определяющее эксплуатационные показатели машин и механизмов, окончательно формируется на финишных операциях, большая часть которых производится абразивным инструментом. Поэтому повышение эффективности операций шлифования относится к приоритетным задачам машиностроения.

Особенность механической обработки деталей малой жесткости – возникновение при закреплении и обработке деформаций, величина которых превышает указанные на чертеже размерные и/или геометрические допуски. Обеспечение требуемого допуска в этом случае значительно увеличивает время и стоимость операции. Для снижения величины упругих деформаций используют многопроходную обработку деталей на заниженных режимах, дополнительные опоры в виде люнетов при токарной обработке; подкладки или компенсаторы, многоцикловую термообработку, увеличение числа переходов, выхаживание при шлифовании и т.д. Все перечисленные технологические приемы увеличивают трудоемкость изготовления [4, 5].

Упругие деформации в направлении перпендикулярном поверхности стола станка при закреплении и плоском шлифовании торцов заготовок колец, боковых граней призматических заготовок усложняют обеспечение требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности (ОП). Под нагрузкой при шлифовании заготовка деформируется (прогибается) в направлении перпендикулярном поверхности стола станка. После шлифования и снятия магнитного поля в результате упругого деформирования заготовки отклонение от плоскостности изменяется на величину прогиба. Технологические способы их устранения значительно увеличивают время обработки. Эффективным методом решения данной проблемы, является обработка с ограничением величины максимальной упругой деформации заготовок при закреплении и механической обработке, что позволит уменьшить время и стоимость последующих доводочных операций, повысит производительность механической обработки.

**Цель исследований:** разработка методологии выбора оптимальных условий закрепления и плоского шлифования маложестких кольцевых и призматических заготовок деталей под-

шипников с ограничением максимальной упругой деформации заготовок, обеспечивающих получение заданных требований к качеству ОП при повышении производительности процесса шлифования.

#### Методология выбора оптимальных условий

Предлагаемая методология выбора оптимальных условий закрепления и плоского шлифования торцов заготовок колец малой кривизны и жесткости и боковых граней призматических заготовок малой жесткости с учетом их упругого деформирования при закреплении и шлифовании, обеспечивающих получение заданных требований к качеству ОП при повышении производительности процесса включает в себя два этапа оптимизации.

На первом этапе (рис. 1) заготовку рассматривали как абсолютно жесткую, оптимизацию осуществляли из условия выполнения требований к таким параметрам качества ОП, как шероховатость, волнистость, отсутствие шлифовочных прижогов, трещин и др., за исключением допуска плоскостности. Математические модели радиальной  $P_y = P_y(x_1, x_2, \dots, x_k)$  и касательной  $P_z = P_z(x_1, x_2, \dots, x_k)$  составляющих силы резания, параметра шероховатости  $Ra = Ra(x_1, x_2, \dots, x_k)$  и др. могут быть получены методами планирования эксперимента, взяты из базы данных наработанных математических моделей по справочной литературе (рис. 1). С помощью этих математических моделей определяем области допускаемых параметров характеристики абразивного инструмента и режимов  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , обеспечивающих выполнение требований к качеству ОП.

Целевая функция оптимизации – максимальная производительность обработки  $Q(x)$  при условии расположения в области допускаемых значений входных параметров  $[x_i]$ :  $\max Q(x)$ , где  $x_i = \{\text{характеристики шлифовального круга: твердость, зернистость, структура, абразивный материал, вид связки; режимные параметры: радиальная подача } S_p, \text{ скорость подачи стола } v_s, \text{ скорость резания } V\}$ ;  $[Ra]$  – допускаемое среднее арифметическое отклонение профиля;  $[P_z]$  – допускаемая тангенциальная составляющая силы резания, обеспечивающая бесприжоговое шлифование. Полученные оптимальные величины входных параметров определяют оптимальные условия шлифования с максимальной производительностью и названы – режим 1.

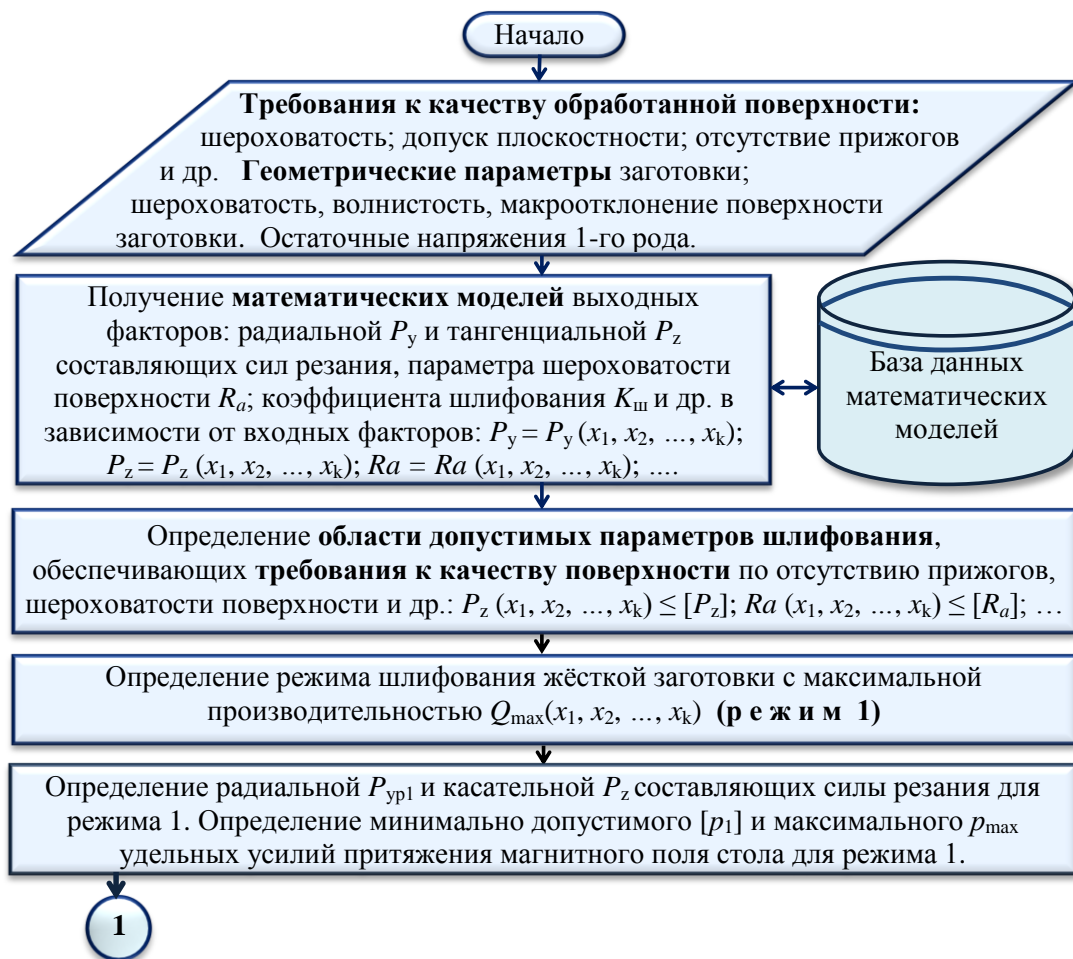


Рис. 1. Блок-схема алгоритма выбора оптимальных условий закрепления и шлифования торцовых поверхностей колец и боковых граней призматических заготовок, обеспечивающих требуемое качество ОП, исключая допуск плоскостности (первый этап)

На втором этапе требуемый допуск плоскостности ОП обеспечивали ограничением максимальной упругой деформации заготовки при закреплении и обработке по алгоритму (рис. 2). Варьируемыми параметрами являются силы резания; силы притяжения магнитного поля стола; жесткость заготовки при изгибе. Удельное усилие притяжения магнитного поля стола  $p$  изменяется в допустимых пределах:  $p_{max} > [p] \geq [p_1]$ , где  $p_{max}$  – удельное усилие притяжения на первом этапе;  $[p_1]$  – минимальное, определяемое из условия отсутствия сдвига, поворота заготовки при шлифовании по справочным рекомендациям.

Условие обеспечения требуемого допуска плоскостности ОП ограничивает максимальную упругую деформацию  $w_{max}$  от действия сил резания и притяжения магнитного поля, веса заготовки допускаемой величиной  $[\Delta]$ :

$$w_{max} \leq [\Delta] = \lambda \Delta + \Delta_{ост} - \Delta_t, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент точности при проектировании, принятый равным 0,75;  $\Delta$  – допуск плоскостности поверхности на операции шлифования;  $\Delta_t$  – достижимое отклонение от плоскостности ОП при шлифовании жесткой заготовки в рассматриваемых условиях;  $\Delta_{ост}$  – максимальный прогиб заготовки от действия остаточных напряжений 1-го рода.

Максимальный прогиб кольцевых и призматических заготовок от действия остаточных напряжений 1-го рода при плоском шлифовании заготовки в условиях режима 1 определяется по разработанной расчетно-экспериментальной методике с использованием эпюр распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя [5].

При моделировании максимальной упругой деформации учитывали: действие на заготовку сил резания и притяжения магнитного поля стола станка, собственного веса; контактные деформации соприкасающихся поверхностей

заготовки и стола станка; форму поперечного сечения заготовки; жесткость заготовки при изгибе и кручении, зависящую от числа опорных контактов и числа устанавливаемых компенсаторов. Основную долю в максимальной упру-

гой деформации составляет прогиб заготовки в зазорах между соприкасающимися поверхностями плоскости стола станка и цилиндрической с синусоидальной направляющей поверхностью заготовки.

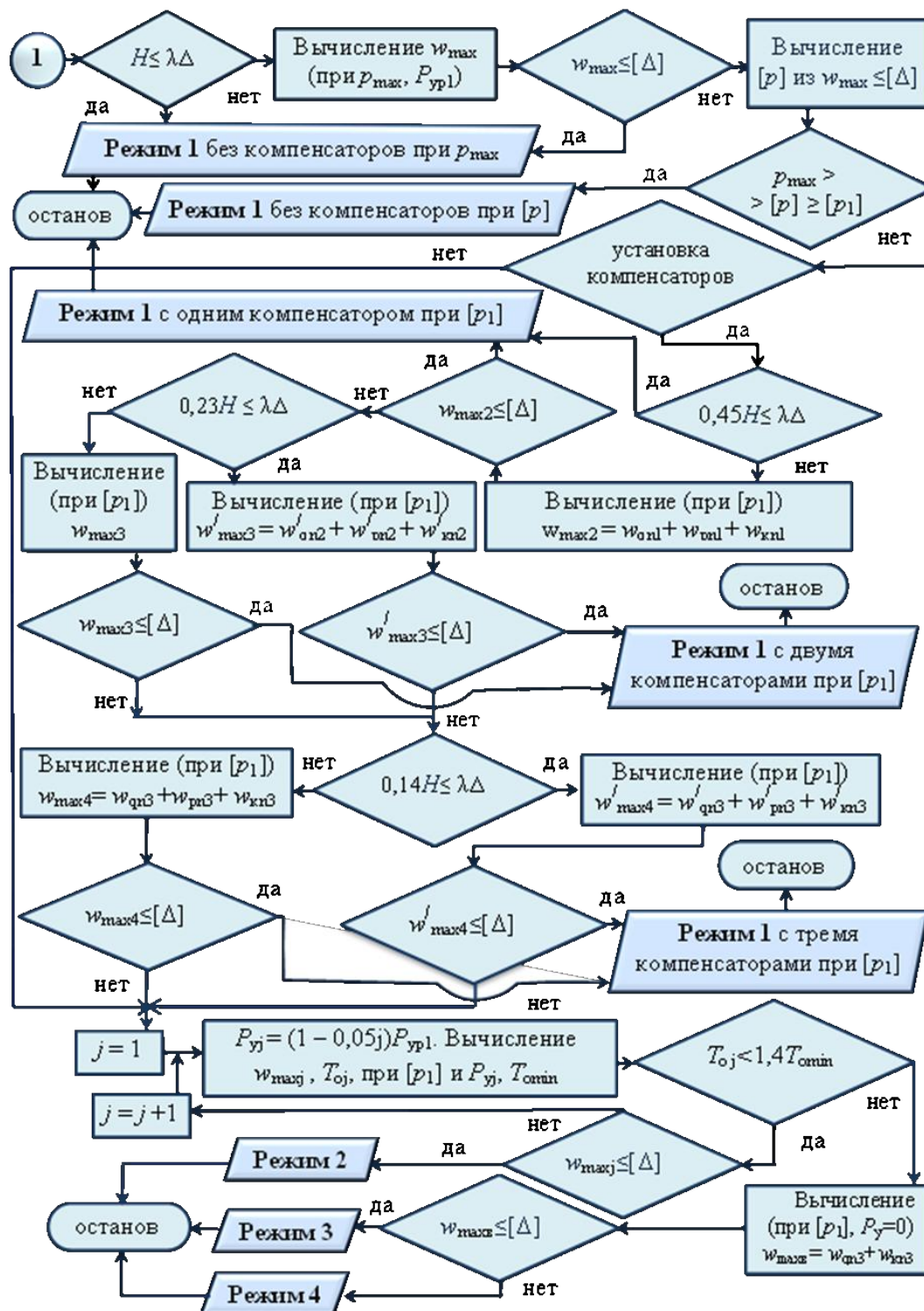


Рис. 2. Блок-схема алгоритма выбора оптимальных условий закрепления и шлифования торцов колец и боковых граней призматических заготовок малой жесткости, обеспечивающих требуемое качество ОП, включая допуск плоскостности (второй этап)

Для определения максимальных прогибов заготовки используется теория изгиба круговых колец малой кривизны и прямых стержней с обычными ограничениями механики деформируемого твердого тела геометрических параметров заготовок. При закреплении заготовки магнитным полем стола станка на нее действует равномерно распределенная нагрузка интенсивностью  $q = q_c + q_m$ , где  $q_c$ ,  $q_m$  – интенсивность равномерно распределенной нагрузки от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка и под действием веса заготовки соответственно.

При шлифовании добавляется радиальная составляющая силы резания  $P_y$  в сечении, координата которого  $x_{\max}$  определяется из условия максимального прогиба кольца малой кривизны или неразрезной балки.

Математическая модель максимальной упругой деформации заготовки при шлифовании имеет вид:

$$w_{\max} = w_{qn} + w_{pn} + w_{kn}, \quad (2)$$

где  $w_{qn}$  и  $w_{pn}$  – составляющие максимального прогиба заготовки под действием соответственно усилия притяжения магнитного поля стола станка, веса заготовки и радиальной составляющей усилия резания в сечении максимального прогиба заготовки;  $w_{kn}$  – контактная деформация, зависящие от числа пролетов  $n$ .

В результате экспериментов установлено, что поверхность заготовки имеет систематические волны макроотклонений. Контактная деформация гладкой поверхности стола и шероховатой волнистой поверхности заготовки складывается из контактных деформаций вследствие деформации микронеровностей и волн. Для вычисления контактных деформаций необходимы экспериментальные данные входного контроля состояния поверхности за-

- при  $k = 1$   $0,45H \leq \lambda\Delta$ ;
- при  $k = 2$   $0,23H \leq \lambda\Delta$ ;
- при  $k = 3$   $0,14H \leq \lambda\Delta$ ;

где  $k$  – число компенсаторов;  $0,45H$ ,  $0,23H$ ,  $0,14H$  – расстояния (зазор) между точками касания поверхностей заготовки и стола станка в сечениях максимальных прогибов с координатами  $x_{\max}$ ;  $w_{\max 2}$ ,  $w_{\max 3}$ ,  $w_{\max 4}$  – максимальные упругие деформации в первом пролете двух-, трех-, четырех пролетной неразрезной балки;  $w'_{\max 3}$ ,  $w'_{\max 4}$  – максимальные упругие дефор-

готовки (шероховатость, волнистость, макроотклонения). На втором этапе оптимизации проверяем отклонение от плоскостности поверхности заготовки  $H$  перед чистовым шлифованием:

$$H \leq \lambda\Delta. \quad (3)$$

В случае выполнения условия (3) шлифование заготовки проводим без компенсаторов в условиях режима 1 при максимальном удельном усилии притяжения магнитного поля стола  $p_{\max}$ , отклонение от плоскостности поверхности в пределах требуемого допуска.

