

Главный редактор научного журнала
«Известия Волгоградского государственного технического университета»
академик РАН, профессор, доктор химических наук,
советник при ректорате Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)
И. А. НОВАКОВ

Редакционная коллегия:

Байбурин В. Б., д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ, Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Безъязычный В. Ф., д-р техн. наук, проф., Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)
Бодров В. Н., д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)
Бребельс А., PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)
Буренин А. А., чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)
Голованчиков А. Б., д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ
Гуревич Л. М., д-р техн. наук, доц. ВолгГТУ
Злотин С. Г., д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)
Иванов А. М., д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)
Иващенко Н. А., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Королев А. В., д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Кузьмин С. В., чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Кураев А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)
Лысак В. И., академик РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Марков В. А., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Мертен Клеменс, д-р техн. наук, проф. Universität Stuttgart Institut für Chemische Verfahrenstechnik (г. Штутгарт, Германия)
Навроцкий А. В., чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, проф. ВолгГТУ
Нижегородцев Р. М., д-р экон. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, Россия)
Пай В. В., д-р физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)
Пустовойт В. Н., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)
Русинов В. Л., чл.-корр. РАН, Химико-технологический институт Уральского федерального университета (ХТИ УрФУ, г. Екатеринбург, Россия)
Трюэль Жан-Луи, д-р экон. наук, проф., Университет «Париж-12», Сорбонна, Франция, вице-президент Международного клуба экономистов «Круг Кондратьева»
Тхай Куанг Винь, д-р философии, Институт информационных технологий (г. Ханой, Вьетнам)
Федянов Е. А., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Фролов В. А., д-р техн. наук, проф., МАИ – Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (г. Москва, Россия)
Шаховская Л. С., д-р экон. наук, проф. ВолгГТУ
Щербаков М. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ

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.

Сердобинцев Ю. П., д.т.н., проф.
(зам. председателя)

Безъязычный В. Ф., д.т.н. проф.
(РГАТУ им. П. А. Соловьева,
г. Рыбинск)

Схиртладзе А. Г., д.т.н. проф.
(МГТУ «СТАНКИН», г. Москва)

Бржозовский Б. М., д.т.н. проф.
(ИМАШ РАН, г. Москва)

Королев А. В., д.т.н. проф.
(СГТУ, г. Саратов)

Сидякин Ю. И., д.т.н., проф.

Благовещенская М. М., д.т.н., проф.
проректор (МГУПП, г. Москва)

Пашков Е. В., д.т.н., проф. советник
ректора (СевГУ, г. Севастополь)

Попов В. И., д.т.н., проф.
(МГУПБ, г. Москва)

Сердобинцев С. П., д.т.н., проф.
(КТУ, г. Калининград)

Макарова О. А., к. т. н.
(ответственный секретарь)
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/

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

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

№ 8 (303)
Август
2025

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

Head Editor of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, Advisor in the Rector's Office of VSTU

Editorial board:

Baiburin V. B., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Bezyazychny V. F., D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov (Rybinsk, Russia)

Bodrov V. N., D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)

Brebels A., PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)

Burenin A. A., Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)

Golovanchikov A. B., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Gurevich L. M., D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU

Zlotin S. G., D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Ivanov A. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)

Ivashchenko N. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Korolev A. V., D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Kuzmin S. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Kurayev A. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)

Lysak V. I., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Markov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Merten K., D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)

Navrotsky A. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU

Nizhegorodtsev R. M., D. Sc. (Economy), Chief research worker, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Pai V. V., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

Pustovoyt V. N., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

Rusinov V. L., Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

Thai Quang Vinh, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)

Truel J.-L., D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club "Kondratiev Circle"

Fedyanov E. A., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Frolov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., "MAI Russian State Technological University named after K. E. Tsiolkovsky" (Moscow, Russia)

Shakhovskaya L. S., D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU

Shcherbakov M. V., D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU

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.

Serdobintsev Yu.P., D. Sc.
(Engineering), Prof. (Vice-chairman)

Bez'yazychniy V.F., D. Sc.
(Engineering), Prof. (RSATU
named after P.A. Solovyov, Rybinsk)

Skhirtladze A.G., D. Sc.
(Engineering), Prof.
(MSTU STANKIN, Moscow)

Brzhozovsky B. M., D. Sc.
(IMASH RAN, Moscow)

Korolev A.V., D. Sc., Prof.
(SSTU, Saratov)

Sidyakin Yu.L., D. Sc. (Engineering), Prof.

Blagoveschenskaya M.M., D. Sc.
(Engineering), Prof., Vice-rector
(MSUFP, Moscow)

Pashkov E.V., D. Sc. (Engineering),
Prof., rector's advisor
(SEVSU, Sevastopol)

Popov V.I., D. Sc. (Engineering),
Prof. (MSUAB, Moscow)

Serdobintsev S.P., D. Sc.
(Engineering), Prof.

(KSTU, Kaliningrad)

Makarova O. A. (executive secretary),
Cand.Sc

Tel. 8-937-723-33-93

International index of the journal
ISSN 1990-5297.

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

Tel. Of VSTU editorial office:

8-(8442) 24-84-05

8-(8442) 24-84-08

zavrio@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 8 (303)
August
2025

FOUNDER:

FSBEI of Higher Professional Education
«Volgograd State Technical University»

Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

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

E-mail: ianovakov@vstu.ru

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

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

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

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

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

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Багайсков Ю. С. 14, 24

Барабанов В. Г. 53, 59

Вирт А. Э. 7

Голованчиков А. Б. 43

Губарев А. С. 17

Давыдов Д. С. 65

Дроботов А. В. 46

Златкевич А. В. 17

Карасев Р. С. 35

Карлов В. И. 10

Кимбор Д. В. 46

Кожевникова А. А. 21, 35

Крижевский Б. А. 49

Крыхтин Ю. И. 10

Кухтик М. П. 49, 65

Лукьянов Н. В. 14

Макарова Е. А. 21

Макарова О. А. 17, 21

Меженин Р. Е. 53

Некипелов Н. В. 24

Норченко П. А. 35

Павлов Ю. К. 27

Поступаева С. Г. 56, 62

Прохоренко Н. А. 43

Пугачева В. А. 56

Сангаджиев Р. А. 67

Севастьянов А. А. 32

Тарасов Р. Ф. 59

Текутов Д. М. 62

Терехин В. А. 27

Трубицына М. С. 65, 67

Устин Н. В. 35

Федотов Д. Д. 38

Чигиринский Ю. Л. 27

Шандыбина И. М. 65, 67

Шاپин А. В. 67

Шарабаев Д. М. 14, 24

Шостенко С. В. 70

Якоби Я. Ю. 70

Яреско С. И. 38

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Вирт А. Э.

- Определение оптимальных геометрических параметров
опорного элемента роликового инструмента для обработки отверстий..... 7

Крыхтин Ю. И., Карлов В. И.

- К разработке и исследованию свойств пористых порошковых
плазменных фрикционных покрытий из стали 40Х13
для работы в масляной среде..... 10

Лукьянов Н. В., Багайсков Ю. С., Шарабаев Д. М.

- Анализ направлений совершенствования профильного фрезерования..... 14

Макарова О. А., Златкевич А. В., Губарев А. С.

- Применение высокоскоростной съемки при резании горячего проката
на роторной пиле РР 2500/2000
в условиях АО «Корпорация Красный Октябрь»..... 17

Макарова О. А., Кожевникова А. А., Макарова Е. А.

- Влияние кинематики резания на распределения напряжений
в обрабатываемом материале в зоне контакта..... 21

Некипелов Н. В., Багайсков Ю. С., Шарабаев Д. М.

- Анализ особенностей дробеметной обработки
поверхности стальных сварных труб..... 24

Павлов Ю. К., Терехин В. А., Чигиринский Ю. Л.

- Технологические аспекты штамповки толстостенных отводов..... 27

Севастьянов А. А.

- Силовые особенности фрезерования низколегированной стали
с различным размером зерна..... 32

Устин Н. В., Норченко П. А., Кожевникова А. А., Карасев Р. С.

- Реализация принципа «определение ценности продукции
для потребителя» при проектировании весоизмерительной техники..... 35

Федотов Д. Д., Ярьсько С. И.

- Расчет остаточных напряжений при конечно-элементном
моделировании процесса лазерной ударной обработки
на основе модели Джонсона–Кука..... 38

Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А.

- Разработка способа загрузки-выгрузки насадочных
контактных устройств в тепломассообменной колонне..... 43

Кимбор Д. В., Дроботов А. В.

- Оптимизация конструкции малогабаритного мембранного насоса
с учетом возможностей аддитивных технологий..... 46

Крижевский Б. А., Кухтик М. П.

- Разработка и исследование автоматизированной системы
прогнозирования качества помадных конфет на основе нейросети..... 49

<i>Меженин Р. Е., Барабанов В. Г.</i>	
Разработка приточно-вытяжной климатической установки с возможностью изменения сезонного режима на базе ПЛК ОВЕН.....	53
<i>Пугачева В. А., Поступаева С. Г.</i>	
Модернизация системы автоматизации установки очистки сточных вод.....	56
<i>Тарасов Р. Ф., Барабанов В. Г.</i>	
Разработка системы управления откачки канализационных стоков на базе промышленного ПЛК HCFA.....	59
<i>Текутов Д. М., Поступаева С. Г.</i>	
Многокритериальная оптимизация автоматизированной системы противопожарной защиты в условиях ограниченного финансирования.....	62
<i>Трубицына М. С., Давыдов Д. С., Шандыбина И. М., Кухтик М. П.</i>	
Исследование работы автоматической линии контроля герметичности пэт-бутылок.....	65
<i>Трубицына М. С., Сангаджиев Р. А., Шапин А. В., Шандыбина И. М.</i>	
Оптимизация технологических параметров узлов автоматической линии контроля герметичности пэт-бутылок.....	67
<i>Якоби Я. Ю., Шостенко С. В.</i>	
Пневматическая многокоординатная следящая система автоматизированного управления положением инструмента при сварке сильфонных коробок.....	70
К сведению авторов	75

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.787.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-7-10

А. Э. Вирт

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПОРНОГО ЭЛЕМЕНТА РОЛИКОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Камышинский технологический институт (филиал)

ВолгГТУ

E-mail: virt@kti.ru

Одной из основных частей многороликовых ротационных инструментов для обработки поверхностей деталей поверхностно-пластическим деформированием (ППД) является опорный конус, выполняемый в виде усеченного конуса. Назначением этой детали инструмента является установка роликов на требуемый угол и возможность настройки роликов на заданную глубину их внедрения в обрабатываемую поверхность. Для уменьшения контактных напряжений, возникающих между деформирующим элементом и опорным конусом, и как следствие повышенным их износом необходимо выбрать наиболее подходящую форму опорного конуса. Решению этой технологической задачи посвящена данная статья.