При невыполнении условия (3) начинаем расчет по разработанным математическим моделям, алгоритмам и программам максимальной упругой деформации заготовки, проверяем условие (1). При выполнении условия (1) шлифование заготовки проводим без компенсаторов в условиях *режима 1* при  $p_{\max}$ .

При невыполнении условия (1) уменьшаем величину максимальной упругой деформации заготовки, снижая удельное усилие притяжения магнитного поля стола станка в допустимом интервале:

$$p_{\max} > [p] \geq [p_1], \quad (4)$$

Если этого снижения достаточно для выполнения условия (1), шлифование заготовки проводим без компенсаторов в условиях режима 1 при  $p = [p]$ , определяем из условий (1), (4).

При невыполнении условия (4) уменьшаем величину максимальной упругой деформации заготовки, увеличивая изгибную жесткость заготовки установкой компенсаторов. Рекомендуется устанавливать не более трех компенсаторов, последовательно проверяя выполнение условия обеспечения требуемого допуска плоскостности (5) при установке одного, двух или трех компенсаторов:

$$\begin{aligned} w_{\max 2} &\leq [\Delta]; \\ w_{\max 3} &\leq [\Delta]; & w'_{\max 3} &\leq [\Delta]; \\ w_{\max 4} &\leq [\Delta]; & w'_{\max 4} &\leq [\Delta], \end{aligned} \quad (5)$$

магии в среднем пролете трех-, четырех пролетной неразрезной балки.

При использовании более двух компенсаторов закрытие зазора между поверхностями заготовки и стола станка будет происходить последовательно от первого пролета к среднему, что учтено в алгоритме (см. рис. 2) условиями (5). При выполнении условий (5) последовательно

реализуем оптимальные условия *режима 1* при закреплении заготовки удельным усилием притяжения  $p = [p_1]$  с установкой одного, двух или трех компенсаторов. При невыполнении условий (5) для трех компенсаторов и шлифовании заготовок без компенсаторов проверяем условия реализации *режима 2* – шлифования без выхаживания с закреплением заготовки магнитным полем стола при  $p = [p_1]$  и уменьшением силы  $P_y$  путем соответствующего снижения режимных факторов в области допускаемых значений:

$$w_{\max} \leq [\Delta]; \quad T_0 < 1,4T_{0\min}, \quad (6)$$

где  $T_0$  – основное время шлифования;  $T_{0\min}$  – основное время шлифования при максимальной производительности обработки в *режиме 1*.

При невыполнении условий (6) проверяем выполнение условия обеспечения требуемого допуска плоскостности выхаживанием при отсутствии радиальной подачи:

$$w_{\max B} \leq [\Delta], \quad (7)$$

где  $w_{\max B}$  – максимальные упругие деформации заготовки при выхаживании от действия сил притяжения магнитного поля стола станка и веса заготовки при установке трех компенсаторов и  $p = [p_1]$ .

При выполнении условия (7) реализуем *режим 3* – шлифование с выхаживанием. Условия шлифования соответствуют *режиму 1* при  $p = [p_1]$  с установкой трех компенсаторов. Основное время процесса шлифования с выхаживанием возрастает в среднем на 40 % (см. рис. 2).

При невыполнении условия (7) реализуем условия закрепления и шлифования заготовки, названные *режим 4*. Для обеспечения требуемого допуска плоскостности ОП рекомендуется изменить условия закрепления из-за низкой изгибной жесткости заготовки. Силы закрепления не должны изгибать заготовку. Для закрепления заготовки рекомендуются типовые устройства: кулачковые патроны, тиски или другие универсальные приспособления для базирования и закрепления заготовок по боковым

поверхностям. Условия шлифования соответствуют условиям *режима 1*.

Повышение производительности процесса шлифования заготовок будет обеспечено и для условий *режимов 2, 3, 4* за счет того, что вторая противоположная грань призматической заготовки или торцовая поверхность кольцевой заготовки обрабатывается при установке заготовки на столе станка на обработанную поверхность с требуемым допуском плоскостности и величина зазоров между соприкасающимися поверхностями стола станка и заготовки меньше требуемого допуска плоскостности. Условия закрепления и шлифования этих поверхностей соответствуют условиям *режима 1*, обеспечивающим максимальную производительность процесса шлифования.

### Выводы

Предложена и обоснована методология выбора оптимальных условий закрепления и шлифования торцов заготовок колец малой кривизны и осевой жесткости и боковых граней призматических заготовок малой жесткости с учетом их упругого деформирования, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности при повышении производительности процесса шлифования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Металлорежущие станки : учеб. В 2 т. / Т. М. Авраамова, В. В. Бушуев, Л. Я. Гиловой [и др.] ; под ред. В. В. Бушуева. Т. 1. – М. : Машиностроение, 2011. – 608 с.
2. Акулов, П. А. Обоснование выбора направляющих для автоматизированного испытательного оборудования / П. А. Акулов, Д. И. Петрешин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 3. – С. 1–10.
3. Тышкевич, В. Н. Оптимизация режимов плоского шлифования деталей малой жесткости типа колец и призматических стержней / В. Н. Тышкевич // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 2. – С. 29–37.
4. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Сулова. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
5. Тышкевич, В. Н. Влияние остаточных напряжений на упругие деформации деталей малой жесткости при шлифовании / В. Н. Тышкевич, В. А. Носенко, А. В. Саразов, С. В. Орлов, Е. С. Киселев, А. Н. Унянин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2026. – № 1. – С. 26–34.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 20.02.2026, подписана в печать 24.02.2026

The article was submitted 15.01.2026, revised 20.02.2026, accepted for publication 24.02.2026

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 66:02 (075)  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-46-50

Научная статья  
Original article

*П. П. Залипаев<sup>1</sup>, А. Б. Голованчиков<sup>1</sup>, О. А. Залипаева<sup>1,2</sup>, С. Г. Поступаева<sup>1</sup>*

### РЕГУЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАСАДОЧНОГО СЛОЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОТОННАЖНОГО АБСОРБЕРА

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

<sup>2</sup> Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ, Волжский, Россия

✉ Ольга Александровна Залипаева, zalipaevaolga@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматриваются насадочные абсорберы как сложные объекты управления. Описываются основные регулируемые параметры процесса абсорбции. Приводятся результаты экспериментальных исследований определения гидродинамических характеристик малотоннажного насадочного абсорбера при хаотичной укладке колец Рашига и упорядоченной аксиально-симметричной плотной их укладке. Находятся критические значения расходов взаимодействующих фаз при поглощении газов водой. Предлагается проводить оптимальное регулирование гидравлического сопротивления в малотоннажном колонном аппарате путем оптимизации структуры насадочного слоя.

**Ключевые слова:** насадочный абсорбер, регулируемые технологические параметры, гидравлическое сопротивление, кольца Рашига, структура насадочного слоя

**Для цитирования:** Залипаев П. П., Голованчиков А. Б., Залипаева О. А., Поступаева С. Г. Регулирование структуры насадочного слоя при определении гидродинамических характеристик малотоннажного абсорбера. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 46–50. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-46-50.

#### Информация об авторах:

**Павел Павлович Залипаев** – аспирант, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

orcid.org/ 0009-0000-7736-752X

e-mail: zalipaevpavel@mail.ru

**Александр Борисович Голованчиков** – профессор, д-р техн. наук, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: a.b.golovanchikov@mail.ru

**Ольга Александровна Залипаева** – доцент, канд. техн. наук., кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-9345-2625

e-mail: zalipaevaolga@yandex.ru

**Светлана Геннадиевна Поступаева** – старший преподаватель, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-3752-3062

e-mail: posvetlana@mail.ru

#### Вклад авторов:

**П. П. Залипаев** – проведение экспериментальных исследований и обработка экспериментальных данных.

**А. Б. Голованчиков** – методика проведения экспериментальных исследований.

**О. А. Залипаева** – обработка результатов, редактирование статьи.

**С. Г. Поступаева** – обработка результатов, редактирование статьи.

*P. P. Zalipaev<sup>1</sup>, A. B. Golovanchikov<sup>1</sup>, O. A. Zalipaeva<sup>1,2</sup>, S. G. Postupaeva<sup>1</sup>*

**ADJUSTING THE STRUCTURE OF A PACKED LAYER TO  
DETERMINE THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS  
OF A LOW-CAPACITY ABSORBER**

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University (VSTU), Volgograd, Russia

<sup>2</sup>Volzhsky Polytechnic Institute (branch) VSTU, Volzhsky, Russia

✉ Olga A. Zalipaeva, zalipaevalga@yandex.ru

**Abstract.** Packed absorbers are considered as complex control objects. The main adjustable parameters of the absorption process are described. The results of experimental studies on the hydrodynamic characteristics of a small-tonnage packed absorber are presented. The results are presented for a randomly arranged Raschig ring and an ordered, axially symmetrically arranged, dense arrangement. Critical flow rates of the interacting phases during gas absorption by water are determined. Optimal control of hydraulic resistance in a small-scale column apparatus is proposed by optimizing the packed bed structure.

**Keywords:** packed absorber, adjustable process parameters, hydraulic resistance, Raschig rings, structure packing layer

**For citation:** Zalipaev P. P., Golovanchikov A. B., Zalipaeva O. A., Postupaeva S. G. Adjusting the structure of a packed layer to determine the hydrodynamic characteristics of a low-capacity absorber. *Izvestiya VSTU*. 2026; 3(310): 46–50. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-46-50.

**Information about the authors:**

**Pavel P. Zalipaev** – Postgraduate Student, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

orcid.org/0009-0000-7736-752X

e-mail: zalipaevpavel@mail.ru

**Alexander B. Golovanchikov** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: a.b.golovanchikov@mail.ru

**Olga A. Zalipaeva** – Associate professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

orcid.org/0000-0002-9345-2625

e-mail: zalipaevalga@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

**Contribution of the authors:**

**Pavel P. Zalipaev** – conducting experimental studies and processing experimental data.

**Alexander B. Golovanchikov** – methodology for conducting experimental studies.

**Olga A. Zalipaeva** – processing results, editing the article.

**Svetlana G. Postupaeva** – processing results, editing the article.

**Введение**

Насадочные абсорберы нашли широкое применение в химической промышленности для разделения газовых смесей и получения целевого продукта, в газоперерабатывающем производстве для очистки природного газа от кислых примесей, в пищевой промышленности для сатурации напитков и очистки диффузионного сока в процессе получения сахара, а также в промышленной экологии для очистки отходящих газов.

Целью управления процессом абсорбции является поддержание постоянства заданной концентрации извлекаемого компонента в очищенном газе, а также получение насыщенного абсорбента заданного состава. Абсорберы как

объекты управления являются сложными объектами, для них характерно наличие больших инерционностей с запаздыванием практически по всем каналам регулирования [1]. При использовании многоконтурных систем управления можно улучшить качество регулирования процесса абсорбции, но применение таких систем не всегда экономически обосновано.

Основным регулятором процесса абсорбции является регулятор соотношения расходов газа и абсорбента [1, 2]. Корректировка работы этого регулятора производится по выходной концентрации абсорбата в очищенном газе. Расчет количества абсорбата и другие операции по формированию управляющего сигнала производятся вычислительным устройством. Кроме

контуров регулирования расхода и концентрации в процессе абсорбции предусматривается регулирование температуры абсорбента, уровня жидкости и перепада давления в колонне.

Эффективность работы абсорбционных насадочных аппаратов зависит от гидродинамических параметров процесса абсорбции, среди которых ключевым является перепад давления на входе и выходе системы при движении жидкости и газа [1]. Перепад давления – это диагностическая характеристика процесса абсорбции, напрямую связанная с интенсивностью массопереноса, энергозатратами, и в целом с экономической целесообразностью и безопасностью процесса.

#### Материалы и методы исследования

Перепад давления в колонном аппарате возможно регулировать изменением технологических режимов проведения процесса абсорбции, а также изменением геометрических

характеристик как самого аппарата, так и слоя насадки [2, 3]. На эффективность работы абсорбера влияют такие геометрические характеристики насадки, как высота насадочного слоя, способы укладки и конструктивные особенности элементов насадки [4]. Изменение ориентации элементов насадки дает возможность оптимального регулирования гидродинамического режима работы абсорбера [5].

Проведены экспериментальные исследования по определению перепада давления в малотоннажном колонном абсорбере при регулировании структуры насадочного слоя (рис. 1).

В качестве контактного элемента применялись наиболее распространенные в промышленных насадочных аппаратах кольца Рашига. Кольцами Рашига заполняют рабочий объем колонны для увеличения площади соприкосновения газа и жидкости с целью интенсификации процесса абсорбции [1].

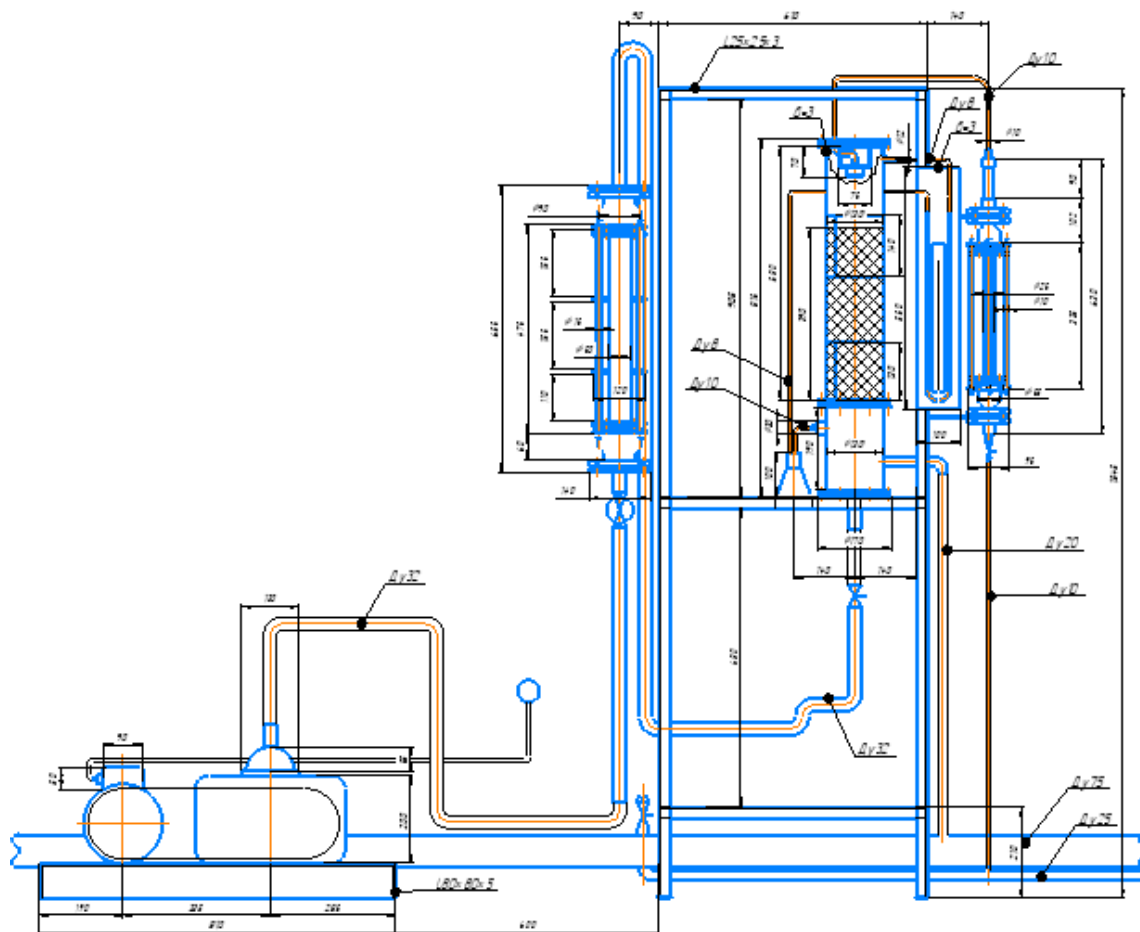


Рис. 1. Экспериментальная лабораторная абсорбционная установка

Исследования проводились при хаотичной укладке насадки (в навал) и при упорядоченной аксиально-симметричной плотной укладке колец

Рашига. На рис. 2 представлены зависимости перепада давления от скорости подаваемого газа (воздуха) при расходе жидкой фазы (воды) 75 л/ч.

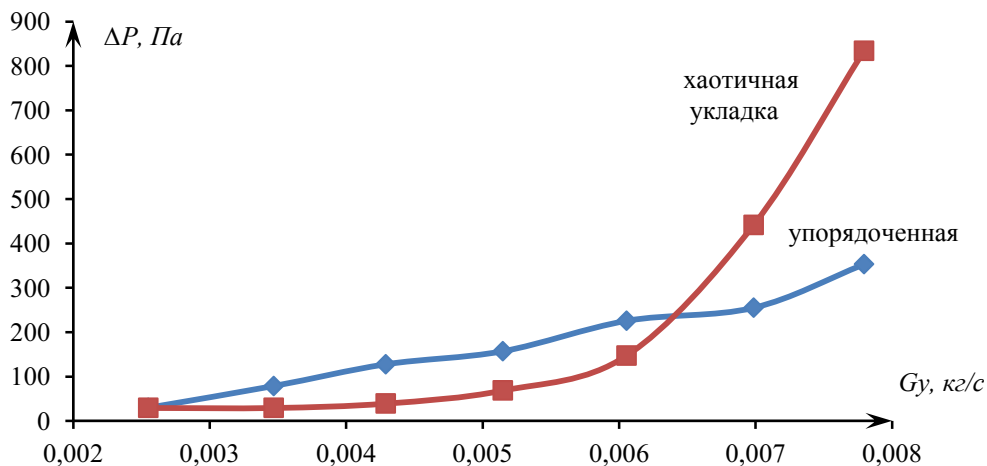


Рис. 2. Зависимость изменения гидравлического сопротивления от расхода газа при расходе жидкой фазы 75 л/ч для упорядоченной и хаотичной укладок колец Рашига

На рис. 3 и 4 представлены эмпирические кривые зависимостей перепада давления от ско-

рости подаваемого газа (воздуха) при увеличении расхода подаваемой в абсорбер жидкой фазы.

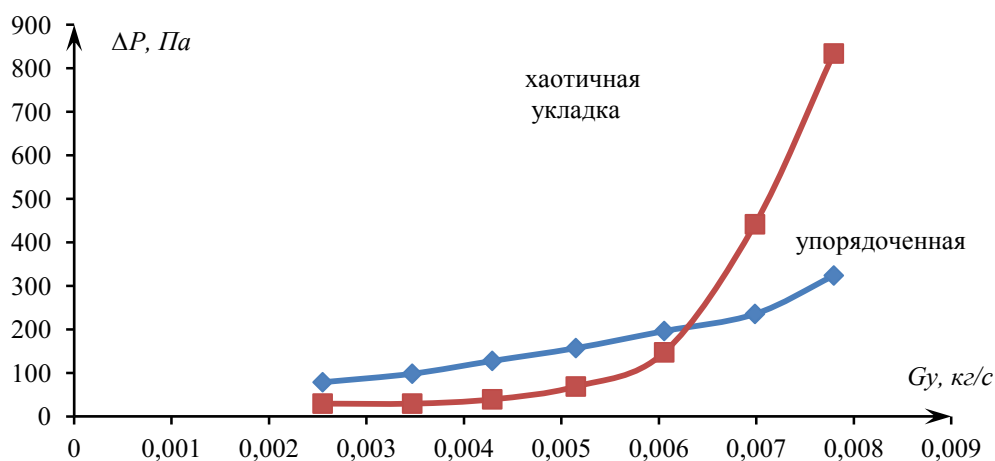


Рис. 3. Зависимость изменения гидравлического сопротивления от расхода газа при расходе жидкой фазы 100 л/ч для упорядоченной и хаотичной укладок колец Рашига

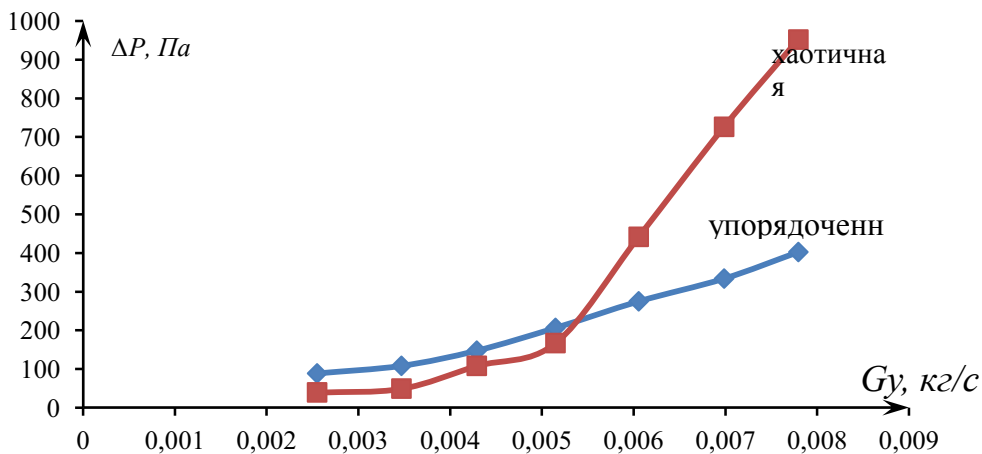


Рис. 4. Зависимость изменения гидравлического сопротивления от расхода газа при расходе жидкой фазы 120 л/ч для упорядоченной и хаотичной укладок колец Рашига

### Результаты исследования и их обсуждение

На полученных экспериментальных зависимостях показано, что увеличение расхода газовой фазы (более 0,0075 кг/с) приводит к превышению значения гидравлического сопротивления уложенных в навал колец Рашига в абсорбционном аппарате в сравнении с упорядоченной аксиально-симметричной плотной их укладкой более чем в два раза. Это объясняется хаотичной укладкой слоя насадки, в котором присутствуют поперечно ориентированные основному потоку газовой фазы кольца Рашига.

При незначительных расходах газа (не более 0,0053 кг/с при подаче жидкости с расходом 120 л/ч и не более 0,00645 кг/с при подаче жидкости с расходом 75 л/ч) гидравлическое сопротивление уложенных в навал колец Рашига в абсорбционном аппарате приводит к уменьшению значения гидравлического сопротивления в сравнении с упорядоченной аксиально-симметричной плотной их укладкой (рис. 2 и 4). Можно предположить, что такая закономерность вызвана нелинейной аксиально-симметричной укладкой колец Рашига, что при малых расходах газа создает турбулентные завихрения в местах стыка элементов насадки, увеличивающие гидравлическое сопротивление. Причем при увеличении расхода жидкой фазы критическое значение равенства гидравлического сопротивления упорядоченной укладки колец Рашига с гидравлическим сопротивлением хаотичной укладки насадки уменьшается. При подаче жидкости с расходом 75 л/ч это критическое значение в проведенном эксперименте достигается при расходе газа 0,0065 кг/с, при расходе жидкости 100 л/ч – расходе газа 0,0063 кг/с, а при увеличении расхода жидкости до 120 л/ч критическое значение равенства расхода газа при упорядоченной и хаотичной укладке колец Рашига снижается до значений расхода газа 0,0053 кг/с. Возможно увеличение расхода жидкой фазы приводит к сглаживанию турбулентных завихрений в ка-

налах аксиально-симметричной плотной укладки колец Рашига.

### Выводы

В автоматической системе управления процесса абсорбции постоянный контроль перепада давления является важной инженерной задачей. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для малотоннажных абсорберов оптимизация гидравлического сопротивления может производиться путем регулирования структуры насадочного слоя, без применения дополнительных каналов внесения регулирующих воздействий. При этом необходимо учитывать технологические параметры процесса абсорбции, приводящие к критическим значениям гидродинамических характеристик насадочного колонного аппарата.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев, А. С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов : справ. пособие / А. С. Клюев [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
2. Шувалов, В. В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности / В. В. Шувалов, Г. А. Огаджанов, В. А. Голубятников. – М. : Химия, 1991. – 468 с.
3. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для студ. вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.
4. Расчет удельной поверхности и порозности насадки массообменной колонны с модифицированными кольцами Рашига / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, Т. Н. Синенко, П. П. Залипаев // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21, № 6. – С. 264–271.
5. Zhil'tsova O. A., Trusov S. A., Tyabin N. V. Determination of disperse-phase parameters for bubbling // Theoretical foundations of chemical engineering. – 1998. – Т. 32. – №. 1. – С. 82–84.
6. П. м. 224892 Российская Федерация, МПК В01J 19/30 Насадка для теплообменных аппаратов / О. А. Залипаева, А. Б. Голованчиков, В. М. Яшук, П. П. Залипаев, Т. Н. Синенко, Ю. В. Богданова ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2024.
7. Niegodajew P., Marek M. Analysis of orientation distribution in numerically generated random packings of Raschig rings in a cylindrical container // Powder Technology. – 2016. – Т. 297. – С. 193–201.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 30.01.2026, подписана в печать 24.02.2026

The article was submitted 15.01.2026, revised 30.01.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 519.876.5, 637.5.03  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-51-53

Научная статья  
Original article

*А. Е. Захаров, М. П. Кухтик*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ЦЕХА МЯСОПЕРЕРАБОТКИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Михаил Петрович Кухтик, m\_kukhtik@vstu.ru

**Аннотация.** Рассмотрен процесс мясопереработки свинины на примере производства стейка. В среде AnyLogic разработана имитационная модель работы цеха по переработке мяса. В процессе исследования модели был выявлен наиболее загруженный этап производства – этап упаковки годного к употреблению мяса.

**Ключевые слова:** мясопереработка; оперативный контроль; имитационная модель; визуализация

**Для цитирования:** Захаров А. Е., Кухтик М. П. Исследование имитационной модели работы цеха мясопереработки. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 51–53. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-51-53.

### Информация об авторах:

**Алексей Евгеньевич Захаров** – студент, кафедра АПП, ВолгГТУ

e-mail: Zaxarov.lesha7@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:

**А. Е. Захаров** – определение цели работы, разработка модели, написание текста статьи.

**М. П. Кухтик** – участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

*A. E. Zakharov, M. P. Kukhtik*

## STUDY OF A SIMULATION MODEL OF A MEAT PROCESSING SHOP

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Mikhail P. Kukhtik, m\_kukhtik@vstu.ru

**Abstract.** The pork meat processing process has been examined using steak production as an example. A simulation model of a meat processing plant has been developed in the AnyLogic environment. During the model analysis, the busiest stage of production – ackaging edible meat – has been identified.

**Keywords:** meat processing; operational control; simulation model; visualization

**For citation:** Zakharov A. E., Kukhtik M. P. Study of a simulation model of a meat processing shop. Izvestiya VSTU. 2026; 3(310): 51–53. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-51-53.

### Information about the authors:

**Aleksei E. Zakharov** – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: Zaxarov.lesha7@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:

**Aleksei E. Zakharov** – defining the purpose of the work, developing a model, writing the text of the article.

**Mikhail P. Kukhtik** – participation in the discussion of results, editing the text of the article.

### Введение

Ключевой проблемой функционирования предприятий промышленной мясопереработки является «закрытость» цикла производства и, как следствие, отсутствие оперативного контроля за соблюдением технологических режимов. Несмотря на известность общей структуры процессов, норм выработки и плановых показате-

телей, на производстве отсутствуют средства мониторинга технологических режимов в реальном времени. Сложность организации такого мониторинга обусловлена несколькими факторами [1].

Первый фактор – неравномерность нагрузки производственной линии. Изготовление продукта включает определенную технологичес-



– *Delay* – создает задержку агента на заданный промежуток времени;

– *Sink (end)* – уничтожает агента, имитирует конец производственного цикла;

Визуализация работы производственной линии мясопереработки показана на рис. 2. В про-

цессе визуализации в среде *AnyLogic* построен график загруженности работников предприятия (рис. 3), на котором линия 1 соответствует упаковке полностью годных продуктов, линия 2 – упаковке продуктов, годных к ЖУ, линия 3 – упаковке полностью негодных продуктов.

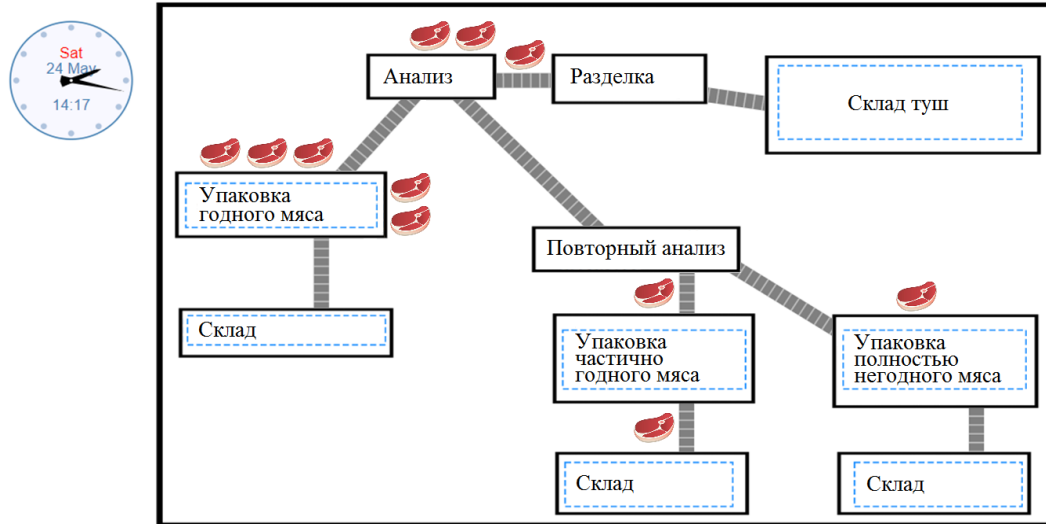


Рис. 2. Визуализация работы производственной линии

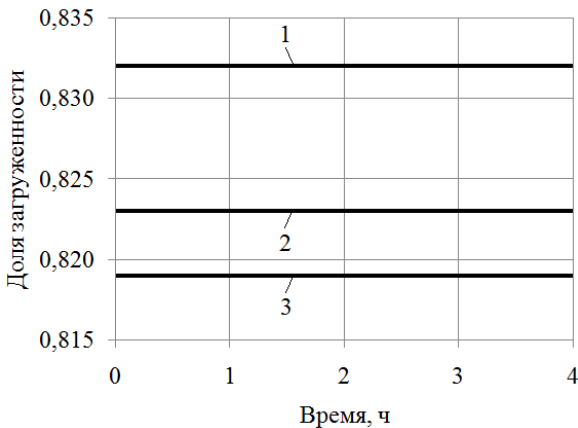


Рис. 3. График загруженности упаковщиков

Из рисунков 2 и 3 следует, что при заданных условиях этап упаковки годного к употреблению мяса является наиболее загруженным и чаще приводящим к простоям, т. е. «узким» местом производства.