Ключевые слова: опорный конус, поверхностное пластическое деформирование, ППД роликами

A. E. Virt

DETERMINATION OF OPTIMUM GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE SUPPORTING ELEMENT OF A ROLLER TOOL FOR MACHINING HOLES

The Kamyshin Technological Institute (branch)
of the Volgograd State Technical University

One of the main parts of the For Multi rotary tools for surface treatment, details of PDP steyp support cone is executed in the form of a right circular cone. The purpose of this detail is to install the tool rolls to the desired clearance angle and the ability to customize the rollers to their predetermined depth introduction to the work surface. To reduce contact stresses arising between the deforming element and the supporting cone and as a result rose-shennym wear them you need to select the optimal form of the support cone. The solution of this problem cal technologists dedicated to this article.

Keywords: support cone, surface plastic deformation, self-feeding, SPD by rollers

В много роликовых инструментах предназначенных для обработки поверхностей деталей поверхностно-пластическим деформированием (ППД) одной из важных частей является опорный конус, выполняемый в виде усеченного конуса. Назначением этой детали инструмента является установка роликов на требуемый задний угол и возможность настройки роликов на заданную глубину их внедрения в обрабатываемую поверхность (рис. 1).

В ряде случаев, при необходимости обеспечения самозатягивания или уменьшения осевой

силы, действующей на инструмент, ролики устанавливают на угол по отношению к оси детали для перемещения по винтовой линии соответствующей подаче и вычисляемой по формуле:

$$\omega = \arctg \frac{S_0}{\pi \cdot d_p} + \omega^\circ \quad (1)$$

где ω° – дополнительный угол компенсирующий проскальзывание ($\omega^\circ = 10^\circ \dots 15^\circ$); S_0 – подача инструмента, мм/мин; d_p – диаметр ролика, мм.

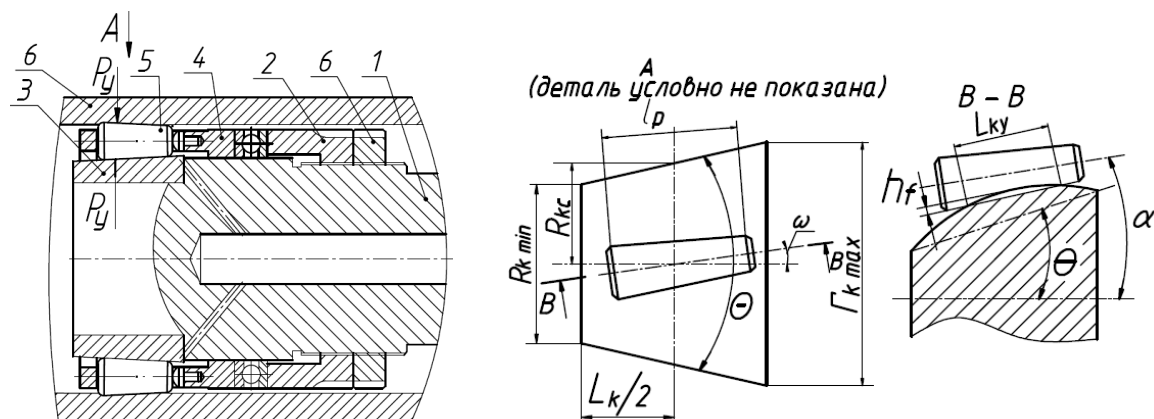


Рис. 1. Установка роликов в раскатнике с опорным конусом:

1 – шомпол; 2 – рычаг; 3 – конус опорный; 4 – сепаратор; 5 – ролик; 6 – гайка; 7 – обрабатываемая заготовка

Если $\omega = 0$, то контакт между роликами и опорным конусом при отсутствии нагрузки будет линейным, так как оба тела соприкасаются по образующим. Поворот роликов на угол самозатягивания (самоподачи) превращает линейный контакт в точечный. В случае приложения на-

грузки этот контакт превращается в эллиптический с площадью небольших размеров. На рис. 2 изображено соотношение между площадями пластического отпечатка, вычисленными по формуле (3) [3], и упругого контакта, вычисленными по формулам Герца [1], при обработке валов.

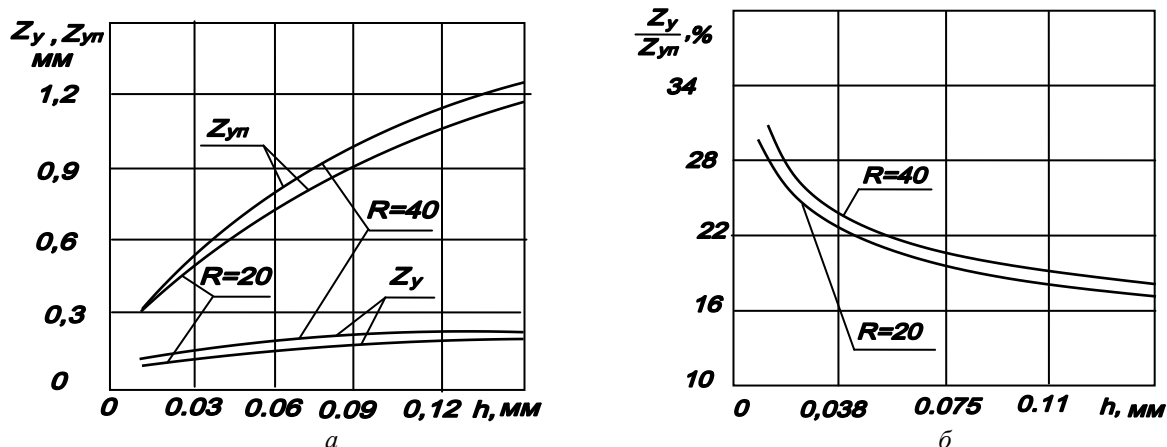


Рис. 2. Зависимость ширины контактной зоны от глубины внедрения деформирующего ролика в обрабатываемую деталь при упругопластическом и упругом контактах (а) и их процентное отношение (б): z_{yn} – упругопластический контакт; z_y – упругий контакт

Как видно из рис. 2, площадь контакта пластически деформируемой зоны между обрабатываемой поверхностью с роликами значительно больше, чем площадь контакта между роликами и опорным конусом. При равенстве сжимающих сил напряжения пропорциональны площадям контактов, поэтому максимальное напряжение будет приложено на упругом контакте, что и определит в основном усталостную прочность роликов и опорного конуса. Условия нагрузки на обрабатываемую поверхность определяют заданные параметры качества обработанной поверхности и являются заданными. В связи с этим необходимо изменить условия

деформирования между роликами и опорным конусом, таким образом, чтобы уменьшить между ними контактные напряжения. Для этого, очевидно, что при установке на угол самозатягивания, ролики и опорный конус должны соприкасаться по своим образующим на всей длине контакта. Этого можно достичь изменением формы боковой поверхности роликов или опорного конуса. С точки зрения технологичности предпочтительным является изменение формы опорного конуса, так как ролики значительно больше и очень часто используются готовые ролики с прямолинейной образующей из конических подшипников.

Решим эту задачу отдельно для обработки вала и отверстия. С этой целью рассмотрим взаимодействие конических деформирующих роликов и опорного конуса.

При параллельном положении образующих ролика и опорного конуса в соответствии с теорией Герца [1], их сближение определяется зависимостью:

$$h_{нар} = \frac{2 \cdot q_e (1 - \mu^2)}{\pi \cdot E} \cdot \left(\ln \frac{2r_p}{Z_{yn}} + \ln \frac{2r_k}{Z_{yn}} + 0,314 \right), \quad (2)$$

где Z_{yn} – ширина упругого контакта между роликом и опорным конусом вычисляется по формуле:

$$Z_{yn} = 1,128 \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \mu) \cdot r_p \cdot r_k \cdot q_e}{E \cdot (r_p + r_k)}}. \quad (3)$$

В приведенных формулах величины радиусов ролика r_p и опорного конуса r_k приняты равными среднему значению.

При взаимно перпендикулярном положении осей ролика и опорного конуса их сближение определяется зависимостью:

$$h_{неп} = \beta_9 \sqrt{\frac{P_y \cdot (1 - \mu^2) \cdot (r_p + r_k)}{E^2 \cdot (r_p \cdot r_k)}}. \quad (4)$$

При повороте ролика на угол самозатягивания сближение будет иметь промежуточное значение между величинами вычисленными по предыдущим двум формулам.

Так как в литературе нет формул для вычисления сближения при произвольном угле пересечения двух цилиндрических тел, что предположим, что в зависимости от угла самозатягивания сближение будет иметься по закону:

$$h_\alpha = h_{нар} - (h_{нар} - h_{неп}) \cdot \sin \omega. \quad (5)$$

Откуда следует, что при $\omega = 0^\circ$ и $\omega = 90^\circ$ сближение будет совпадать с граничными условиями задачи (2) и (4).

Глубина внедрения роликов в поверхность опорного конуса при их взаимном нагружении является переменной по длине контакта, причем в контакте находится только часть длины ролика. Радиус вектор ОМ проведенный из произвольной точки М образующий перпендикулярно оси опорного конуса определит уравнение поверхности вращения соприкасающейся с деформирующим роликом по прямой линии (рис. 1)

$$OM = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(r_{км} + l_k \cdot \operatorname{tg} \omega)^2 + l_k^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \omega}, \quad (6)$$

где x и y – текущие координаты уравнения искомой поверхности вращения.

Поверхность прямого кругового конуса для тех же размеров обрабатываемой поверхности изменяется по закону:

$$r_k = r_{км} + l_k \cdot \operatorname{tg} \Theta \quad (7)$$

Длина упругого контакта равна значению l_k при условии $h_{l\omega} = 0$. На рис. 1 представлены зависимости изменения сближения роликов с опорным конусом по длине контакта рассчитанные по формулам (2), (4), (5).

Учитывая, что при упругом взаимодействии напряжения пропорциональны деформациям, можно считать, что эпюра контактных напряжений будет пропорциональна эпюре сближения роликов с опорным конусом. Следовательно, при установке роликов на угол самозатягивания, напряжения распределены по длине контакта неравномерно. Из формулы (5) видно, что равномерное распределение деформаций и напряжений, имеет место, когда зависимость (2) равна по численному значению зависимости (4). Таким образом форма поверхности опорного конуса описываемого уравнением (6) будет оптимальной с точки зрения минимизации напряжений на упругом контакте. Из этого уравнения следует что при $\omega = 0^\circ$, оно превращается в уравнение прямого кругового конуса:

$$\sqrt{x^2 + y^2} - (r_{км} + l_k \cdot \operatorname{tg} \alpha) = 0. \quad (8)$$

Полагая затем $\alpha = 0^\circ$, найдем:

$$x^2 + y^2 - r_{км}^2 - l_k^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \omega = 0 \quad (9)$$

и, принимая соотношение постоянных величин в виде

$$c^2 = \frac{r_{км}^2}{\operatorname{tg}^2 \omega}, \quad (10)$$

получим уравнение гиперболоида вращения:

$$\frac{x^2}{r_{км}^2} + \frac{y^2}{r_{км}^2} - \frac{l^2}{c^2} = 1. \quad (11)$$

Это линейчатые поверхности, следовательно, и поверхность описываемая уравнением (11), при произвольных α и ω , тоже будет линейчатой.

В последнее время режим самозатягивания находит широкое применение для обработки длинномерных деталей, особенно при совмещенной обкатке резанием и ППД роликами гладких валов и отверстий. В последнем случае необходимо создать максимально возможную силу сцепления деформирующих роликов с обрабатываемой поверхностью. Как показывают исследования работы обкатников работающих в режиме самозатягивания, усилие обкатывания которых обеспечивает момент преодолеваю-

ций силы резания, иногда возникает проскальзывание роликов, причем проскальзывание роликов по поверхности опорного конуса наступает при меньшем усилии по сравнению с проскальзыванием роликов относительно обрабатываемой поверхности. Предположительно, это происходит по причине неплотного прилегания деформирующих роликов, а только по их концам, так как за счет установки роликов на угол самозатягивания между внутренней поверхностью опорного конуса и средней частью роликов образуется зазор (см. рис. 1).

Определим оптимальную форму внутренней поверхности опорного конуса для обработки валов при условии соприкосновения роликов по прямой линии с опорным конусом для чего будем предполагать, что деформирующие ролики опираются не на коническую, а на цилиндрическую поверхность отверстия конуса, это допустимо в виде малого угла конусности опорного конуса (не более 2°).

В этом случае радиус цилиндрической поверхности примем равным:

$$r_{ко} = R_o + d_{pc} \quad (12)$$

В этом предположении, при совместном сечении ролика и конуса плоскостью А – А (см. рис. 1) в сечении образуется пересекающиеся эллипс и отрезок прямой, концы которого расположены на эллипсе в точках А и Б. Уравнение эллипса образующегося в сечении будет иметь вид:

$$y = \sqrt{r_{кс}^2 - x^2 \cdot \sin^2 \omega}. \quad (13)$$

Подставляя в это уравнение координаты точек С и Б, то есть Х и вычитая правую часть из радиуса, то получим величину максимального зазора:

$$f = r_{кс} - \sqrt{r_{кс}^2 - 0,25 \cdot l_p^2 \cdot \sin^2 \omega}. \quad (14)$$

С точки зрения технологичности изготовления предпочтительней изменить форму опорного конуса, чем деформирующих роликов. В зависимости от применяемой технологии, целесообразно также заменить эллипс окружностью. Радиус этой окружности можно вычислить по формуле:

$$R_s = \frac{0,125 \cdot l_p^2}{f}. \quad (15)$$

Расчеты показывают, что прогиб составляют и радиус значительно меньше допуска на обработку. Тем не менее зазор между роликами и опорным конусом целесообразно установить. Это легко достигается, если применить окончательную расточку конуса эльборовым резцом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник машиностроителя в 6 томах / под ред. академика АН УССР С. В. Серенсена. – Изд. 3-е. – М.: Машгиз, 1962. – 651 с.
2. Барац, Я. И. Поверхностное упрочнение деталей машин обкаткой роликами / Я. И. Барац. – Харьков: Гос. научно-техн. изд. черной и цветной металлургии, 1959. – 53 с.
3. Отений, Я. Н. Технологическое обеспечение качества деталей машин при обработке поверхностным пластическим деформированием роликами: дисс. д-ра техн. наук / Отений Я. Н. – Волгоград, 2007. – 320 с.

УДК 629.114.2-235

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-10-13

Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов

К РАЗРАБОТКЕ И ИССЛЕДОВАНИЮ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ ПОРОШКОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ СТАЛИ 40Х13 ДЛЯ РАБОТЫ В МАСЛЯНОЙ СРЕДЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: fotina-sk@mail.ru, kvi_au@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы разработки и исследования свойств фрикционных покрытий из стали 40Х13, изготовленных по высокопроизводительной технологии плазменного напыления, для работы по стали с высоким коэффициентом трения в масляной среде.

Ключевые слова: граничное трение, полусухое трение, пара трения, коэффициент трения, пористость фрикционного покрытия, скорость скольжения, удельная нагрузка

Yu. I. Krykhtin, V. I. Karlov

**TO DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PROPERTIES
OF POROUS POWDER PLASMA FRICTION ROOFING MADE
OF STEEL 40X13 FOR OPERATION IN OIL ENVIRONMENT**

Volgograd State Technical University

The article discusses the development and study of the properties of friction coatings made of 40X13 steel made using the plasma sputtering technology for work in tandem with steel with a high coefficient of friction in an oil medium.

Keywords: boundary friction, semi-dry friction, friction pair, friction coefficient, friction coating porosity, sliding speed, specific load

В транспортном машиностроении для колесных и гусеничных машин актуальными являются вопросы создания малогабаритных, высокоэффективных фрикционных устройств с материалами трения в конусе синхронизатора и дисках трения коробки переключения передач с высоким коэффициентом трения и износостойкостью, работающими по стали в масляной среде и производимыми по высокопроизводительной технологии [1–3].

Целью работы является разработка и исследование свойств высокоэффективных пористых порошковых фрикционных стальных покрытий для работы по стали в масляной среде с высоким коэффициентом трения.

Новизной работы являются полученное плазменным напылением пористое порошковое фрикционное покрытие из стали 40X13 и результаты его исследования по коэффициенту трения и износостойкости при взаимодействии со стальным контртелом в масляной среде.

Для достижения высоких эксплуатационных свойств деталей трения целесообразно с экономической и технической точек зрения фрикционные покрытия наносить на стальную основу. Одним из наиболее перспективных методов формирования покрытий является метод плазменного напыления, который позволяет получать различные по составу пористые покрытия толщиной до 1 мм, прочно связанные с основным металлом [3].

Перед покрытием поверхность основы из стали 12ХН3А (для конуса синхронизатора КПП) и стали 65Г (для фрикционных дисков) обезжиривается, подвергается дробеструйной обработке и затем напыляется фрикционный материал. Напыление покрытий из стали 40X13 производится на универсальной плазменной установке УПУ-3М с помощью дуговой плазмы исходными материалами в виде проволоки или порошка [4] на следующих режимах: сила тока $I = 450\text{--}500$ А; напряжение $U = 30\text{--}32$ В; дистанция напыления $L = 90\text{--}110$ мм; расход плазмообразующего газа $Q = 26\text{--}28$ л/мин. Произ-

водительность процесса напыления 10,2 кг/ч порошковой проволоки при расходе ее на один диск или конус синхронизатора КПП 0,148 кг. Покрытие следует наносить в виде расплавленных частиц со средним размером 70 мкм со скоростью до 100 м/с. Структура покрытия из стали 40X13 при газотермическом напылении претерпевает фазовое превращение и представляет собой троостит и мартенсит. При этом число микротвердости H_n покрытия составляет 65–75 МПа; прочность сцепления с основой, измеренная по штифтовой методике составляет 40–50 МПа; остаточная пористость – 18–20 %.

Триботехнические свойства покрытий определялись на машине трения МТ-68М без съема образца в ходе автоматических замеров и записи износа (с точностью до 1 мкм), силы трения и средней температуры образца [4]. Контртела изготавливались из стали 20Х2Н4А ГОСТ 4543–81 с твердостью $\geq 58\text{HRC}_3$ (сердцевина 36,5–49,5 HRC_3), актуальной для конуса синхронизатора. Поверхность контртел цементировалась на глубину 1–1,4 мм и закаливалась. Испытания проводили при скоростях скольжения 1, 3, 6 и 9 м/с с полустерной смазкой трансмиссионным маслом МТ-16П в условиях граничного и полусухого трения. Под граничным трением понимают контакт между поверхностями с крайне тонкой разделительной пленкой смазки, а полусухое трение – это сочетание граничного трения с очагами сухого трения [4]. Сначала определялась нагрузка схватывания поверхностей в момент появления полусухого трения (предельное давление), приведенная в табл. 1.

Таблица 1

**Нагрузка схватывания поверхностей
трения, МПа**

Марка материала трения	Скорость скольжения, м/с			
	1	3	6	9
40X13 (покрытие)	12	8	6,5	5
40X13 (литая)	8	5	4	3

Затем определялись основные триботехнические свойства материалов трения соответственно для скоростей скольжения 1, 3, 6, 9 м/с

в режиме граничного трения, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения триботехнических свойств

Марка материала и условия трения	Время приработки, мин	Темп изнашивания, мкм/км	Коэффициент трения μ
40X13 (покрытие)	30; 25; 25; 20	0,42; 0,39; 0,32; 0,5	0,16; 0,17; 0,17; 0,16
Сталь 40X13 (литая)	40; 35; 30; 30	0,63; 0,72; 0,61; 0,74	0,13; 0,13; 0,12; 0,12

Пористые покрытия из стали 40X13 превосходят литой фрикционный материал 40X13 по износостойкости в 1,65 раза при меньшем износе контртел, по коэффициенту трения – в 1,32 раза, а также имеют повышенную стойкость против схватывания.

При деформации и уплотнении податливого упругого пористого фрикционного покрытия детали при работе в масляной среде имеют место режимы граничного и полусухого трения с существенным повышением коэффициента трения μ . При скольжении поверхностей пары трения с пористым фрикционным увеличивающим маслосъемность сопряжения покрытием покрытие способно под действием повышенных нагрузок деформироваться и уплотняться по глубине без полного выдавливания смазки из зоны трения в локальных объемах с выделением дополнительной смазки, что в значительной степени уменьшает возможность схватывания на этих участках поверхностей трения и, следовательно, предотвращает распространение процессов схватывания на всю поверхность трения. При этом предотвращается переход к сухому трению при сохранении повышенного коэффициента трения, характерного для полусухого режима и снижа-

ется (по сравнению с сухим трением) износ сопряженных поверхностей, что значительно увеличивает долговечность фрикционного узла.