**Выводы**

Разработка имитационной модели мясного производства и ее внедрение позволит повысить оперативность управленческих решений за счет координации производственных процес-

сов, синхронизации и согласования стадий цикла работ [1]. Дальнейшее развитие имитационной модели производственного цеха планируется за счет создания частных моделей для других видов работ, повышения объема выводимой статистической информации, описывающей технологические процессы, и улучшения визуализации.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Богомолова, И. П. Обеспечение эффективного развития мясоперерабатывающего предприятия на основе автоматизации хозяйственной деятельности / И. П. Богомолова, И. Н. Василенко, И. Е. Устюгова, Г. Н. Струков, Д. О. Пригородов // Продовольственная политика и безопасность. – 2023. – Т. 10, № 3. – С. 497–516. – DOI: 10.18334/ppib.10.3.118762.
2. Технологии обработки мяса на предприятиях мясопереработки [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://ijiza.ru/information/articles/info/dlya-nachinayushih/tehnologii-obrabotki-myasa-na-predpriyatiyah-myasopererabotki/> (дата обращения 22.01.2026).
3. Трубицына, М. С. Исследование работы автоматической линии контроля герметичности ПЭТ-бутылок / М. С. Трубицына, Д. С. Давыдов, И. М. Шандыбина, М. П. Кухтик // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (303) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 65–67. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-65-67.

УДК 62-229.7  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-54-57

Научная статья  
Original article

*С. А. Кучков, А. Г. Алёхин*

**МОДЕРНИЗАЦИЯ АДДИТИВНОЙ УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ПЕЧАТИ ГУСТЫМИ ПИЩЕВЫМИ СМЕСЯМИ  
ПРИ ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Станислав Андреевич Кучков, stas.kuchkov.03@mail.ru

**Аннотация.** В данной обзорной статье представлен комплексный анализ аддитивных технологий в пищевой промышленности. Выявлены основные особенности аддитивных технологий производства пищевых продуктов. Проведена оценка состояния аддитивной установки, и предложены решения по ее модернизации.

**Ключевые слова:** автоматизация, 3D-печать, 5D-печать, аддитивная установка, пищевые чернила

**Для цитирования:** Кучков С. А., Алёхин А. Г. Модернизация аддитивной установки для печати густыми пищевыми смесями при пониженной температуре. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 54–57. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-54-57.

**Информация об авторах:**

**Станислав Андреевич Кучков** – магистрант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: stas.kuchkov.03@mail.ru

**Алексей Геннадьевич Алёхин** – доцент, канд. техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: alekhin\_edu@mail.ru

**Вклад авторов:**

**С. А. Кучков** – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

**А. Г. Алёхин** – постановка задачи, участие в обсуждении результатов.

*S. A. Kuchkov, A. G. Alyehin*

**MODERNIZATION OF AN ADDITIVE SYSTEM FOR PRINTING  
DENSE FOOD MIXTURES AT LOW TEMPERATURES**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Stanislav A. Kuchkov, stas.kuchkov.03@mail.ru

**Abstract.** This review article presents a comprehensive analysis of additive technologies in the food industry. The main characteristics of additive technologies in food production are identified. An assessment of the state of the additive system has been conducted, and methods for its modernization are proposed.

**Keywords:** automation, 3D-printing, 5D-printing, additive manufacturing machine, food ink

**For citation:** Kuchkov S. A., Alyekhin A. G. Modernization of an additive system for printing dense food mixtures at low temperatures. Izvestiya VSTU. 2026; 3(310): 54–57. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-54-57.

**Information about the authors:**

**Stanislav A. Kuchkov** – Master's student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: stas.kuchkov.03@mail.ru

**Alexey G. Alekhin** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: alekhin\_edu@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Stanislav A. Kuchkov** – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

**Alexey G. Alekhin** – formulation of the problem, participated in the discussion of the results.

**Введение**

Трёхмерная печать пищевых продуктов на данный момент является одной из динамично растущих технологий. Сама технология заклю-

чается в создании съедобных биообъектов путем послойного наложения разнообразных пищевых компонентов (чернил) по траекториям, разработанным цифровым способом, и в резуль-

тате затвердевающих в трехмерные структуры. Важные параметры, необходимые для успешной печати, включают температуру, скорость экструзии, высоту сопла, диаметр сопла, скорость перемещения экструдера и программное обеспечение для резки. После печати изделия некоторые виды изделий иногда требуют дополнительной обработки (запекание, жарка, приготовление на пару, тушение на пару и т. д.) [1].

Применение данного подхода позволяет оптимизировать управление пищевыми процессами, индивидуализировать питание и повысить эффективность производства продуктов.

#### **Технологии печати**

Выделяют три типа технологии 3D-печати пищевых продуктов: печать на основе экструзии, печать на порошковой основе и струйную печать.

Наиболее распространенной технологией печати пищевых продуктов является экструзионная печать. Процесс экструзии заключается в подаче пищевых чернил в сопло. Для обеспечения точности его параметры контролируются цифровым способом. Существует четыре механизма: шприц, шнековый, основанный на сжатии воздуха, и шестеренчатый. Экструзионная печать имеет свои преимущества и недостатки [2].

К преимуществам относятся: простая регулировка скорости экструзии; простота разработки; широкий ассортимент печатной продукции; высокая повторяемость даже при работе со сложными формами; низкие затраты на техническое обслуживание; компактный размер.

Недостатками являются длительное время изготовления, анизотропия, склонность к деформации и перекосам, а также низкий уровень точности. Эти недостатки можно устранить, изменив параметры печати и свойства материала.

#### **Особенности аддитивных технологий в пищевой промышленности**

Ключевым параметром, который и определяет возможность биоматериала печататься и держать форму, в технологии 3D-печати является пригодность. Это говорит о том, что на производительность 3D-печати и качественные характеристики печатных объектов влияют параметры печати и свойства биочернил.

Реологические свойства материала имеют фундаментальное значение для успешной обработки и печати пищевых продуктов. Кроме того, физико-химические свойства (например, влагоудерживающая способность, емкость, синергизм), реологические свойства и состав характе-

ристики предварительно приготовленных пищевых чернил изменяются в течение хранения.

Вопросы безопасности пищевых продуктов, изготовленных на 3D-принтере, охватывают несколько этапов, включая предварительную обработку, процесс печати и последующую обработку. Во время предварительной обработки сырья подготовка ингредиентов включает такие процессы, как измельчение, смешивание, и составление рецептур, которые подвержены микробиологическому загрязнению. Особенно когда при приготовлении биоактивных ингредиентов важно строго контролировать температуру и влажность для предотвращения роста патогенных бактерий. Кроме того, печатные материалы подвержены риску микробиологического загрязнения при контакте с экструзионными поршнями принтера и трубопроводами или при контакте с воздухом. Это требует строгого контроля за подготовкой и среды хранения сырья. Во-вторых, из-за сложной структуры 3D-принтеров, которые включают такие компоненты, как сопла, трубки для подачи материала и подающие трубопроводы, часто являются трудно очищаемыми участками, которые обычные методы дезинфекции могут не покрывать полностью, создавая потенциальную среду для размножения микроорганизмов [3].

Применение 3D-печати для печати густыми пищевыми смесями, такими как мясные материалы, на данный момент имеет ряд проблем, на решения которых отводится неуклонно расширяющийся объем исследований.

Мясные материалы в чистом виде не пригодны для печати из-за сложных реологических свойств. Поэтому проводится предварительная обработка, которая улучшает их гелеобразные и реологические свойства, являющиеся важнейшим условием для получения требуемого результата.

Не менее важным значится процесс обработки готового продукта из мясного материала после 3D-печати, так как мясные продукты требуют соответствующего нагрева или приготовления перед употреблением.

#### **Обзор аддитивной установки и методы ее модернизации**

Для печати пищевыми чернилами будет применен 5D-принтер Stereotech 530 Hybrid (рис. 1).

5D-принтер Stereotech 530 Hybrid находится в нерабочем состоянии, т.к. выявлено отсутствие подключенных комплектующих к принтеру. К данным комплектующим относятся: на-

гревательная платформа для печати в 3D-режиме (имеется в наличии, но нет подключения); концевик (отсутствует крепление к принтеру); печатающая головка (имеется в наличии, но нет подключения) [4].

Печатающая головка (рис. 2) состоит из корпуса, в котором находятся две пластмассовые шестерни, выполняющие функцию продавливания материала из цилиндрической емкости в сопло.

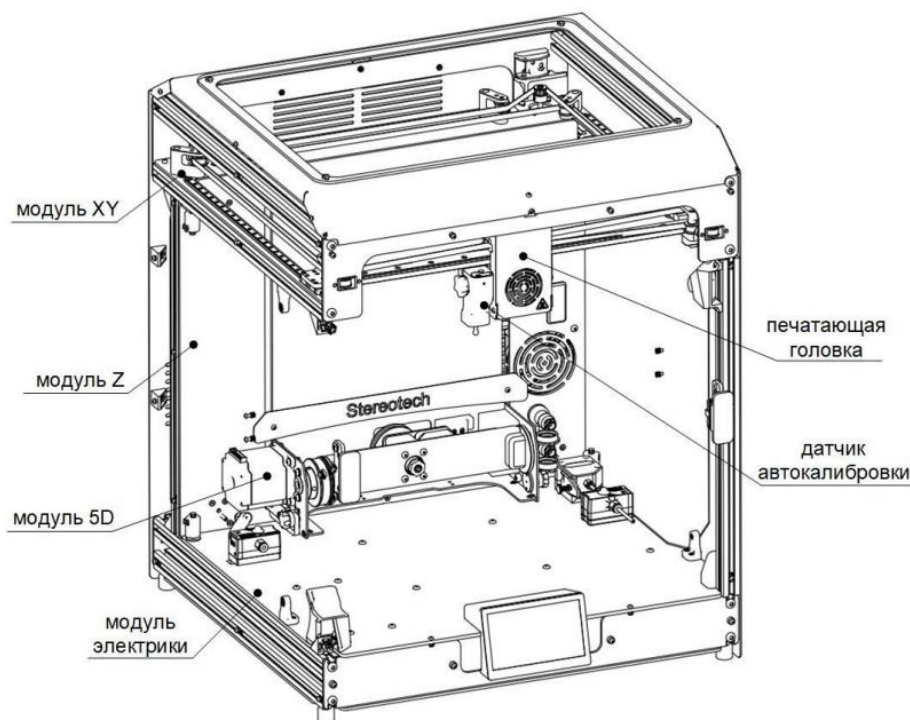


Рис. 1. Общий вид 5D-принтера Stereotech 530 Hybrid

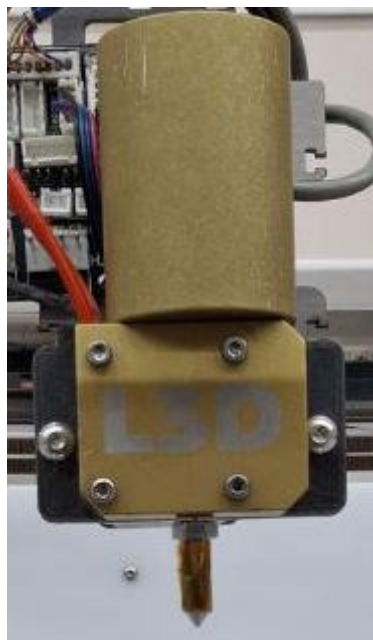


Рис. 2. Печатающая головка

Для подготовки принтера к печати пищевыми смесями предлагаются следующие решения.

Концевик имеют важную роль для работы принтера, т.к. предотвращает выход подвижных частей устройства за пределы допустимых границ. Поэтому для его монтажа в принтер требуется спроектировать крепление в системе САПР, например «Компас-3D», и последующей печатью на 3D-принтере, работающем с пластиком.

Шестерни в корпусе печатающей головки сделаны из пластмассы, что не приемлемо при работе с пищевыми продуктами, так как высок риск микробиологического загрязнения при контакте.

Для решения предлагается заменить данные шестерни на аналоги, изготовленные из специальной «пищевой» нержавеющей стали.

Так как процесс печати густыми пищевыми смесями подразумевает при пониженной температуре, где не требуется нагреватель, имеет место добавить двигатель и механизм к цилиндрической емкости для эффективного проталкивания биоматериала к соплу. Функция механизма заключается в процессе перемешивания и продавливания биоматериала.

**Выводы**

В результате работы авторами проведен анализ аддитивных технологий в пищевой промышленности и выявлены их основные особенности, а также проблемы, которые решаются в настоящее время.

Также была проведена оценка состояния аддитивной установки, которая показала, что установка не готова к применению для поставленной задачи, поэтому были предложены решения для ее модернизации.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Kornienko V.Y., Minaev M.Y. TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF 3D FOOD PRINTING. *Food systems*. 2022;5(1):23-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-1-23-29>.
2. Neamah HA, Tandio J. Towards the development of foods 3D printer: Trends and technologies for foods printing. *Heliyon*. 2024 Jun 29;10(13):e33882. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e33882. PMID: 39050479; PMCID: PMC11268349.
3. XiaoS, YangJ, BiY, LiY, CaoY, ZhouM, PangG, DongX, TongQ. Food 3DPrintingEquipmentandInnovation: Precision MeetsEdibility. *Foods*. 2025 Jun 11;14(12):2066. doi: 10.3390/foods14122066. PMID: 40565674; PMCID: PMC12191706.
4. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] : Stereotech. – URL: <https://wiki.stereotech.org/ru/HTE530V5-2> (дата обращения: 10.02.26).

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 13.02.2026, подписана в печать 24.02.2026  
The article was submitted 15.01.2026, revised 13.02.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-57-60

Научная статья  
Original article

**Е. А. Макарова, Ю. В. Васильева, В. Г. Барабанов, В. А. Зуева**  
**РАЗРАБОТКА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА АСУ**  
**ГАЗОПОРШНЕВОЙ УСТАНОВКИ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Елизавета Александровна Макарова, [m.lipka2015@yandex.ru](mailto:m.lipka2015@yandex.ru)

**Аннотация.** При эксплуатации газопоршневых установок в составе систем децентрализованной выработки электроэнергии с заданными параметрами качества возникает необходимость обеспечения своевременного охлаждения агрегатов. Для обеспечения отвода теплоты и повышения энергоэффективности исследуемой установки проведена модернизация автоматизированной системы охлаждения. Предложены алгоритмы работы агрегатов в автоматическом и ручном режимах. Разработаны экраны для сенсорной панели оператора. Описанные решения позволяют повысить надежность работы системы охлаждения установки.

**Ключевые слова:** газопоршневая установка, сенсорная панель оператора, алгоритм управления, энергоэффективность

**Для цитирования:** Макарова Е. А., Васильева Ю. В., Барабанов В. Г., Зуева В. А. Разработка пользовательского интерфейса АСУ газопоршневой установки. *Известия ВолгГТУ*. 2026; 3(310): 57–60. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-57-60.