Нижний предел по пористости 10 % устанавливается исходя из условий обеспечения деформирования пористого тела и накопления масла в порах. Верхний предел пористости 25 % устанавливается из условий обеспечения прочностных свойств покрытия.

Проведены статистические испытания для создания базы экспериментальных данных по $\mu_1 = f(V_{ск}, p)$ при неизменной пористости фрикционного материала.

Результаты триботехнических испытаний в минеральном масле марки ТСЗП-8 ОСТ 38.01365–84, подаваемого в зону контакта капельным или фитильным способом для обеспечения условий граничного трения, на машине трения МТ-68 пористого порошкового фрикционного материала из стали 40X13 с пористостью $\Pi=19\%$, получаемого методом плазменного напыления, представлены в табл. 3. Величина удельной нагрузки для испытания пары трения выбиралась равной 80 % от нагрузки схватывания пары трения сталь 65 Г – сталь 65 Г, которая была выбрана, как базовая.

Таблица 3

Результаты триботехнических испытаний

Условия трения	Граничное трение			Полусухое трение	
$V_{ск}$, м/с	5	10	20	25	30
p , МПа	6	4	2	1	0,5
Темп износа, мкм/км	< 5	< 5	5	< 5	10
Температура в зоне контакта, °С	76	90	125	144	154
μ_1	0,1	0,12	0,2	0,32	0,4

Проведены статистические испытания для создания базы экспериментальных данных по $\mu_2 = f(V_{ск}, p, \Pi)$ для определения коэффициента

трения для пары трения в зависимости от пористости материала трения.

Испытания на трение и изнашивание плаз-

менных покрытий из стали 40Х13, представляющих собой пористый материал с гетерогенной структурой, состоящей из частиц троостита, мартенсита и сорбита закали, проведены на машине трения МТ-66 на скорости скольжения $V_{ск} = 6$ м/с в режимах граничного и полусухого трения со смазкой МТ-16П ГОСТ 6330–58.

В качестве контртела использовалась закаленная сталь 20Х2Н4А ГОСТ 4543–81 с твердостью ≥ 58 HRC_Э. Для сравнения наряду с покрытиями испытаниям подвергались образцы из стали 12ХН3А ГОСТ 4543–61.

Результаты испытаний покрытий приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний на трение и износ

№	П, %	Предельная нагрузка схватывания, МПа	Темп износа, мкм/км*	Коэффициент трения μ_2 в период установившегося износа
1	5–7	4,8	0,44	0,17
2	10–12	5,9	0,23	0,14
3	17–19	6,1	0,22	0,12
4	22–25	6,0	0,23	0,12
5	28–32	5,0 (механическое разрушение)	–	–
6	0 (сталь 12ХН3А)	4,2	0,58	0,2

* – Износостойкость покрытий определяли при нагрузке 3,5 МПа, т. е. при нагрузке на 15 % меньшей от нагрузки схватывания стали 12ХН3А

Максимальной нагрузкой схватывания обладают покрытия с П=10–25 %. Значительно уступают им покрытия с П=5–7 % и сталь 12ХН3А. Высокопористые покрытия, имеющие недостаточную прочность, механически разрушаются при достижении нагрузок 5МПа.

В результате проведенных испытаний установлено, что, во-первых, плазменные покрытия из стали 40Х13 с пористостью 10–25 % способны работать при нагрузке в 1,4–1,5 раза превышающей максимальные нагрузки для стали 12ХН3А. Во-вторых, плазменные покрытия из стали 40Х13 с пористостью 10–25 % превосходят по износостойкости сталь 12ХН3А.

Пробеговые испытания в объеме 10000 км опытных конусов синхронизаторов коробки перемены передач с покрытием из стали 40Х13 на легких гусеничных машинах с большой удельной мощностью подтвердили выявленные на машинах трения преимущества изделий с покрытием по триботехническим и эксплуатационным характеристикам в сравнении с серийными конструкциями. В том числе, износ покрытия на конусе синхронизатора составил 0,25 м, а для серийной детали – 0,45 мм.

Плазменные фрикционные покрытия с коэффициентом трения $\mu \geq 0,16$ при работе со стальным контртелом в масле используется с целью повышения характеристик дисков фрик-

ционных устройств и конусов инерционных синхронизаторов трансмиссий легких транспортных гусеничных машин (ГМ) с большой удельной мощностью (свыше 30 л.с./Т) [5].

По результатам исследования при создании новых и модернизации существующих трансмиссий легких транспортных ГМ рекомендуются газотермические покрытия из стали 40Х13 с пористостью 10–25 % для проектирования высокоэффективных фрикционных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Труханов, В. М. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В. М. Труханов, В. Ф. Зубков, Ю. И. Крыхтин, В. Ф. Желтобрюхов. – М. : Машиностроение, 2001. – 736 с.
2. Шаповалов, В. В. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения / В. В. Шаповалов, А. Сладковски, А. Ч. Эркенов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 1. – С. 64–75.
3. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М. : Машиностроение, 1985. – 239с.
4. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия, материалы, технологии, свойства, области применения. Справочник / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысельский. – Киев : Наукова думка, 1985. – 623 с.
5. К разработке высокоэффективных пористых порошковых фрикционных покрытий для работы в масле / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (279) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 24–27. – DOI: 10.35211/1990-5297-2023-8-279-24-27.

УДК 621.9.025

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-14-16

*Н. В. Лукьянов, Ю. С. Багайсков, Д. М. Шарабаев***АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ПРОФИЛЬНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ****Волжский политехнический институт (филиал)****Волгоградского государственного технического университета**

E-mail: nikitos-091999@mail.ru, bagaiskov@bk.ru, vto@post.volpi.ru

Представлен анализ современных направлений совершенствования профильного фрезерования, включая новые схемы обработки, конструкции фрез и методы оптимизации процесса. Рассмотрены инновационные решения, такие как фрезоточение с переменными угловыми скоростями, модульные и гибридные фрезы с улучшенной аэродинамикой, а также системы внутреннего охлаждения и динамической балансировки. Особое внимание уделено влиянию новых технологий на ключевые показатели: точность, шероховатость поверхности, жесткость, виброустойчивость, производительность. Прогрессивные предложения: оптимизации режимов резания, включая алгоритмы компенсации ошибок, применение аддитивных технологий для изготовления инструмента. На основе критического анализа выявлены наиболее перспективные направления развития для повышения эффективности и качества профильного фрезерования, такие как разработка специализированных САПР, внедрение IoT-мониторинга, использование нанокompозитных материалов.

Ключевые слова: профильное фрезерование, модульные фрезы, фрезоточение, фрезы-роутеры, компенсация ошибок, аддитивные технологии

*N. V. Lukyanov, Yu. S. Bagayskov, D. M. Sharabaev***ANALYSIS OF DIRECTIONS OF IMPROVEMENT
OF PROFILE MILLING****Volzhsky Polytechnic Institute (branch)
of Volgograd State Technical University**

The article presents an analysis of modern trends in improving profile milling, including new processing schemes, cutter designs, and process optimization methods. Innovative solutions such as variable-speed milling, modular and hybrid cutters with improved aerodynamics, as well as internal cooling and dynamic balancing systems are considered. Particular attention is paid to the impact of new technologies on key indicators: accuracy, surface roughness, rigidity, vibration resistance, productivity. Progressive proposals: optimization of cutting modes, including error compensation algorithms, the use of additive technologies for tool manufacturing. Based on the critical analysis, the most promising areas of development for improving the efficiency and quality of profile milling are identified. Such as the development of specialized CAD systems, the introduction of IoT monitoring, the use of nanocomposite materials.

Keywords: profile milling, modular cutters, milling, router cutters, error compensation, additive

Профильное фрезерование играет ключевую роль в машиностроении, особенно при обработке сложных поверхностей деталей для аэрокосмической, автомобильной и других высокотехнологичных отраслей. Требования при этом: достижение высокой точности формы и размеров, низкой шероховатости поверхности, эффективной обработки труднодеформируемых материалов, таких как титановые и алюминиевые сплавы или композиты. Особенно востребовано профильное фрезерование при изготовлении деталей с РК-профилями, равноосными контурами, циклоидальными и винтовыми поверхностями, где традиционные методы не обеспечивают нужного качества и производительности [1].

Для решения этих задач применяются различные виды фрезерования, включая торцевое, контурное, фрезоточение и высокоскоростную обработку. Торцевое фрезерование обеспечивает высокую точность при обработке плоских поверхностей, тогда как контурное используется для создания сложных профилей, включая равноосные контуры [2]. Фрезоточение, сочетающее вращение фрезы и заготовки, позволяет достичь высокой производительности и качества, особенно при обработке нестандартных форм, таких как треугольник Рело (рис. 1) или циклоидальные профили. Высокоскоростное фрезерование минимизирует дефекты при работе с композитами и жаропрочными материалами.



Рис. 1. Треугольник Рело

Инструментальная база профильного фрезерования включает сборные торцовые фрезы с твердосплавными сменными пластинами (СМП), модульные фрезы с настраиваемыми компонентами, фрезы-роутеры (рис. 2) для композитов и цельные твердосплавные фрезы для прецизионной обработки [4].

Известны конструктивные инновации, такие как оптимизированная геометрия режущих пластин (например, радиус при вершине $R_e = 0,8$ мм и задний угол $\alpha = 15^\circ$ для обработки жаропрочных сплавов), улучшенные стружколомы (например, типа К85) и модульные фрезы с аэроди-

намическими корпусами, позволяют снизить вибрации на 30 % и повысить эффективность резания [5]. Одним из перспективных направлений является фрезоточение с переменными угловыми скоростями, где управление соотношением скоростей фрезы и заготовки (например, 1:3) обеспечивает высокую точность и низкую шероховатость ($R_a \leq 0,8$ мкм) [2]. Другой инновацией стало высокоскоростное фрезерование с внутренним охлаждением, где фрезы с интегрированными каналами подачи СОЖ позволяют увеличить скорость резания на 20–30 % за счет снижения тепловых деформаций.

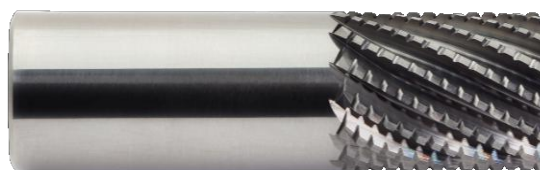


Рис. 2. Фреза-роутер для композитов

На рис. 3 показано сравнение достигаемой производительности и температуры при традиционном фрезеровании, фрезоточении и фрезеровании с внутренним охлаждением, подтверждающее эффективность новых разработок.

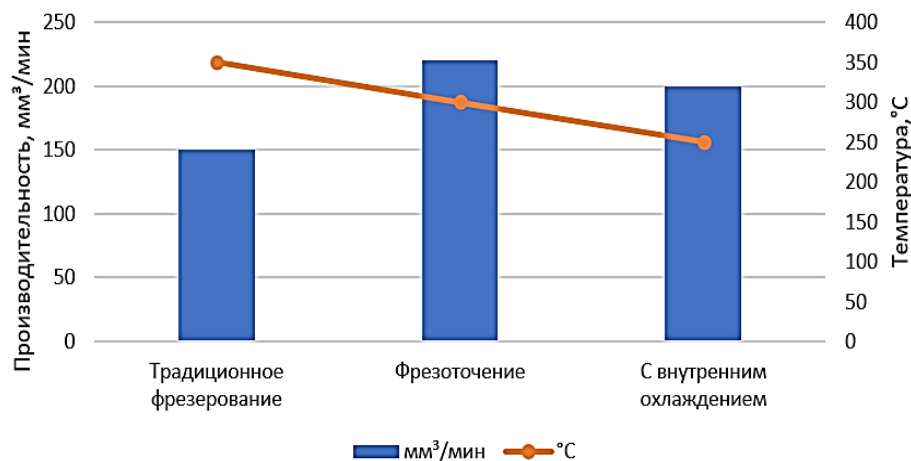


Рис. 3. Производительность и температура при традиционном фрезеровании, фрезоточении и фрезеровании с внутренним охлаждением

Для расчета режимов резания применяются алгоритмы, учитывающие динамические ошибки инструмента. Например, подача на зуб (f_z) определяется по формуле:

$$f_z = \frac{f' * x * \cos(\theta)}{z * 3.14 * Dm},$$

где f' — осевая подача, x — шаг винтовой линии, θ — угол смещения.

Дополнительно используются нейросетевые модели для прогнозирования динамических оши-

бок ($\Delta\delta$) с точностью до 4 мкм, что позволяет корректировать NC-коды, компенсируя отклонения инструмента [6].

Новые технологические решения включают аддитивные технологии для 3D-печати корпусов фрез, что сокращает время и стоимость производства на 30–50 %, повышает жесткость инструментов, а также системы охлаждения с многоканальными распределителями СОЖ, снижающие температуру в зоне резания на 40 % [6]. Динамиче-

ская балансировка с использованием спиральных пазов и регулируемых грузов уменьшает вибрации на 25 %, повышая стойкость инструмента.

Примеры влияния новых разработок на основные показатели профильного фрезерования приведены в таблице.

Влияние нововведений на показатели фрезерования

Параметр	Влияние нововведений	Пример улучшения
Точность	Компенсация динамических ошибок, оптимизация геометрии пластин	Уменьшение погрешности до 5 мкм
Жесткость	Гибридные конструкции (полимерные корпуса+металлические пластины)	Повышение жесткости на 15%
Виброустойчивость	Балансировочные механизмы, аэродинамические корпуса	Снижение вибраций на 15 %
Производительность	Высокоскоростное фрезерование, фрезоточение	Увеличение скорости резания на 20–30 %
Шероховатость	Оптимизация стружколома, точное управление режимами	$Ra \leq 0,8$ мкм

При проектировании технологий надо иметь в виду, что несмотря на преимущества, новые методы и конструкции имеют и недостатки: гибридные фрезы сложны в изготовлении, а алгоритмы компенсации ошибок требуют очень точной настройки.

Кроме вышеназванного перспективными направлениями развития профильного фрезерования являются:

- разработка универсальных САПР для проектирования фрез с учетом аэродинамики и тепловых деформаций;
- внедрение IoT-мониторинга износа инструмента в реальном времени;
- использование нанокompозитных материалов (например, WC-Co-Al₂O₃), повышающих термостойкость на 20 %.

В заключение можно отметить, что совершенствование профильного фрезерования требует комплексного подхода, объединяющего оптимизацию инструментов, внедрение инновационных схем обработки и цифровых технологий. Это позволит повысить точность, качество и производительность обработки сложно-профильных деталей, обеспечивая конкурентоспособность в высокотехнологичных отраслях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобанов, Д. В. Моделирование сборного лезвийного инструмента для обработки композиционных материалов / Д. В. Лобанов, М. В. Купцов, А. У. Запашева // Современные технологии: проблемы и перспективы : сб. ст. всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых ученых. – Севастополь, 2020. – С. 27–33. URL: <https://disk.yandex.ru/i/Qf9AeSX92t4IJg>.

2. Исаев, А. В. Разработка системы исходных данных для проектирования сборных торцовых фрез / А. В. Исаев, М. С. Николаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 7. – С. 563–567. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-ishodnyh-dannyh-dlya-proektirovaniya-sbornyh-tortsovyh-frez>.

3. Вакулин, М. С. Особенности процессов высокоскоростного фрезерования сложнопрофильным инструментом при обработке алюминиевых сплавов и композиционных материалов / М. С. Вакулин, Ю. И. Гордеев, В. Б. Ясинский, А. С. Бинчуров, П. В. Тимошев // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24. – № 3. – С. 570–588. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-protsessov-vysokoskorostnogo-frezirovaniya-slozhnoprofilnym-instrumentom-pri-obrabotke-alyuminievyyh-splavov-i>.

4. Куц, В. В. Снижение величины неравномерности стойкости зубьев сборной фрезы-протяжки при осевом фрезеровании РК-профильных валов / В. В. Куц, В. В. Пономарев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 382–388. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-velichiny-neravnomernosti-stoykosti-zubiev-sbornoy-frezy-protyazhki-pri-osevom-frezirovanii-rk-profilnyh-valov>.

5. Попок, Н. Н. Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3d-прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – № 11. – С. 29–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-issledovaniya-rabotosposobnosti-frezernyhi-osevyh-rezhushchih-instrumentov-na-osnove-3d-prototipirovaniya>.

6. Schönecker R. I. E. et al. Fundamental Investigation of the Application Behavior and Stabilization Potential of Milling Tools with Structured Flank Faces on the Minor Cutting Edges (Фундаментальное исследование поведения при применении и потенциала стабилизации фрезерных инструментов со структурированными боковыми поверхностями на вспомогательных режущих кромках) // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2024. – Vol. 8. – N. 4. – P. 174. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4494/8/4/174>.

УДК 621.774.3: 004.942

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-17-20

О. А. Макарова, А. В. Златкевич, А. С. Губарев

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СЪЕМКИ
ПРИ РЕЗАНИИ ГОРЯЧЕГО ПРОКАТА НА РОТОРНОЙ ПИЛЕ РР 2500/2000
В УСЛОВИЯХ АО «КОРПОРАЦИЯ КРАСНЫЙ ОКТЯБРЬ»**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: olgamakarova5024@gmail.com, rabota.rab2510@gmail.com,
sanya999816@gmail.com

Настоящая работа посвящена комплексному исследованию и разработке инновационных подходов к повышению эффективности процесса резки горячего проката на роторной пиле РР 2500/2000. Исследование выполнено в условиях металлургического предприятия АО «Корпорация Красный Октябрь» и направлено на решение актуальной задачи – оптимизации производственного процесса с целью улучшения качества продукции и повышения производительности оборудования.

Ключевые слова: роторная пила, горячий прокат, резка металла, высокоскоростная съемка, производительность оборудования, снижение брака, режимы резания, анализ производства, деформация металла, износостойкость инструмента, контроль качества, технологические рекомендации, управление производственным процессом, анализ данных, качество реза

О. А. Makarova, A. V. Zlatkevich, A. S. Gubarev

**APPLICATION OF HIGH-SPEED CAMERA IN HOT ROLLS CUTTING
ON THE RR 2500/2000 ROTARY SAW IN THE CONDITIONS
OF JSC «KRASNY OKTYABR CORPORATION»**

Volgograd State Technical University

This work is devoted to a comprehensive study and development of innovative approaches to improving the efficiency of the hot-rolled cutting process on a PP 2500/2000 rotary saw. The study was performed in the conditions of the metallurgical enterprise of JSC «Krasny Oktyabr Corporation» and is aimed at solving the urgent task of optimizing the production process in order to improve product quality and increase equipment productivity.

Keywords: rotary saw, hot rolling, metal cutting, high-speed shooting, equipment performance, reduction of defects, cutting modes, production analysis, metal deformation, tool wear resistance, quality control, technological recommendations, production process management, data analysis, cutting quality

Введение

Современное металлургическое производство требует модернизации методов резки горячего проката для повышения эффективности и снижения брака. Высокоскоростная съемка (ВСС) – регистрация быстротекущих процессов с помощью специальных камер. В металлургии она применяется для анализа резания, выявления дефектов и оптимизации технологических параметров.

При резке горячекатаного металла на роторных пилах типа РР 2500/2000 использование высокоскоростной съемки позволяет детально исследовать процесс резания и выявить возможные проблемы: изучить взаимодействие инструмента с металлом; оценить влияние жесткости системы и деформаций на качество реза; выявить вибрации, неравномерный нагрев и другие отклонения; улучшить настройки обо-

рудования, снижая дефекты (заусенцы, кривизна торца); повысить безопасность, предотвращая аварии.

Цель исследования – модернизация резания горячего проката на пиле РР 2500/2000 с использованием ВСС для повышения эффективности производства.

Материалы и методы исследования

Для исследования резки горячего проката на роторной пиле РР 2500/2000 использовалась скоростная камера VS-FAST. Первоначально ее размещали на ограждениях и конструкциях, но обзор ограничивался кожухом пилы и механизмами.

Для улучшения видимости в кожухе сделано окно для вертикального наблюдения (рис. 1) а также сварена конструкция для съемки в горизонтальной плоскости (рис. 2).



Рис. 1. Наблюдение скоростной видеокамерой за биением пильного диска в процессе резания через вырезанное окно в кожухе



Рис. 2. Наблюдение скоростной видеокамерой за действием в процессе резания устройства, зажимающего разрезаемый прокат

Роторная пила РР 2500/2000 – высокотехнологичное оборудование с высокой производительностью и точностью, однако для повышения эффективности и качества резки требуется дополнительный контроль, например, высокоскоростная съемка. Параллельно проводилась видеосъемка обычной видеокамерой с покадровым исследованием полученных видеофильмов.