**Информация об авторах:**

**Елизавета Александровна Макарова** – магистр, кафедра АПП, ВолгГТУ

e-mail: [m.lipka2015@yandex.ru](mailto:m.lipka2015@yandex.ru)

**Юлия Витальевна Васильева** – магистр, кафедра АПП, ВолгГТУ

e-mail: [vasileva\\_vu@mail.ru](mailto:vasileva_vu@mail.ru)

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

orcid.org/0009-0007-0465-0923

e-mail: [vbarabanov@vstu.ru](mailto:vbarabanov@vstu.ru)

**Виктория Александровна Зуева** – студент, кафедра АПП, ВолгГТУ

e-mail: [vikki.04@bk.ru](mailto:vikki.04@bk.ru)

**Вклад авторов:**

**Е. А. Макарова** – разработка алгоритмов режимов управления.

**Ю. В. Васильева** – описание требований, разработка экранов сенсорной панели оператора.

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

**В. А. Зуева** – написание текста статьи.

*E. A. Makarova, Yu. V. Vasilyeva, V. G. Barabanov, V. A. Zueva*

**DEVELOPMENT OF THE USER INTERFACE  
OF THE GAS PISTON CONTROL SYSTEM**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Elizaveta A. Makarova, m.lipka2015@yandex.ru

**Abstract.** When operating gas piston units as part of decentralized power generation systems with specified quality parameters, it becomes necessary to ensure timely cooling of the units. To ensure heat dissipation and increase the energy efficiency of the investigated installation, the automated cooling system was upgraded. Algorithms for the operation of units in automatic and manual modes are proposed. Screens for the operator's touch panel have been developed. The described solutions make it possible to increase the reliability of the cooling system of the installation.

**Keywords:** gas piston unit, operator's touch panel, control algorithm, energy efficiency

**For citation:** Makarova E. A., Vasilyeva Yu. V., Barabanov V. G., Zueva V. A. Development of the user interface of the gas piston control system. *Izvestiya VSTU*. 2026; 3(310): 57–60. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-57-60.

**Information about the authors:**

**Elizaveta A. Makarova** – Magister, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: m.lipka2015@yandex.ru

**Yulia V. Vasilyeva** – Magister, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: vasilyeva\_vu@mail.ru

**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

**Victoria A. Zueva** – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: vikki.04@bk.ru

**Contribution of the authors:**

**Elizaveta A. Makarova** – developing algorithms for control modes.

**Yulia V. Vasilyeva** – description of requirements, development of operator touch panel screens.

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

**Victoria A. Zueva** – writing the text of the article.

**Введение**

Газопоршневые установки (ГПУ) получили широкое применение в системах децентрализованной выработки электроэнергии с заданными параметрами качества за счет своей экономичности, быстрой окупаемости и высокого коэффициента полезного действия (КПД). Эксплуатация агрегатов данного типа связана с рядом сложностей, возникающих по причине необходимости отвода от контура большого количества выделяемой теплоты [1].

Для предотвращения перегрева установки и повышения энергоэффективности работы системы в целом предложено провести модернизацию АСУ охлаждением ГПУ [2, 3]. Для этого необходимо разработать алгоритмы функционирования системы и обозначить требования к функциональности отдельных ее элементов.

**Разработка технологических алгоритмов управления**

*Автоматический режим управления системой*

Для эксплуатации системы в автоматическом режиме оператору необходимо задать необходимые уставки температуры и времени.

При поступлении сигнала о запуске система охлаждения переходит в автоматический режим и начинает функционирование. В этом случае производится охлаждение внутреннего контура ГПУ и контура охлаждения газовой смеси посредством циркуляции охлаждающей жидкости через драйкулеры с вентиляторами, которая осуществляется насосами.

Вентиляторы внутреннего контура имеют четыре ступени включения и работают попарно в зависимости от значения температуры на входе в установку. Насос включается при получении сигнала о включении агрегата в работу. Трехходовый клапан направляет жидкость по малому кругу или пропускает на охлаждение через драйкулеры.

Аналогичным образом работают вентиляторы контура охлаждения газовой смеси. Они имеют три ступени включения и работают по одному в зависимости от значения температуры на входе, при этом насос включается при получении сигнала о работе ГПУ. Трехходовый клапан направляет жидкость по малому кругу или подает ее на охлаждение через драйкулеры.

В целях избегания статического перегрева агрегата рекомендуется осуществлять охлаждение и после останова системы. Тогда насос и вентиляторы продолжают работу в течение заданного времени после останова ГПУ. При этом время работы системы охлаждения после останова и число работающих вентиляторов задается оператором в настройках.

При работе установки в автоматическом режиме доступно управление функциями съема тепла и подогрева. Функция «Съем тепла с ГПУ» представляет собой возможность использования тепла, вырабатываемого при работе агрегата, для нагрева теплоносителя в системе горячего водоснабжения (ГВС) до задаваемого оператором значения температуры. Функция «Подогрев ГПУ» представляет собой подготовку системы к запуску путем поддержания во внутреннем контуре рабочей температуры.

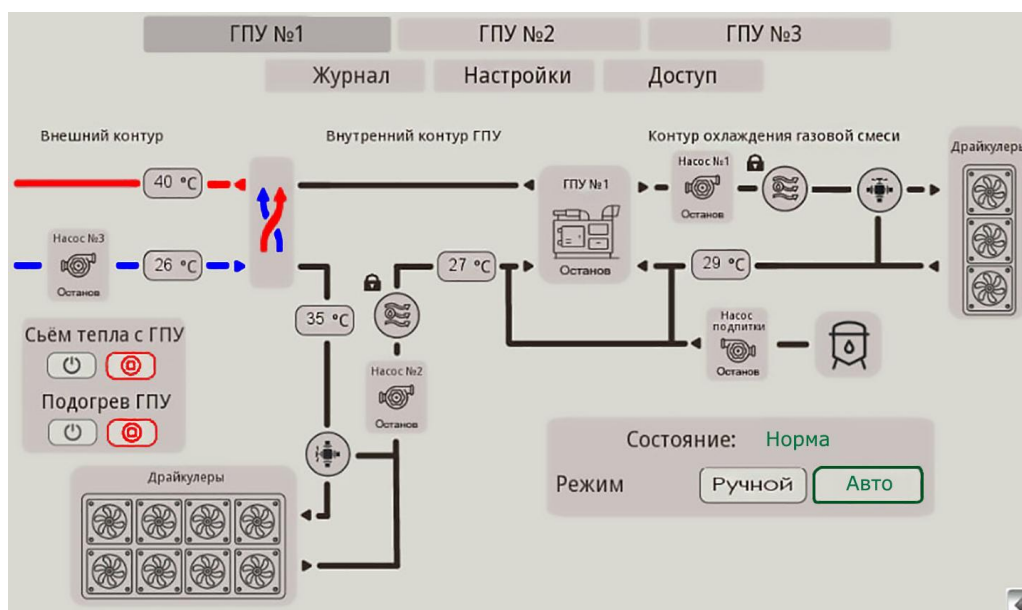
*Ручной режим управления системой*

Ручной режим предназначен для проверки

работы исполнительных механизмов и не обеспечивает защитных функций. Он позволяет управлять насосами, вентиляторами, драйкулерами, задвижками, воздушными заслонками и т. д.

#### Разработка пользовательского интерфейса

Предложенный пользовательский интерфейс предназначен для осуществления мониторинга системы оператором и возможности быстрого доступа к органам управления. Элементы экранов могут быть пассивными, т. е. выполняющими только отображение информации, или активными. Нажатие оператором на активный элемент должно приводить к выполнению определенного действия. Для ввода оператором значений числовых технологических параметров предусматриваются специальные поля ввода. Основной экран разработанного пользовательского интерфейса представлен на рисунке.



Основной экран

Функции сенсорной панели оператора:

- обмен данными с программируемым логическим контроллером (ПЛК);
- представление информации в виде графических мнемосхем;
- технологическая сигнализация;
- архивирование информации, событий и действий оператора;
- управление режимами работы технологического оборудования.

При запуске системы управления панель оператора устанавливает связь с контроллером

и производит цикл приема данных и передачи команд управления. Полученная информация отображается на сенсорном экране, после чего оператор, при необходимости, формирует управляющее воздействие на технологическое оборудование.

Цвет элементов индикации сигнализирует о состоянии датчиков и исполнительных механизмов в каждый момент времени:

- серый – останов;
- зеленый – работа;
- красный – авария.

## Выводы

Авторами предложены алгоритмы автоматического и ручного режимов работы управления автоматизированной системой охлаждения ГПУ. Разработанный пользовательский интерфейс позволяет обеспечить наглядный мониторинг ключевых параметров ГПУ, оперативное управление и своевременное оповещение оператора о нарушениях технологического режима, что повышает безопасность и эффективность эксплуатации установок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Копосов, А. И.* Энергоэффективность когенерационных и тригенерационных установок на базе газопоршневых двигателей / А. И. Копосов // Энергетика и промышленность России. – 2023. – № 12. – С. 25–30.
2. Когенерация и тригенерация: эффективное энергообеспечение с использованием газа // «Aggreko Евразия»: офиц. сайт. – URL: <https://aggreko-eurasia.ru/about/news/kogeneratsiya-i-trigeneratsiya/> (дата обращения: 19.12.2025).
3. Когенерационные и тригенерационные установки: преимущества, применение, оборудование // «ООО Энпауэр»: офиц. сайт. – URL: <https://enpowertech.ru/blog/kogeneratsiya-i-trigeneratsiya/> (дата обращения: 19.12.2025).

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 30.01.2026, подписана в печать 24.02.2026  
The article was submitted 15.01.2026, revised 30.01.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 001.51:621-023  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-60-64

Научная статья  
Original article

*С. Г. Поступаева, А. А. Яковлев, А. Ю. Дуденков, В. А. Зуева*

**ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА  
ДЕЙСТВИЯ ПАРОЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Светлана Геннадиевна Поступаева, [posvetlana@mail.ru](mailto:posvetlana@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается методика построения модели физического принципа действия пароэжекторной холодильной установки. Исследование мотивировано потребностью современных производств в энергоэффективных решениях, интегрированных в единые системы автоматизации. Результаты работы могут быть использованы при проектировании автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на промышленных предприятиях.

**Ключевые слова:** система охлаждения, модель физического принципа действия, поисковое конструирование

**Для цитирования:** Поступаева С. Г., Яковлев А. А., Дуденков А. Ю., Зуева В. А. Построение модели физического принципа действия пароэжекторной холодильной установки. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 60–64. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-60-64.

**Информация об авторах:**

**Светлана Геннадиевна Поступаева** – старший преподаватель, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ  
[orcid.org/0000-0002-3752-3062](https://orcid.org/0000-0002-3752-3062)  
e-mail: [posvetlana@mail.ru](mailto:posvetlana@mail.ru)

**Алексей Андреевич Яковлев** – профессор, д-р техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ  
[orcid.org/0000-0003-0861-9003](https://orcid.org/0000-0003-0861-9003)  
e-mail: [yaa\\_777@mail.ru](mailto:yaa_777@mail.ru)

**Антон Юрьевич Дуденков** – магистр, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ  
e-mail: [toshalnet@yandex.ru](mailto:toshalnet@yandex.ru)

**Виктория Александровна Зуева** – студент, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ  
e-mail: [vikki.04@bk.ru](mailto:vikki.04@bk.ru)

**Вклад авторов:**

**С. Г. Поступаева** – разработка и анализ модели ФПД пароэжекторной холодильной установки, написание текста статьи.

**А. А. Яковлев** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

**А. Ю. Дуденков** – разработка модели ФПД пароэжекторной холодильной установки, написание текста статьи.

**В. А. Зуева** – обзор и анализ существующих методов синтеза технических решений, графическое построение модели ФПД пароэжекторной холодильной установки.

*S. G. Postupaeva, A. A. Yakovlev, A. Yu. Dudenkov, V. A. Zueva*

**CONSTRUCTING A MODEL OF THE PHYSICAL PRINCIPLE  
OF OPERATION OF A STEAM-JET REFRIGERATION UNIT**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Svetlana G. Postupaeva, posvetlana@mail.ru

**Abstract.** This article presents a methodology for developing a model of the physical operating principle of a steam-ejector refrigeration system. The research is motivated by the growing demand of modern industrial facilities for energy-efficient solutions that can be integrated into unified automation systems. The findings of this study can be applied in the design of industrial process control systems (IPCS) for enterprises.

**Keywords:** cooling system, model of the physical principle of operation, exploratory design

**For citation:** Postupaeva S. G., Yakovlev A. A., Dudenkov A. Yu., Zueva V. A. Constructing a model of the physical principle of operation of a steam-jet refrigeration unit. *Izvestiya VSTU*. 2026; 3(310): 60–64. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-3-310-60-64.

**Information about the authors:**

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

orcid.org/0000-0002-3752-3062

e-mail: posvetlana@mail.ru

**Alexey A. Yakovlev** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0003-0861-9003

e-mail: yaa\_777@mail.ru

**Anton Yu. Dudenkov** – Master's student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: toshalnet@yandex.ru

**Victoria A. Zueva** – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: vikki.04@bk.ru

**Contribution of the authors:**

**Svetlana G. Postupaeva** – development and analysis of the FPD model of a steam-jet refrigeration unit, wrote the article.

**Alexey A. Yakovlev** – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

**Anton Yu. Dudenkov** – development of the FPD model of a steam-jet refrigeration unit, wrote the article.

**Victoria A. Zueva** – review and analysis of existing methods for synthesizing technical solutions, graphical construction of the FPD model of a steam-jet refrigeration unit.

**Введение**

Современная автоматизация невозможна без адекватной математической или физической модели объекта управления. Именно точная модель принципа действия установки становится фундаментом для разработки алгоритмов адаптивного управления, создания цифровых двойников и реализации предиктивной аналитики. Она позволяет системе автоматизации не просто реагировать на аварии, но и прогнозировать режимы работы, оптимизируя режимы работы без вмешательства оператора.

**Материалы и методы исследования**

Для разработки автоматизированных объектов и систем наиболее востребованным является инженерно-физический метод поискового конструирования [1]. Этот метод базируется на модели ФПД, представляющей собой ориентированный граф, у которого вершины – это физические объекты, а ребрами является преобразование входных и выходных потоков веществ,

энергии между этими объектами [2]. Данная модель с достаточной степенью адекватности способна показать физический принцип действия анализируемого класса устройств. В ней выявляется семантическая нагрузка на вершины и дуги графа ФПД, передвижение рабочего тела в пространстве и времени.

**Моделирование физических принципов действия систем охлаждения**

В качестве примера рассмотрим парозжекторную холодильную установку. Ее принципиальная схема представлена на рис. 1, а разработанная для нее графическая модель ФПД изображена на рис. 2.

Парозжекторные холодильные установки, работающие по замкнутой схеме, благодаря простоте устройства и безвредности рабочего агента (водяной пар) получили широкое применение в системах кондиционирования воздуха, а также для охлаждения технологической воды и растворов на промышленных предприятиях.

Алгоритм разработки модели ФПД следующий: в устройстве охлаждения выделяют подсистемы в зависимости от типа рабочего тела и функциональные модули согласно конст-

руктивным признакам, находят характерные точки устройства, виды взаимодействия между ними и их последовательность, очередность прохождения их рабочим телом.

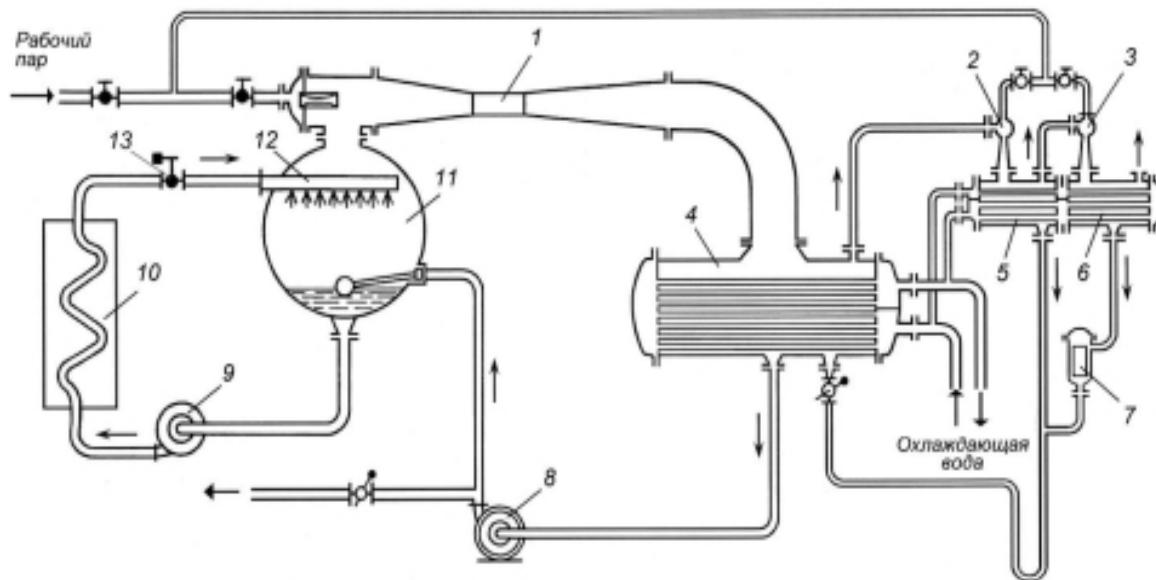


Рис. 1. Пароэжекторная холодильная установка:

1 – главный эжектор; 2, 3 – вспомогательные эжекторы нижней и верхней ступеней; 4 – главный конденсатор; 5, 6 – вспомогательные конденсаторы нижней и верхней ступеней; 7 – поплавковый вентиль; 8 – конденсатный насос; 9 – холодноводный насос; 10 – потребитель холода; 11 – испаритель; 12 – распределительная гребенка; 13 – дроссельный вентиль

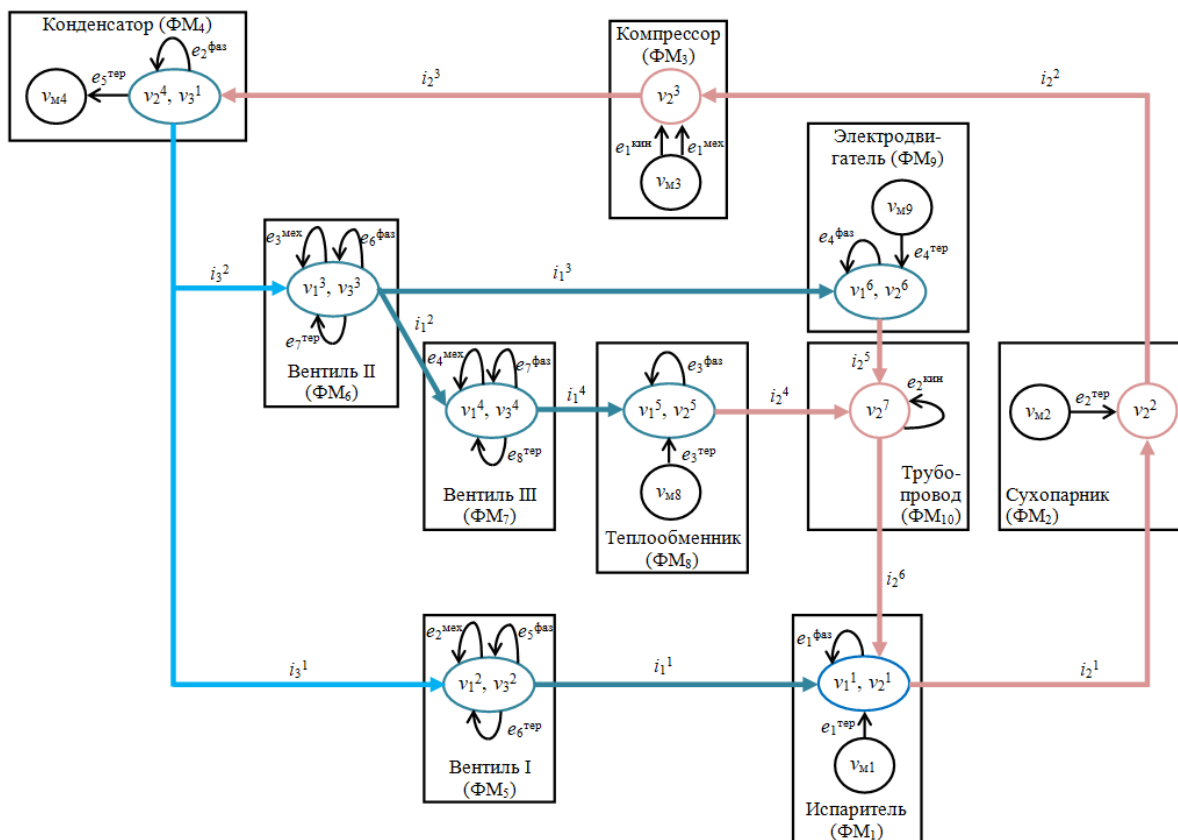


Рис. 2. Графическая модель ФПД пароэжекторной холодильной установки

## Описание элементов модели ФПД

Обозначение элемента	Тип элемента	Семантическое описание
$\Phi M_1$	Функциональный модуль	Испаритель
$\Phi M_2$	То же	Сухопарник
$\Phi M_3$	-//-	Компрессор
$\Phi M_4$	-//-	Конденсатор
$\Phi M_5$	-//-	Регулирующий вентиль I
$\Phi M_6$	-//-	Регулирующий вентиль II
$\Phi M_7$	-//-	Регулирующий вентиль III
$\Phi M_8$	-//-	Теплообменник
$\Phi M_9$	-//-	Электродвигатель
$\Phi M_{10}$	-//-	Система трубопроводов
$v_1^1, v_2^1$	Характерная точка	Хладагент в виде пара и жидкости в испарителе
$v_2^2$	То же	Парообразный хладагент в сухопарнике
$v_2^3$	-//-	Хладагент в рабочей камере радиального компрессора
$v_2^4, v_3^1$	-//-	Хладагент в виде пара и жидкости в конденсаторе
$v_1^2, v_3^2$	-//-	Хладагент в виде пара и жидкости в регулирующем вентиле I
$v_1^3, v_3^3$	-//-	Хладагент в виде пара и жидкости в регулирующем вентиле II
$v_1^4, v_3^4$	-//-	Хладагент в виде пара и жидкости в регулирующем вентиле III
$v_1^5, v_2^5$	-//-	Хладагент в виде пара и жидкости в масляном теплообменнике
$v_1^6, v_2^6$	-//-	Хладагент в виде пара и жидкости в кожухе электродвигателя
$v_2^7$	-//-	Парообразный хладагент в соединении трубопроводов
$v_{m1}$	-//-	Стенки испарителя
$v_{m2}$	-//-	Регенератор
$v_{m3}$	-//-	Рабочее колесо компрессора
$v_{m4}$	-//-	Стенки конденсатора
$v_{m8}$	-//-	Трубки системы смазки
$v_{m9}$	-//-	Ротор электродвигателя
$i_1^1$	Маршрутная дуга	Поток хладагента в виде пара и жидкости из регулирующего вентиля I в испаритель
$i_1^2$	То же	Поток хладагента в виде пара и жидкости в регулирующий вентиль III
$i_1^3$	-//-	Поток хладагента в виде пара и жидкости в кожух электродвигателя
$i_1^4$	-//-	Поток хладагента в виде пара и жидкости в масляной теплообменник
$i_2^1$	-//-	Поток газообразного хладагента в сухопарник
$i_2^2$	-//-	Поток газообразного хладагента в рабочую камеру радиального компрессора
$i_2^3$	-//-	Поток сжатого газообразного хладагента в конденсатор
$i_2^4$	-//-	Поток газообразного хладагента из масляного теплообменника в соединение трубопроводов
$i_2^5$	-//-	Поток газообразного хладагента из кожуха электродвигателя в соединение трубопроводов
$i_2^6$	-//-	Поток газообразного хладагента из соединения трубопроводов в испаритель
$i_3^1$	-//-	Поток жидкого хладагента в регулирующий вентиль I
$i_3^2$	-//-	Поток жидкого хладагента в регулирующий вентиль II
$e_{1\text{ мех}}$	Взаимодействие	Процесс сжатия парообразного хладагента
$e_{2\text{ мех}}$	То же	Процесс дросселирования в регулирующем вентиле I сопровождающийся понижением давления хладагента

Окончание таблицы

Обозначение элемента	Тип элемента	Семантическое описание
$e_3^{\text{мех}}$	--/	Процесс дросселирования в регулирующем вентиле II сопровождающийся понижением давления хладагента
$e_4^{\text{мех}}$	--/	Процесс дросселирования в регулирующем вентиле III сопровождающийся понижением давления хладагента
$e_1^{\text{кин}}$	--/	Процесс нагнетания парообразного хладагента
$e_2^{\text{кин}}$	--/	Процесс передачи кинетической энергии рабочей среды (поток хладагента из кожуха электродвигателя) подсосываемой среде
$e_1^{\text{фаз}}$	--/	Процесс кипения хладагента в испарителе
$e_2^{\text{фаз}}$	--/	Процесс конденсации хладагента в конденсаторе
$e_3^{\text{фаз}}$	--/	Процесс кипения хладагента в масляном теплообменнике
$e_4^{\text{фаз}}$	--/	Процесс кипения хладагента в кожухе электродвигателя
$e_5^{\text{фаз}}$	--/	Процесс частичного кипения хладагента в регулирующем вентиле I
$e_6^{\text{фаз}}$	--/	Процесс частичного кипения хладагента в регулирующем вентиле II
$e_7^{\text{фаз}}$	--/	Процесс частичного кипения хладагента в регулирующем вентиле III
$e_1^{\text{тер}}$	--/	Процесс передачи теплоты от охлаждаемой жидкости хладагенту
$e_2^{\text{тер}}$	--/	Процесс подвода тепла пару (хладагенту) в сухопарнике от регенератора
$e_3^{\text{тер}}$	--/	Процесс передачи теплоты от охлаждаемого масла хладагенту в масляном теплообменнике
$e_4^{\text{тер}}$	--/	Процесс передачи теплоты от электродвигателя хладагенту в кожухе электродвигателя
$e_5^{\text{тер}}$	--/	Процесс изотермического отвода тепла от хладагента охлаждающей жидкости в конденсаторе
$e_6^{\text{тер}}$	--/	Процесс дросселирования в регулирующем вентиле I сопровождающийся понижением температуры хладагента
$e_7^{\text{тер}}$	--/	Процесс дросселирования в регулирующем вентиле II сопровождающийся понижением температуры хладагента
$e_8^{\text{тер}}$	--/	Процесс дросселирования в регулирующем вентиле III сопровождающийся понижением температуры хладагента

### Выводы

Разработанная модель ФПД инженерно-физическим методом поискового конструирования способна учитывать специфические возможности систем охлаждения: передвижение рабочего тела между элементами устройства, последовательность и длительность взаимодействий рабочего тела при работе устройства. Разработанная модель позволяет преодолеть ограничения традиционных методов автоматического регулирования, обусловленные нелинейностью рабочих характеристик оборудования. Внедрение данной модели в контур управления дает возможность повысить точность

поддержания параметров холодильных установок, оптимизации энергопотребления и возможности создания цифровых двойников объекта.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев, А. А. Разработка множеств технических решений установок для преобразования энергии : монография / А. А. Яковлев. – М., 2007. – 127 с.
2. Яковлев, А. А. Разработка автоматизированного устройства охлаждения зоны резания фрезерного станка. Построение модели физического принципа действия устройства / А. А. Яковлев, С. Г. Поступаева // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1(260) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 83–87. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-1-260-83-87. – EDN DIKHFF.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 10.02.2026, подписана в печать 24.02.2026  
The article was submitted 15.01.2026, revised 10.02.2026, accepted for publication 24.02.2026

УДК 664.655.1  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-65-69

Научная статья  
Original article

*Н. А. Прохоренко, А. Б. Голованчиков, Н. В. Шибитова*

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЕЧИ ТУПИКОВОГО ТИПА С УЧЕТОМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Наталья Андреевна Прохоренко, natasha292009@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрен процесс выпечки хлеба на примере работы тупиковой хлебопекарной печи, в которой в качестве интенсификации процесса происходит дополнительный автоматизированный обогрев люлек с исходными тестовыми заготовками – беспламенными горелками и отражателями рассеивающего вида. Проведен технологический расчет тупиковой хлебопекарной печи, где определена производительность, геометрические параметры, КПД и др.

**Ключевые слова:** тупиковая печь, энергоэффективность, цепной механизм, пекарная камера, обогрев печи, конвейерный под, люлька

**Для цитирования:** Прохоренко Н. А., Голованчиков А. Б., Шибитова Н. В. Разработка автоматизированной конструкции печи тупикового типа с учетом энергоэффективности. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 65–69. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-65-69.

### Информация об авторах:

**Наталья Андреевна Прохоренко** – старший преподаватель, 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 Валентиновна Шибитова** – доцент, канд. техн. наук, кафедра ПАХПП, ВолгГТУ  
orcid.org/0009-0001-4583-7539

e-mail: novnv27@mail.ru

### Вклад авторов:

**Н. А. Прохоренко** – разработка конструкции, проведение и анализ расчетов, написание текста статьи.

**А. Б. Голованчиков** – определение цели работы, разработка автоматизации разработанной конструкции.

**Н. В. Шибитова** – обработка результатов исследований, участие в обсуждении результатов.

*N. A. Prokhorenko, A. B. Golovanchikov, N. V. Shibitova*

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED DESIGN OF A DEAD-END FURNACE TAKING INTO ACCOUNT ENERGY EFFICIENCY

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Natalya A. Prokhorenko, natasha292009@yandex.ru

**Abstract.** The bread baking process is examined using a dead-end oven as an example. To intensify the process, the cradles containing the initial dough pieces are heated automatically using flameless burners and diffuser reflectors. A process calculation for the dead-end oven is conducted, determining its productivity, geometric parameters, efficiency, and other parameters.

**Keywords:** dead-end oven, energy efficiency, chain mechanism, baking chamber, oven heating, conveyor hearth, cradle

**For citation:** Prokhorenko N. A., Golovanchikov A. B., Shibitova N. V. Development of an automated design of a dead-end furnace taking into account energy efficiency. Izvestiya VSTU. 2026; 3(310): 65–69. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-65-69.

### Information about the authors:

**Natalya A. Prokhorenko** – Senior Lecturer, Candidate of Technical Sciences, Department of Industrial Chemical Engineering, VSTU

orcid.org/0000-0002-5706-1475

e-mail: natasha292009@yandex.ru

**Alexander B. Golovanchikov** – Professor, doctor of Technical Sciences, Department of Industrial Chemical Engineering, VSTU

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: 9275170082@mail.ru

**Natalia V. Shbitova** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Industrial Chemical Engineering, VSTU  
 orcid.org/0009-0001-4583-7539  
 email: novnv27@mail.ru

#### Contributions of the authors:

**Natalya A. Prokhorenko** – design development, calculations, and analysis, article writing.

**Alexander B. Golovanchikov** – definition of the study's objectives and development to the automation system for the developed design.