Результаты исследования и их обсуждение

Высокоскоростная резка горячего проката дисковыми пилами широко применяется благодаря высокой производительности и экономичности [1, 2]. Однако метод имеет недостатки:

образование заусенцев, сложность обработки тонкостенных изделий, быстрый износ дисков и повышенный шум.

Исследование выявило серьезную проблему – торцевое биение диска и его увод в сторону. Это приводит к увеличению ширины реза, ускоренному износу оборудования и снижению качества обработки.

Аналогичное исследование было проведено в работе А. И. Банникова в условиях АО «Волжский трубный завод». Для устранения заусенца было предложено изменение геометрии пилы, а наиболее важным фактором, влияющим на качество торца, является деформация основной части заготовки под действием сил резания [3, 4],

что позволило обнаружить и определить влияние угла φ на качество торца.

Проведенный комплексный анализ на производственных линиях АО «Корпорация Красный Октябрь» с применением современных методов диагностики, включая высокоскоростную видеосъемку (рис. 3), позволил выявить принципиально иные закономерности. В отличие от предыдущих исследований, было установлено, что ключевым фактором, определяющим качество торца заготовки, является деформация самого режущего инструмента (дисковой пилы). Более того, детальный анализ показал, что дан-

ное явление обусловлено не только традиционно рассматриваемой податливостью пильного диска, но и существенным снижением жесткости всего механизма вращения режущего диска, что ранее не учитывалось в теоретических моделях. Деформация пильного диска оказывает значительное влияние на качество торца заготовки. Это связано с тем, что при резании диск испытывает механические напряжения, которые могут приводить к его изгибу и смещению. Эти явления вызывают неравномерность реза и приводят к образованию дефектов на поверхности торца разрезаемой заготовки.

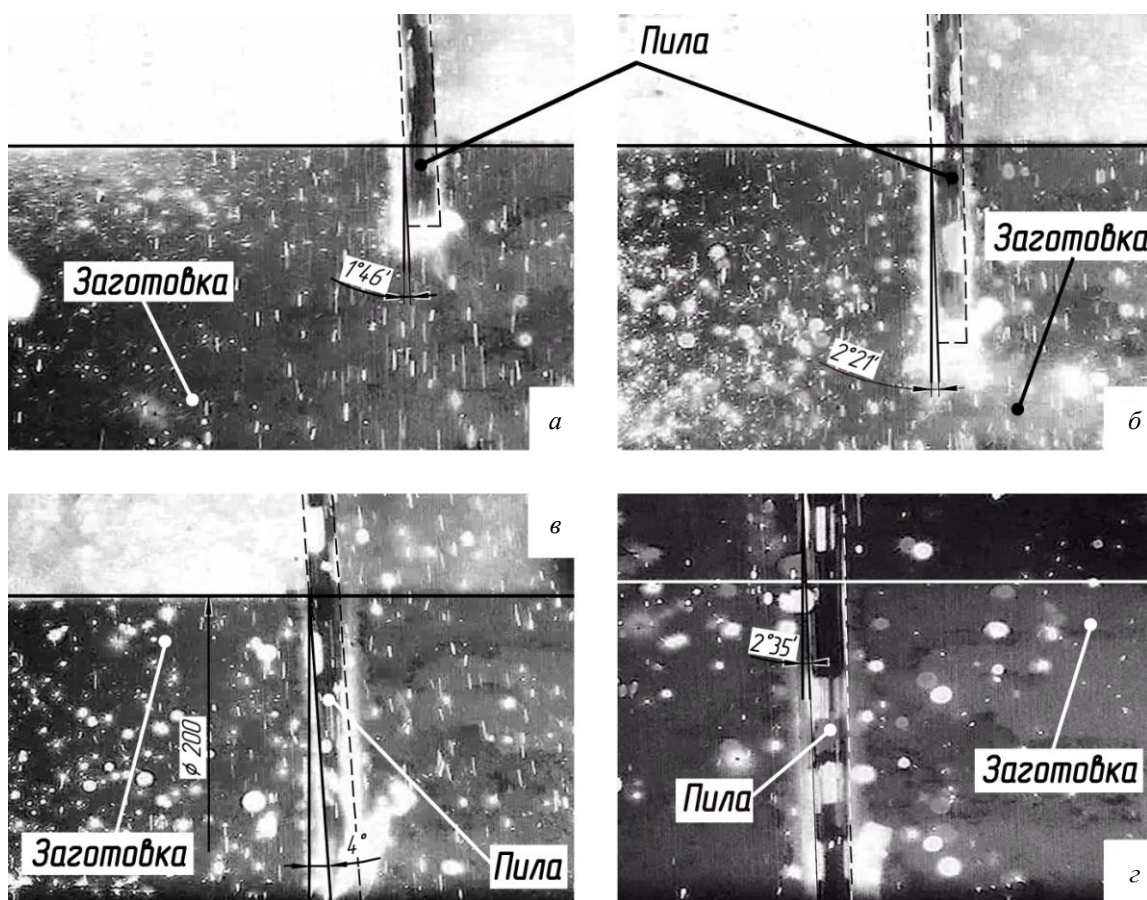


Рис. 3. Кадры съемки скоростной видеокамерой, показывающие сохранение значительного торцевого биения пильного диска в зависимости от стадии резания: а – начальная; б, в – основная; z – завершающая

Потеря жесткости механизма вращения режущего диска может ухудшить качество резания даже при идеальном состоянии диска. Это может происходить из-за износа подшипников, деформации диска, неправильной установке и балансировке.

Проведенное исследование выявило причины и способы устранения торцевого биения пильного диска.

Низкое качество материала диска приводит к низкой устойчивости к механическим нагрузкам. Это приводит к его быстрому износу и деформации. Решение заключается в использовании более прочных и устойчивых к деформации материалов.

Износ компонентов механизма вращения может снижать его общую жесткость. Решение является регулярное техническое обслуживание

(диагностика и замена подшипников), систематический мониторинг оборудования.

Механизм может терять свою жесткость из-за несоответствия реальных условий эксплуатации проектным характеристикам. Оптимизация условий работы и адаптация конструкции к конкретным условиям эксплуатации позволят избежать этих проблем.

Недостаточный контроль качества при изготовлении и сборки диска и механизма может привести к возникновению дефектов уже на ранних стадиях эксплуатации. Требуется тщатель-

ная балансировка и правильная установка диска. Контроль на всех этапах производства и монтажа поможет избежать подобных ситуаций.

Результаты исследования имеют важное практическое значение для предприятий, занимающихся резанием металлов. Они указывают на необходимость уделять больше внимания не только качеству самого режущего инструмента, но и состоянию всего механизма вращения.

Реализация этих мер позволила улучшить качество резки и продлить срок службы оборудования (рис. 4).



Рис. 4. График зависимости торцевого биения пыльного диска от диаметра заготовки для базового и усовершенствованного процесса резания

Комплексный подход к улучшению технологии резания позволит:

- улучшить точность и равномерность реза, что снизит количество дефектов и повысит качество конечной продукции;
- устранить причины деформации диска и потери жесткости;
- поддерживать оптимальную жесткость механизма и снизить износ дисков, увеличить срок службы оборудования и снизить частоту ремонтов.

Выводы

Внедрение высокоскоростной съемки доказало свою эффективность в условиях АО «Корпорация Красный Октябрь». Высокоскоростная съемка позволяет фиксировать процесс резки в реальном времени. Полученные данные могут быть использованы для повышения эффективности процесса резания, снижения затрат и повышения качества продукции. Таким образом, при-

менение высокоскоростной съемки является перспективным методом контроля и исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данченко, В. Н. Технология трубного производства : учеб. для вузов / В. Н. Данченко. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
2. Шур, И. А. Машины и агрегаты металлургического производства / И. А. Шур, Н. А. Чиченев, С. М. Горбачук. – 2009.
3. More efficient thermofrictional cutting of rolled pipe / Yu. N. Polyanchikov, A. I. Kurchenko, A. I. Bannikov and at. // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31. – № 1. – P. 88–90.
4. Банников, А. И. Теоретические основы модернизации термофрикционных пил для резки горячего трубопровода : монография / А. И. Банников ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – 135 с.
5. Анализ процесса термофрикционного резания горячего проката с использованием скоростной видеосъемки / А. И. Банников, А. А. Банников, О. А. Макарова, И. Л. Пермяков // СТИН. – 2014. – № 6. – С. 39–40. – EDN SJWAZZ.

УДК 621.774.3: 004.942

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-21-24

*О. А. Макарова, А. А. Кожевникова, Е. А. Макарова***ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИКИ РЕЗАНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ
В ОБРАБАТЫВАЕМОМ МАТЕРИАЛЕ В ЗОНЕ КОНТАКТА****Волгоградский государственный технический университет**E-mail: olgamakarova5024@gmail.com, alla.aka-78@yandex.ru,
m.lipka2015@yandex.ru

В статье рассмотрено влияние скорости резания и подачи на напряжения в поверхностном слое. Расчет проведен в программном пакете SIMULIA/Abaqus для пакетного резания заготовок из стали 45. Материал инструмента сталь 50ХГФА. Выявлены наиболее значимые параметры обработки.

Ключевые слова: напряжения, моделирование, пильный диск, метод конечных элементов, кинематика процесса резания

*О. А. Makarova, A. A. Kozhevnikova, E. A. Makarova***THE EFFECT OF CUTTING KINEMATICS ON STRESS DISTRIBUTION
IN THE PROCESSED MATERIAL IN THE CONTACT AREA****Volgograd State Technical University**

The article examines the effect of cutting speed and feed on stresses in the surface layer. The calculation was carried out in the SIMULIA/Abaqus software package for batch cutting of blanks made of 45 steel. The material of the tool is steel 50HGFA. The most significant processing parameters have been identified.

Keywords: stress, modeling, saw blade, finite element method, kinematics of the cutting process

Авторами рассматривается термофрикционное резание салазковой пилой холодного трубопроката при производстве бесшовных труб в ТПЦ – 2 АО «ВТЗ». Данный вид обработки относится к пакетной резке металлопроката дисковыми пилами и имеет широкое распространение на ряде предприятий металлургической отрасли [1, 2]. В ТПЦ – 2 АО «ВТЗ» для резки труб, поступающих из охладителя, применяется стационарная салазковая пила холодного резания. При этом производится обрезка головной и хвостовой части заготовок и разрезка труб на заданные размеры.