**Natalia V. Shbitova** – processing of the research results and participation in the discussion of the results.

#### Введение

Процесс хлебопечения представляет собой комплекс последовательно реализуемых стадий, включающих прием и подготовку сырья, дозировку, замес, ферментацию, формование, расстойку, выпечку и охлаждение. Каждая стадия сопровождается совокупностью физических, коллоидных, биохимических и микробиологических процессов, вносящих вклад в формирование текстуры, аромата и внешнего вида готового изделия. Выпечка хлеба, как заключительная технологическая операция, предполагает термическое воздействие на тесто в замкнутой среде, обеспечивающее удаление влаги, активацию структурных превращений и развитие характерных вкусовых свойств. Совокупность этих процессов направлена на достижение стабильного и нормативного качества продукции [1–2].

Целью является разработка автоматизированной конструкции тупиковой хлебопекарной печи с высокой производительностью и энергоэффективностью.

#### Материалы и методы исследования

На рисунке 1 представлена классификация наиболее часто встречающихся в промышленности хлебопекарных печей подразделяющие по принципу конструкции и по способу нагрева [3].

На рисунках 2, 3 представлена разработанная конструкция автоматизированной хлебопекарной печи.

Принцип работы печи основан на равномерном распределении тепла и эффективной транспортировке хлебобулочных изделий через рабочую камеру корпуса пекарной камеры. На начальном этапе тестовые заготовки на подносах поступают в корпус на подики с предварительным подогревом с помощью горелки. Далее подики перемещаются по автоматизированному цепному механизму, где происходит интенсивное прогревание за счет обогревателей расположенных в разных местах корпуса тупиковой печи и увлажнение с помощью пароувлажняющего элемента. При переходе подигов на нижнюю ветвь конвейера происходит их по-

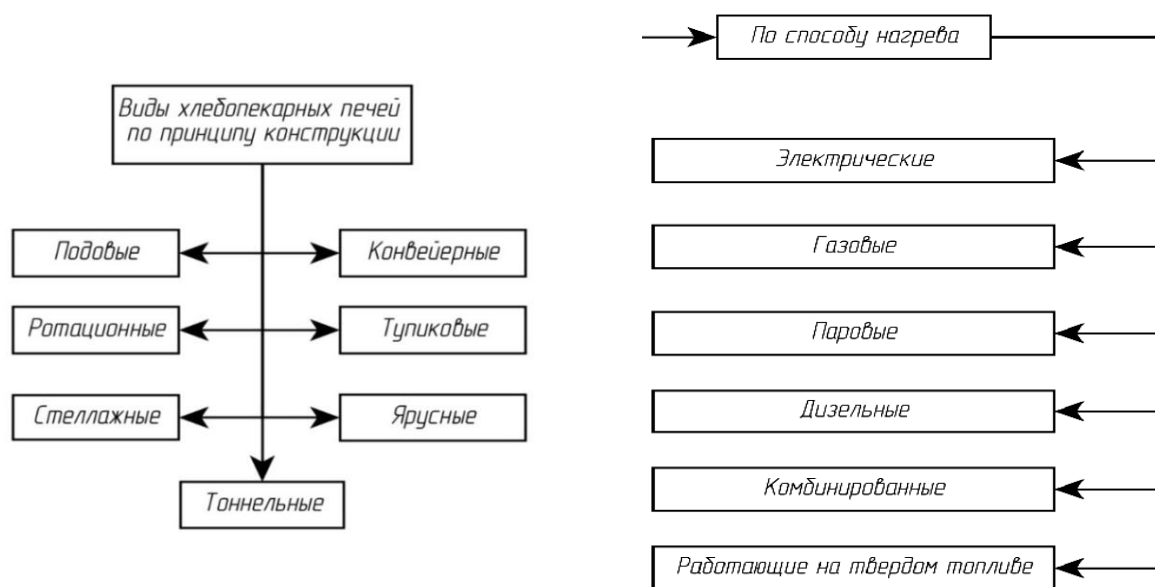


Рис. 1. Классификация хлебопекарных печей [1, 3]

ворот вокруг оси за счет втулок на валике, после чего переходят в нижнюю ветвь конвейера.

Поддоки с подносами перемещаются с постоянной скоростью, что предотвращает перегрев или недостаточное пропекание изделия. Применение металлического каркаса корпуса в

сочетании с многослойной теплоизоляцией позволяет снизить теплопотери, увеличить КПД печи и сократить эксплуатационные расходы. Процесс управления температурным режимом в печи может осуществляться как непрерывным, так и дискретным способами [4].

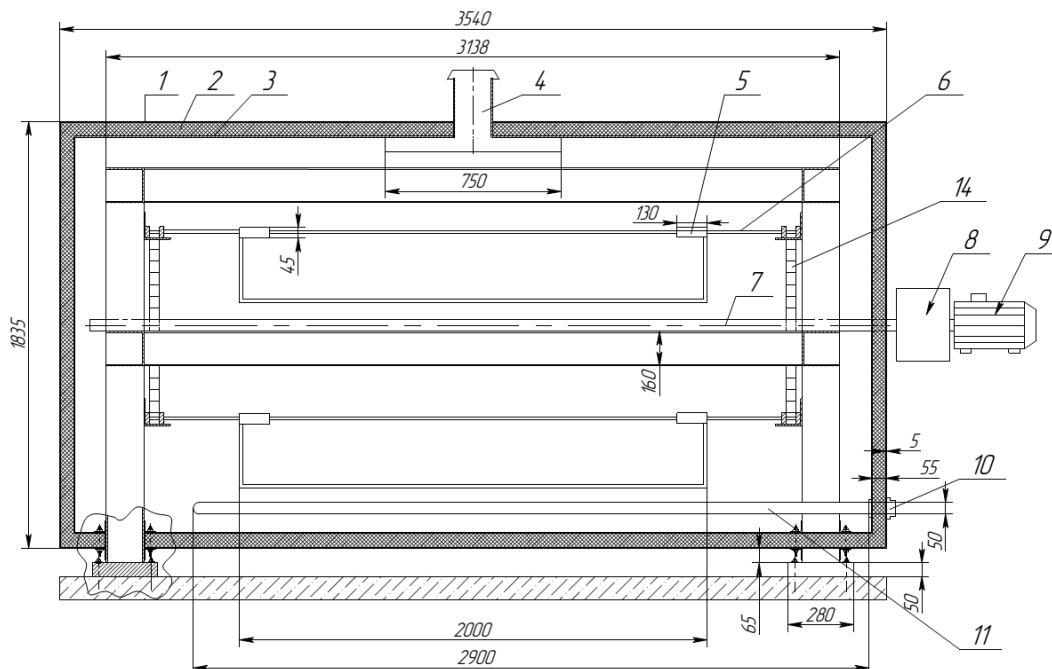


Рис. 2. Общий вид люльки на автоматизированном механизме транспортера:

1 – внешняя обшивка; 2 – минеральная вата; 3 – внутренняя обшивка; 4 – вытяжная труба; 5 – втулка; 6 – валик; 7 – приводной вал; 8 – редуктор; 9 – электродвигатель; 10 – защитная крышка; 11 – электрический ТЭН; 14 – цепь; (на рис. 3: 12 – горелка; 13 – паровлажнительное устройство; 15 – звезда; 16 – швеллер; 17 – опора; 18 – натяжитель цепи; 19 – люлька) [4]

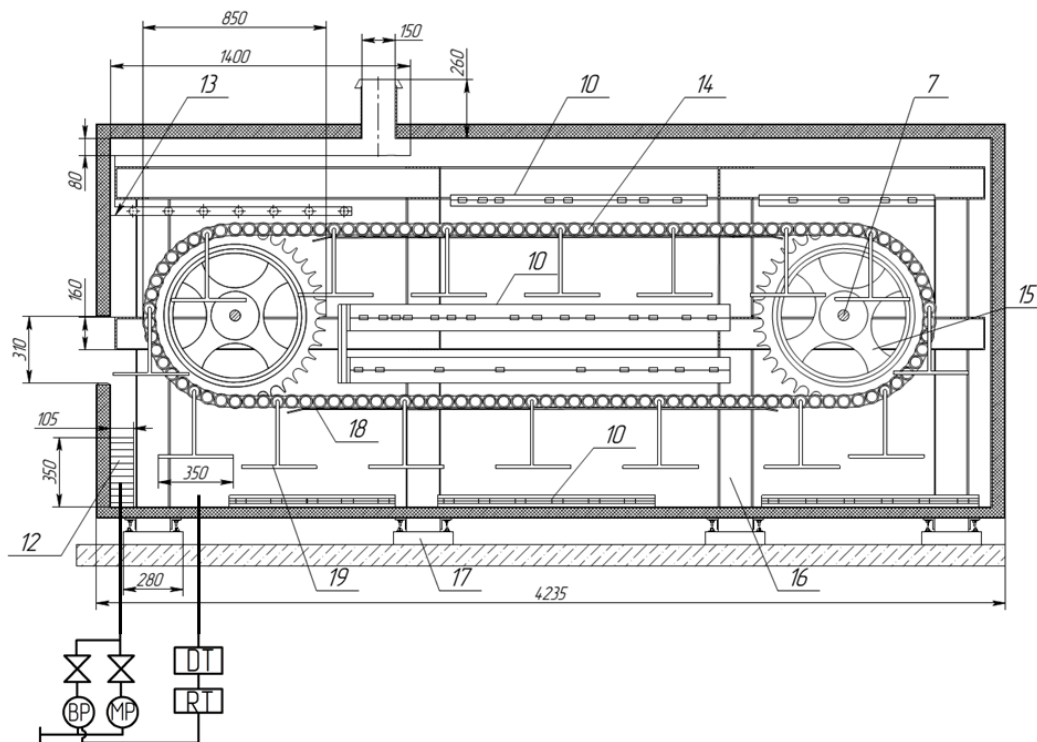


Рис. 3. Общий вид цепного механизма транспортера (пояснение позиций на рис. 2) с регулированием температуры в пекарной камере печи с помощью горелки [4]

Для предварительного подогрева заготовок перед входом в пекарную камеру используются горелки 12. Люльки выполнены из керамики с площадью дна 0,7 м<sup>2</sup>, что позволяет эффективно передавать тепловую энергию к тестовой заготовке.

За счет высокой теплоемкости и термостойкости керамики температура сырья повышается на 50–60 °С примерно за 1,5 минуты. Такой предварительный нагрев обеспечивает оптимальную температуру заготовок перед основным этапом выпечки [4].

Во время выпечки температура в камере поддерживается на уровне 180–200 °С. Продукты равномерно прогреваются благодаря равномерно расположенным автоматизированным нагревателям. Люльки с подносами перемещаются с постоянной скоростью, что предотвращает перегрев или недостаточное пропекание изделия. Печь оснащается 30 нагревателями с общей тепловой мощностью 265 кВт, что

обеспечивает интенсивную теплопередачу. При рабочем давлении 101,3 кПа в камере создаются условия для стабильного микроклимата, что позволяет избежать колебаний температурных режимов.

Цепной автоматизированный механизм обеспечивает синхронизированное движение 16 люлек по направляющим, что способствует равномерной загрузке и выгрузке продукции. Общая масса печи составляет 6820 кг, что требует надежного фундамента и соблюдения технологических условий при монтаже и эксплуатации [3–4].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Проведем технологический расчет хлебопекарной печи. Исходя из известного теплового баланса пекарной камеры, определим расходы теплоты (табл. 1) [5]:

$$q_{п.к.} = q_1^{п.к.} + q_2^{п.к.} + q_3^{п.к.} + q_4^{п.к.} + q_5^{п.к.} + q_6^{п.к.}. \quad (1)$$

Таблица 1

Расчетные параметры хлебопекарной камеры

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1. Производительность печи	кг/ч	$G_x$	1600
2. Тепловой баланс пекарной камеры	кДж / кг	$q_{п.к.}$	619,8
3. Теоретический расход тепла на выпечку 1 кг		$q_1^{п.к.}$	446,8
4. Расчет теплоты на перегрев пара		$q_2^{п.к.}$	18,89
5. Расход теплоты на подогрев воздуха		$q_3^{п.к.}$	52,8
6. Расход теплоты на нагрев транспортера		$q_4^{п.к.}$	13,82
7. Потеря теплоты ограждениями камеры		$q_5^{п.к.}$	86,72

В ходе расчетов были найдены основные технологические параметры тупиковой хлебо-

пекарной печи, которые сведены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические параметры тупиковой печи

Наименование параметра	Расчетная величина
Производительность печи, кг/ч	1600
Количество люлек, шт	16
Давление в печи, кПа	101,3
Температура выпечки, °С	180–200
Количество нагревателей, шт	30
Площадь выпечки, м <sup>2</sup>	11,2
Установленная тепловая мощность, кВт	265
Вес печи, кг	6820

На следующем этапе исследования была проведена оценка динамики изменения высоты подъема хлеба в зависимости от типа теста и времени выпечки. Для анализа использовались три вида теста: слоеное, дрожжевое и бездрожжевое. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Также в процессе исследования и расчета выпечки теста, важную роль играет оптимизация параметров термической обработки – важно контролировать температурный режим

внутри пекарной камеры на протяжении всего процесса выпечки. Вентиль МР открывается сразу же при начале работы тупиковой печи.

Датчик температуры ДТ фиксирует температуру внутри печи, в различные периоды времени, передавая сигнал на регулятор температуры РТ, при недостаточной температуре внутри, срабатывает сигнал, открывающий вентиль ВР. После выравнивания необходимой температуры в печи, вентиль ВР закрывается (см. рис. 3).

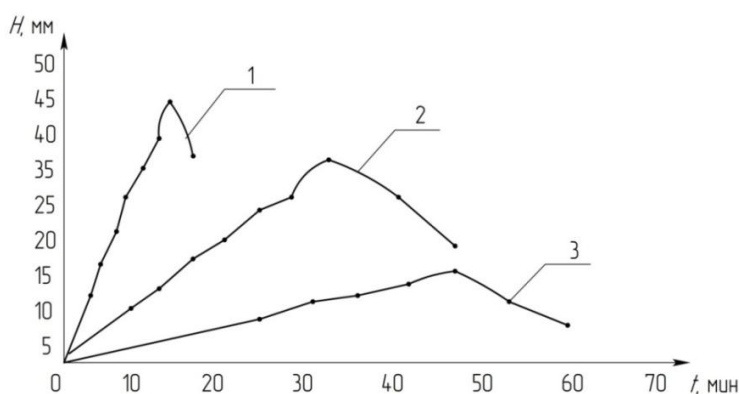


Рис. 4. Высота подъема хлеба от времени полной выпечки:  
1 – слоеное тесто; 2 – дрожжевое тесто; 3 – бездрожжевое тесто

### Выводы

Разработанная автоматизированная конструкция тупиковой хлебопекарной печи (рис. 2, 3), на основании известной Ш2–ХПА–10, которая позволяет обеспечить высокую надежность и производительность, за счет подогрева люлек на входе в печь, а также модернизируемого цепного конвейера и установки отражателей.

Произведенный технологический расчет печи, в ходе которого определены основные геометрические размеры, показал, что происходит уменьшение времени выпечки с 18 на 12 мин. Проведена оценка динамики изменения высоты подъема хлеба в зависимости от типа теста и времени выпечки. Наиболее быстро процесс выпечки в тупиковой хлебопекарной печи идет на слоеном тесте, время выпечки составляет 12 мин, для дрожжевого теста необходимо – 47 мин, для бездрожжевого теста – 58 мин.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маклюков, И. И. Промышленные печи хлебопекарного и кондитерского производства / И. И. Маклюков, В. И. Маклюков. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 408 с.
2. Виденина, Е. А. Разработка конструкции цепного конвейера для тупиковой хлебопекарной печи / Е. А. Виденина, Т. С. Бондаренко // Конкурс научно-исследовательских работ студентов ВолгГТУ (г. Волгоград, 21–25 апреля 2025 г.) : сб. тез. докл. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ, Отдел координации научных исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. – Волгоград, 2025. – С. 217.
3. Прохоренко, Н. А. Разработка энергоэффективной конструкции печи / Н.А. Прохоренко, Е.А. Виденина // Вестник научных конференций. – 2025. – № 1–2 (113). – С. 113–114.
4. П. м. 238851 Российская Федерация, МПК А21В 1/46 Тупиковая печь для выпечки грузинского хлеба / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Е. А. Виденина ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2025.
5. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : В 3 т. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестковой. – М. : Машиностроение, 2001 г.