К особенностям термофрикционного резания зачастую относят простоту и экономичность технологического процесса. При этом недостатком этого вида обработки является повышенный износ обрабатывающего инструмента, что приводит к значительному снижению качества реза [1–3]. Процесс высокоскоростного термофрикционного резания дисковой пилой сопровождается такими явлениями, как деформация и заплывание зубьев, повышенный износ отдельной группы зубьев в процессе обработки с появлением на них поперечных трещин. Все это вызывает потерю режущих свойств обрабатывающего инструмента. Процесс также сопровождается образованием крупных заусенцев

на торцах труб, прочно прикрепленных к телу заготовки [4–6].

Для достоверного описания процессов, протекающих в зоне резания при резке проката из высоколегированных сталей решено применить численные методы (метод конечных элементов), что позволит прогнозировать результат при снижении затрат на натурный эксперимент. Обоснование необходимости модернизации геометрии профиля обрабатывающего инструмента (диска пилы) для повышения качества торца заготовок и увеличения стойкости зубьев приведено в исследованиях [7, 8], проведенных методами компьютерного моделирования.

Для моделирования процесса термофрикционного резания необходимо определить усилия, с которыми пила прижимается к обрабатываемой поверхности. Так как система управления механизмами главного движения и подачи не позволяет отследить усилия резания с требуемой точностью, определение напряжения и величины тепловыделения в процессе обработки оказывается затруднено. По этой причине в программном комплексе SIMULIA/ Abaqus произведен анализ влияния кинематических параметров резания на напряжения в зоне контакта инструмента и обрабатываемого материала с помощью методов конечных элементов.

Для расчета напряжений в контактной зоне использовался модуль Abaqus/ Explicit программного комплекса SIMULIA/ Abaqus компании Dassault Systemes). Использовался метод полностью связанного анализа термических процессов и механических напряжений (Fully coupled thermal-stress analysis), для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов с явной схемой интегрирования. Расчет проводился с использованием мо-

дели пластичности Джонсона–Кука [8], для учета изменения предела текучести материалов пила и обрабатываемого материала в результате пластического деформирования при различных температурах и скоростях.

По результатам моделирования получено распределение напряжений в зоне контакта задней поверхности зуба пила и обрабатываемого материала (рис. 1).

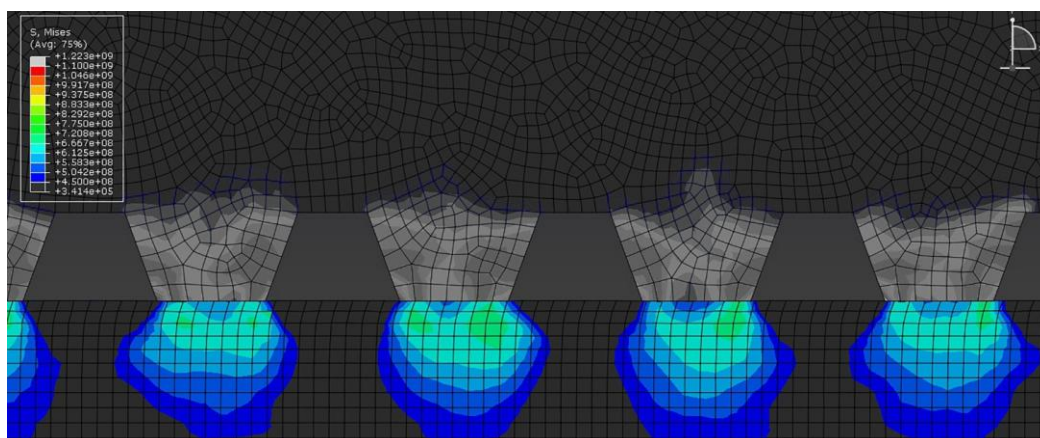


Рис. 1. Распределение напряжений в обрабатываемом материале в зоне контакта

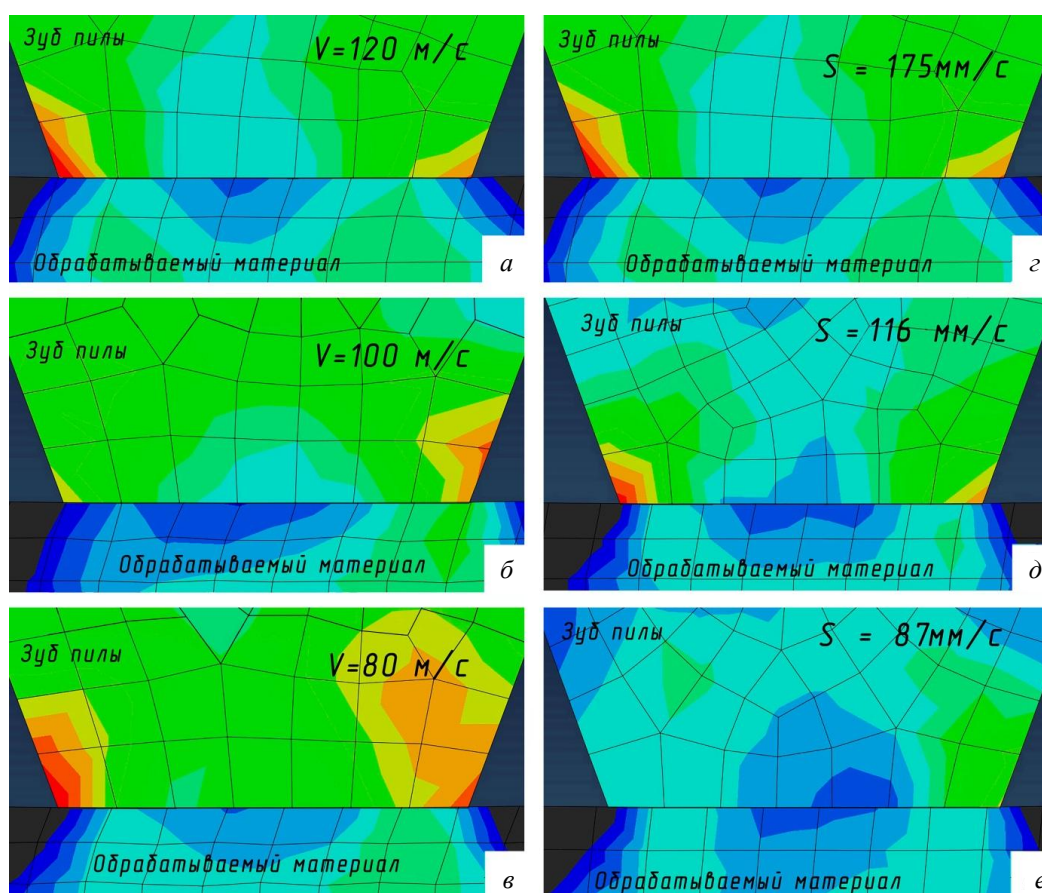


Рис. 2. Изменение напряжений в обрабатываемом материале по длине контакта с зубом пила: а, б, в – от скорости резания; г, д, е – от подачи пила

Материал инструмента сталь 50ХГФА, материал разрезаемой заготовки сталь 45. Скорость вращения пилы 80–120 м/с, величина подачи инструмента равна 0,086–0,175 м/с.

Пильный диск моделируется в виде пластины с 100 зубьями.

Размер задней поверхности зубьев, находящихся в контакте с обрабатываемым материалом, равен 3,5 мм, расстояние между зубьями

пилы 15,7 мм. Для определения среднего напряжения в обрабатываемом материале в зоне контакта было проведено интегрирование полученных значений по длине площадки контакта (рис. 2).

Расчет показал, что с увеличением скорости резания с 80 до 120 м/с величина среднего напряжения в обрабатываемом материале увеличивается с 442 до 557 МПа (рис. 2, а–в, 3).

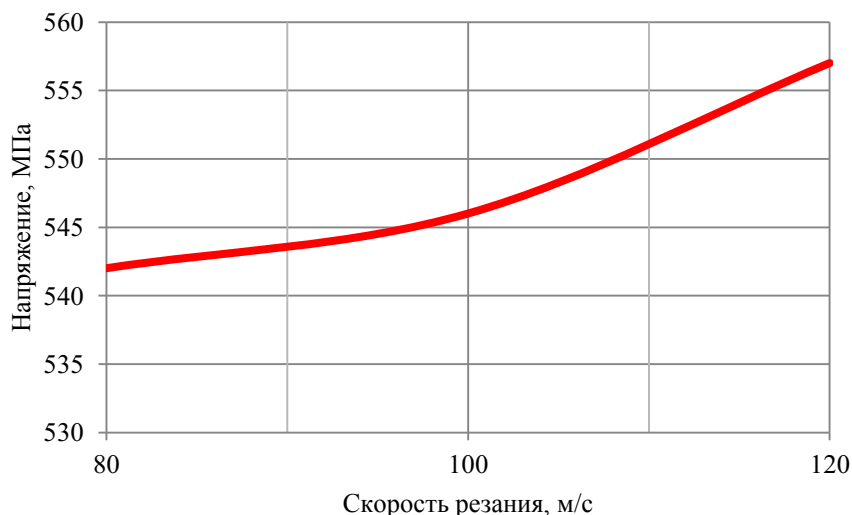


Рис. 3. Изменение напряжений в обрабатываемом материале от скорости резания

С увеличением подачи инструмента с 87 до 175 мм/с величина среднего напряжения

в обрабатываемом материале увеличивается с 534 до 557 МПа (рис. 2, з–е, 4).

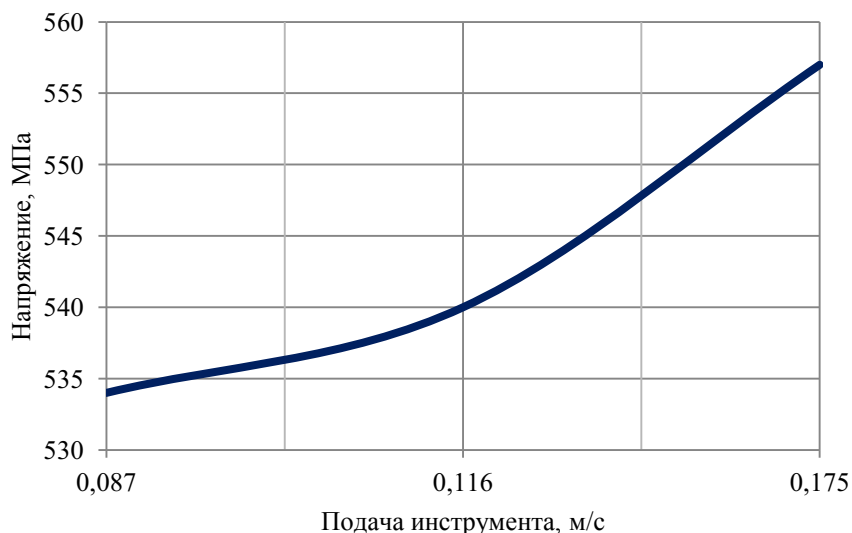


Рис. 4. Изменение напряжений в обрабатываемом материале от подачи

Полученные значения позволяют определить какую нагрузку необходимо приложить к инструменту для расчета температурных по-

лей при термофрикционном резании при данных кинематических параметрах.