УДК 004.932.4  
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-70-74

Научная статья  
Original article

*Ю. В. Шмелева, А. М. Макаров*

**СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАХВАТА ГИБКИХ КОНТЕЙНЕРОВ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Алексей Михайлович Макаров, amm34@mail.ru

**Аннотация.** Разработана автоматизированная система управления на основе технического зрения для контроля правильности захвата гибких контейнеров. Построена архитектура нейронной сети, выбрана и математически описана ее активационная функция. Организован процесс обучения сети с использованием градиентного спуска. Разработанная система позволяет автоматизировать процесс контроля при расфасовке сыпучих материалов.

**Ключевые слова:** техническое зрение, нейронная сеть, перцептрон, система управления, распознавание образов

**Для цитирования:** Шмелева Ю. В., Макаров А. М. Система технического зрения на основе нейронной сети для контроля захвата гибких контейнеров. Известия ВолгГТУ. 2026; 3(310): 70–74. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-70-74.

**Информация об авторах:**

**Юлия Валерьевна Шмелева** – инженер, кафедра АПП, ВолгГТУ

orcid.org/0009-0007-9831-7100

e-mail: imshmell@gmail.com

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

orcid.org/0000-0001-5617-8738

e-mail: amm34@mail.ru

**Вклад авторов:**

**Ю. В. Шмелева** – планирование эксперимента и обработка результатов, обсуждении результатов исследования.

**А. М. Макаров** – постановка задачи, определение материалов и методов исследования, обсуждение результатов исследования.

*Yu. V. Shmeleva, A. M. Makarov*

**NEURAL NETWORK-BASED MACHINE VISION SYSTEM FOR MONITORING  
THE GRIPPING OF FLEXIBLE CONTAINERS**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Alexey M. Makarov, amm34@mail.ru

**Abstract.** An automated control system based on machine vision for monitoring the correct gripping of flexible containers has been developed. The neural network architecture has been built, its activation function has been selected and mathematically described. The network training process using gradient descent has been organized. The developed system makes it possible to automate the control process during the packaging of bulk materials.

**Keywords:** machine vision, neural network, perceptron, control system, pattern recognition

**For citation:** Shmeleva Yu. V., Makarov A. M. A neural network-based technical vision system for monitoring the capture of flexible containers. Izvestiya VSTU. 2026; 3(310): 70–74. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-3-310-70-74.

**Information about the authors:**

**Yulia V. Shmeleva** – Engineer, Department of Applied Physics, VSTU

orcid.org/0009-0007-9831-7100

e-mail: imshmell@gmail.com

**Alexey M. Makarov** – Associate Professor, PhD, Head of the Department of Applied Mathematics, VSTU

orcid.org/0000-0001-5617-8738

e-mail: amm34@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Yulia V. Shmeleva** – planning of the experiment and processing of the results, discussion of the research results.

**Alexey M. Makarov** – formulation of the task, definition of materials and research methods, discussion of the research results.

**Введение**

В настоящий момент в мире бурно развивается новая прикладная область математики, специализирующаяся на искусственных нейронных сетях. Актуальность исследований в этом направлении обусловлена возможностями применения нейронных сетей в самых разных областях. При фасовке сыпучих материалов важной задачей является контроль процесса фасовки в реальном времени. Это необходимо для снижения брака и сокращения себестоимости процесса в целом. Разработка системы технического зрения позволит повысить степень автоматизации контроля правильности захвата гибких контейнеров при расфасовке сыпучих материалов, что приведет к повышению надежности технологического процесса за счет исключения человеческого фактора. В основе системы лежит использование искусственной нейронной сети (ИНС) для классификации изображений, получаемых с промышленной камеры [1]. Для решения задачи классификации с

двумя выходными состояниями была выбрана архитектура многослойного перцептрона.

**Материалы и методы исследования**

В качестве основы системы используется одноплатный компьютер Raspberry Pi 3, к которому через интерфейс CSI подключена камера. Система соединена с программируемым логическим контроллером (ПЛК) по сети Ethernet для получения сигнала начала работы и передачи результатов распознавания. Функциональная схема взаимодействия компонентов системы представлена на рис. 1.

Для задачи распознавания состояния контейнера («готов к использованию», «не готов») была разработана ИНС. Архитектура сети (рис. 2) включает:

- **Входной слой:** 400 нейронов, что соответствует количеству кластеров, на которые разбивается исходное изображение размером 640x480 пикселей.



Рис. 1. Функциональная схема системы технического зрения

- **Скрытый слой:** 5 нейронов, соответствующих возможным состояниям контейнера (правильно раскрыт, неправильно раскрыт, не раскрыт, не захвачен, захвачен не всеми

захватными устройствами).

- **Выходной слой:** 2 нейрона для финальной классификации.

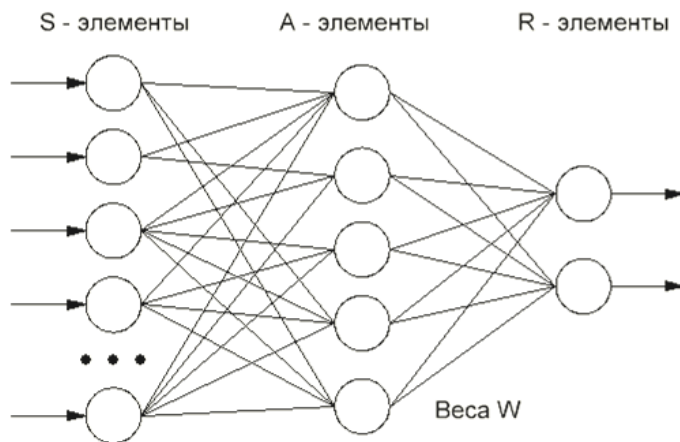


Рис. 2. Структура нейронной сети

В качестве активационной функции выбрана сигмоидальная функция (рис. 3), описываемая формулой:

$$f(z) = \frac{1}{1 + \exp(-z)} \quad (1)$$

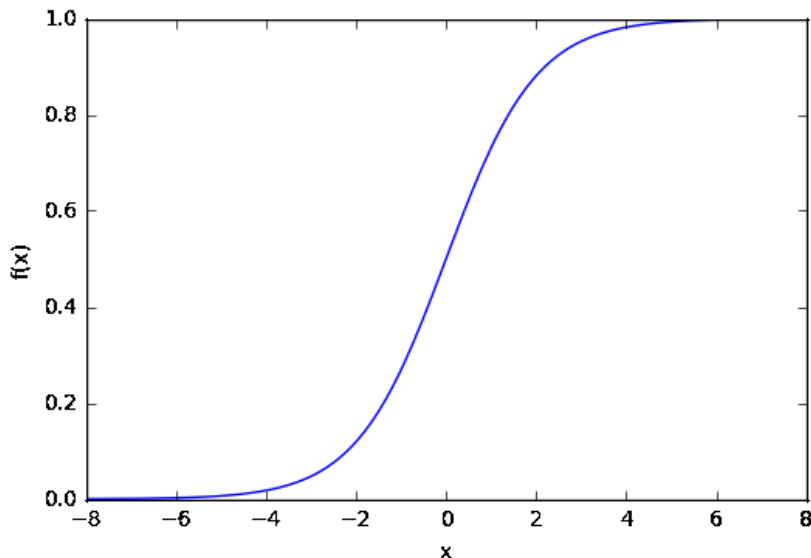


Рис. 3. График сигмоидальной функции

Данная функция является гладкой и непрерывной, рис. 3, что позволяет использовать метод градиентного спуска для обучения сети [2].

Процесс обучения сети инициализируется случайными весами. Для каждого примера из обучающей выборки выполняется прямое распространение, вычисляется ошибка на выходе, и затем методом обратного распространения ошибки корректируются веса и смещения (bias) сети по формулам градиентного спуска [2]:

$$W^{(l)} = W^{(l)} - \alpha \left[ \frac{1}{m} \Delta W^{(l)} \right] \quad (2)$$

$$b^{(l)} = b^{(l)} - \alpha \left[ \frac{1}{m} \Delta b^{(l)} \right] \quad (3)$$

где  $\alpha$  – скорость обучения,  $m$  – количество примеров в выборке.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Алгоритм распознавания, реализованный в системе, включает следующие этапы (рис. 4):

1. Преобразование входного изображения в черно-белое.
2. Выравнивание гистограммы яркости для уменьшения влияния освещенности.
3. Разбиение изображения на кластеры (20x20 пикселей) и подача их на входной слой сети.
4. Прямое распространение сигнала через скрытый слой с вычислением весов по формуле (1).
5. Выбор выходного нейрона с максимальным значением как результата классификации.

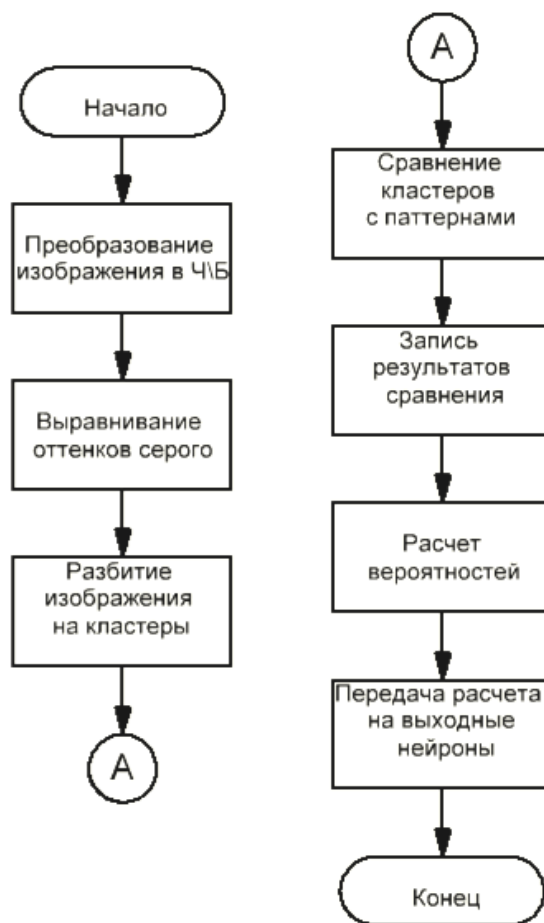


Рис. 4. Алгоритм распознавания изображения

Обучение сети проводилось на 3000 итерациях. График зависимости средней ошибки (функции стоимости) от числа итераций

(рис. 5) показывает сходимость алгоритма обучения – ошибка стабилизируется, что свидетельствует о найденном минимуме.

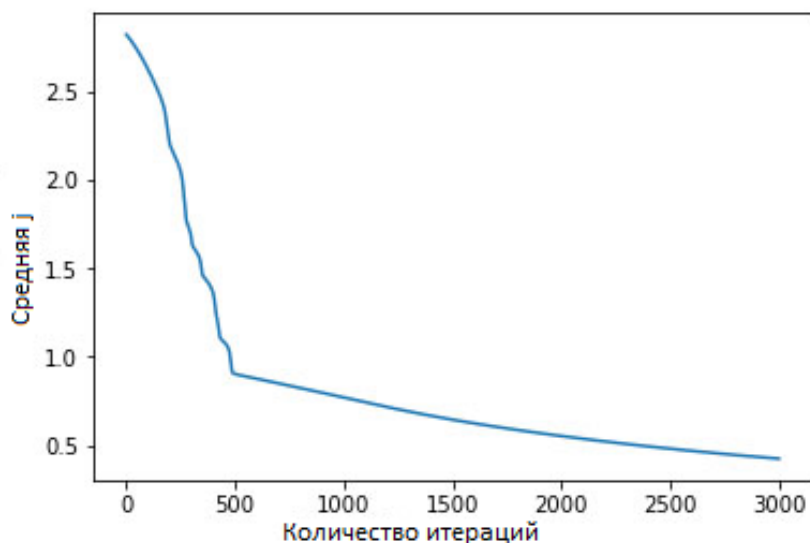


Рис. 5. Зависимость средней оценки от количества итераций

Точность разработанной модели, проверенная на тестовой выборке с использованием метрики accuracy\_score, составила 86 %. Для оператора разработан интерфейс (рис. 6), кото-

рый отображает результат распознавания и исходное изображение, что позволяет проводить визуальный контроль.

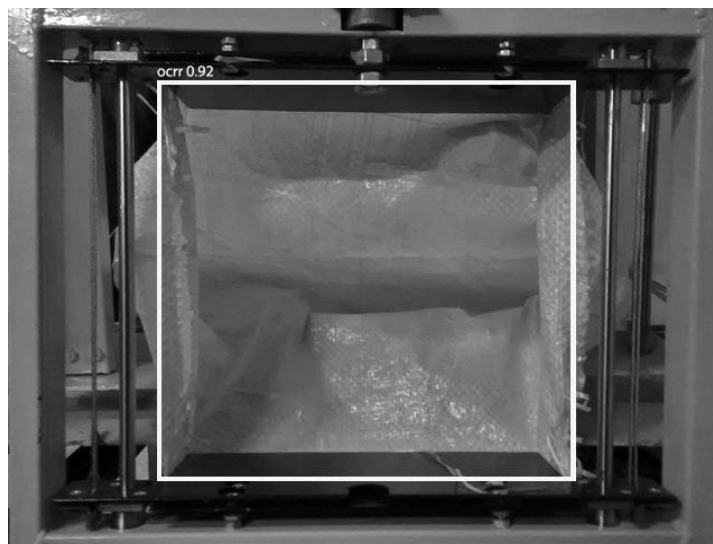


Рис. 6. Окно программы с результатом распознавания правильно раскрытого контейнера

### Выводы

В результате проведенного исследования разработана система технического зрения на основе многослойного перцептрона для контроля захвата гибких контейнеров. Система функционирует в автоматическом режиме, взаимодействуя с ПЛК, и демонстрирует точность

распознавания более 90 %. Предложенное решение позволяет повысить надежность автоматизированных линий расфасовки [3] и может быть адаптировано для решения других задач классификации изображений в реальном времени [4].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саптон, Д. Глубокое обучение на Python / Д. Саптон. – СПб. : Питер, 2021. – 400 с.
2. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – М. : Вильямс, 2021. – 1104 с.
3. Исследование узла предварительного раскрытия устройства автоматического манипулирования гибкими контейнерами / А. В. Ваганов, А. М. Макаров, М. Ю. Козенко, Я. В. Калинин // Известия ВолгГТУ : научный жур-

нал № 1 (236) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 54–56.

4. Князев, Д. С. Разработка программы слежения и классификации объекта на роботизированной конвейерной линии / Д. С. Князев, А. М. Макаров // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (292) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 36–43. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-9-292-36-43.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, доработана 30.01.2026, подписана в печать 24.02.2026  
The article was submitted 15.01.2026, revised 30.01.2026, accepted for publication 24.02.2026

---

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. № 2ж. Дата выхода в свет 22.04.2026 г. Формат 60 x 84 1/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 8,81.  
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 178.

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 полупорядочный. 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 подрубрики.

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, доделки 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 завершать 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 >