Определены диапазоны нагрузок и механи-

ческих напряжений, действующих при резании с заданными скоростями и перемещениями с использованием метода конечно-элементного моделирования в пакете программ SIMULIA/Abaqus, что позволяет вести дальнейший анализ температурных полей и пластических деформаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шур, И. А. Машины и агрегаты металлургического производства / И. А. Шур, Н. А. Чиченев, С. М. Горбатьук. – 2009.
2. Данченко, В. Н. Технология трубного производства : учеб. для вузов / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
3. Ищенко, А. А. Пилы горячен резки проката. Конструкции и расчет : монография / А. А. Ищенко, Е. А. Лоза ; ГВУЗ «Приазов. госуд. техн. ун-т». – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2012. – 251 с.
4. Банников, А. И. Теоретические основы модернизации термофрикционных пил для резки горячего трубопро-

ката : монография / А. И. Банников ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – 135 с.

5. Макарова, О. А. Исследование микроструктуры заусенцев на торцах заготовок при пакетном резании дисковой фрезой / О. А. Макарова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (260) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 23–29.
6. Банников, А. И. Повышение эффективности термофрикционной резки трубопроката / А. И. Банников, А. А. Банников, А. И. Курченко, Н. А. Дятлов, И. Л. Пермяков // СТИН, 2010. – № 10. – С. 34–37.
7. Гуревич, Л. М. Моделирование высокоскоростного резания в Deform 3D / Л. М. Гуревич, А. Р. Е. Новиков, А. Г. Серов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (188) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 60–64.
8. Исследование термо-деформированного состояния зубьев пилы пакетной резки с использованием МКЭ / Л. М. Гуревич, А. И. Банников, О. А. Макарова, В. Ф. Данченко, С. П. Писарев, А. С. Губарев, Д. Шагоян, Н. В. Трутнев, А. В. Красиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (261) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 40–45.

УДК 62-408.8

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-24-27

Н. В. Некипелов, Ю. С. Багайсков, Д. М. Шарабаев

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДРОБЕМЕТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ СВАРНЫХ ТРУБ

Волжский политехнический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

E-mail: nekipelov2001@gmail.com, bagaiskov@bk.ru, vto@post.volpi.ru

Стальные трубы для транспортировки нефтегазовых материалов работают условиях агрессивных сред. Для защиты их поверхности применяют покрытия. При этом необходима подготовка поверхности. Дробеметный метод имеет наибольшее применение, у него много преимуществ. В качестве абразивных частиц для обработки используется в основном стальная колотая дробь различной твердости. Для лучшего закрепления покрытия на стальных поверхностях необходимо иметь повышенную развитую шероховатость. Показана зависимость шероховатости от твердости дроби. При дробеметной обработке происходит разрушение дроби, меняются размеры и форма ее частиц, производится сепарация и добавление частиц. Показано, что фактически в рабочей зоне обработки находится смесь различных фракций.

Ключевые слова: трубы, покрытия, дробь, твердость, разрушение, шероховатость

N. V. Nekipelov, Yu. S. Bagaiskov, D. M. Sharabaev

ANALYSIS OF FEATURES OF SHOT BLASTING PROCESSING OF THE SURFACE OF WELDED STEEL PIPES

**Volzhsky Polytechnic Institute (branch)
of Volgograd State Technical University**

Steel pipes for transportation of oil and gas materials operate in aggressive environments. To protect their surface, coatings are used. In this case, surface preparation is necessary. Shot blasting is the most widely used method, it has many advantages. Steel grit of various hardness is mainly used as abrasive particles for processing. For better fixation of coatings on steel surfaces, it is necessary to have increased developed roughness. The dependence of roughness on the hardness of the shot is shown. During shot blasting, the shot is destroyed, the size and shape of its particles change, separation and addition of particles is performed. It is shown that in fact in the working zone of processing there is a mixture of different fractions.

Keywords: pipes, coatings, shot, hardness, destruction, roughness

Эксплуатация труб для транспортировки нефтегазовых материалов проходит в условиях агрессивных сред, значительных механических нагрузок и перепадов температур. При этом подготовка поверхности перед нанесением антикоррозионного покрытия является необходимой стадией в технологическом цикле их нанесения. Повышение адгезии покрытия к поверхностям может уменьшить скорость коррозии, увеличить срок службы покрытия и труб.

Подготовка поверхности труб перед нанесением покрытий включает несколько этапов, таких как очистка поверхности основы от адсорбированных загрязнений и оксидных пленок, обезжиривание и создание микрорельефа с определенной шероховатостью. Существуют различные методы очистки поверхности труб, среди которых наиболее известны абразивно-пневматический (дробеструйный) и абразивно-центробежный (дробеметный) способы. Различаются они источниками энергии, сообщаемого движение зернам абразива. Кроме того в промышленности применяют комбинированные методы очистки, например абразивно-пнеуможидкостный, абразивно-пнеумоцентробежный и др. [1].

Дробеметная обработка основана на принципе центробежного ускорения абразивных частиц, которые с высокой скоростью воздействуют на поверхность трубы. Этот метод имеет несколько ключевых преимуществ:

- позволяет достичь равномерного микрорельефа поверхности, что способствует улучшению адгезии покрытия;
- создаются остаточные напряжения сжатия, которые повышают усталостную прочность и коррозионную стойкость [2];
- позволяет обрабатывать большие объемы труб с высокой скоростью.

Выбор абразивного материала играет ключевую роль в эффективности обработки. В качестве частиц абразива применяют металлические частицы (дробь), классифицируемые по химическому составу, структуре металла, форме, размерам и твердости [3]. Химсостав: углерода 0,8–1,2 %, Mn и Si по 0,5–0,7%. Для дробеметной обработки применяют следующие виды таких абразивов:

- литая стальная дробь, имеет оптимальную твердость и качество обработки, дольше сохраняет сферическую форму в рабочей смеси,
- колотая стальная дробь, изготавливается из литой дроби дроблением, выпускаются три

основных группы, отличающиеся по твердости: GP, GL и GH,

- чугунная дробь, хорошо справляется с очисткой поверхностей от ржавчины или окалины, но плохо удаляет клейкие загрязнения и плотные наслоения, износостойкость в несколько раз ниже, чем у стальной,

- керамическая дробь, применяется для обработки поверхностей, требующих высокой точности и минимального износа оборудования,

- дробь на основе рубленой стали, предназначена для очистки особо твердых металлических конструкций, вследствие высокой прочности может использоваться несколько раз,

- алюминиевая дробь, обработка мягких металлов, не повреждает структуры, убирают накипь, тонкие слои ржавчины, окалины и нагара,

- дробь на основе стекла, имеет вид сверхпрочных стеклянных шариков, без вредных примесей, предназначены для многократной обработки металлических изделий со средней прочностью.

К технологическим параметрам дробеметной обработки относятся: скорость дроби, размер и форма частиц дроби, время обработки.

Оптимальная скорость частиц составляет 60–80 м/с. Увеличение скорости приводит к более интенсивной обработке, но может вызвать перегрев поверхности [4]. Чем меньше дробь и большее количество ее частиц содержится в килограмме рабочего продукта, тем выше скорость очистки поверхности. При увеличении размера частиц растет количество выступов и углублений на поверхности, увеличивается шероховатость поверхности стали и адгезия покрытия, но скорость очистки снижается [4].

Если частицы имеют близкую к сферической форму, то на поверхности образуется больше впадин меньшей глубины. При более угловатой форме частиц обработанная поверхность будет более шероховатой с глубокими впадинами, но некоторые мелкие частицы могут даже проникать в поверхность. Увеличение времени обработки может привести к повышению температуры поверхности, а также к уменьшению шероховатости и прочности адгезии покрытия.

Дробеметные аппараты нагнетательного типа могут быть периодического и непрерывного действия. Первые имеют рабочую камеру с определенной порцией частиц абразива, после расхода этой порции ее останавливают и перезаряжают. Использование аппаратов непрерыв-

ного действия или двухкамерных позволяет избежать необходимости остановок технологического процесса очистки для наполнения камеры абразивом [1].

Анализ и опыт показывают, что качество подготовки поверхности труб напрямую влияет на адгезию покрытия, чаще всего полимерного. В частности ключевым параметром шероховатости поверхности является R_z . В принципе увеличение R_z способствует улучшению адгезии. Однако чрезмерная шероховатость может привести к образованию острых пиков, которые могут стать зонами развития коррозии. Поэтому важно подбирать оптимальные параметры установки, дробы и процесса обработки, чтобы достичь баланса между шероховатостью и адгезией [5].

Кроме того, на ряде образцов труб с уже нанесенным покрытием обнаруживаются частицы металлической дробы, зачеканенной в поверхность при обработке и не удаленной до нанесения покрытия.

Анализ исследований с применением разных видов стальной дробы показал следующее. Колотая дробь WGP имеет твердость 40–52 HRC и создает более остроугольную и выраженную шероховатость поверхности (R_z на 15 % выше, чем у литой дробы). Дробь колотая WGL имеет твердость 53–57 HRC. R_z незначительно выше (2–5 %), чем у дробы GP, но профиль поверхности значительно более развитый, что повышает адгезию покрытия. Колотая дробь WGH имеет твердость более 62 HRC и дает максимальные R_z (в среднем на 20–25 % больше, чем у GP и GL). Вследствие высокой твердости и повышенной склонности к раскалыванию, всегда сохраняет остроугольную форму в рабочей смеси, обладая при этом максимальной производительностью и самым коротким жизненным циклом по сравнению с другими марками дробы [3]. На рис. 1 приведены данные по твердости и достигаемой шероховатости при дробе-метной обработке различными видами стальной дробы.

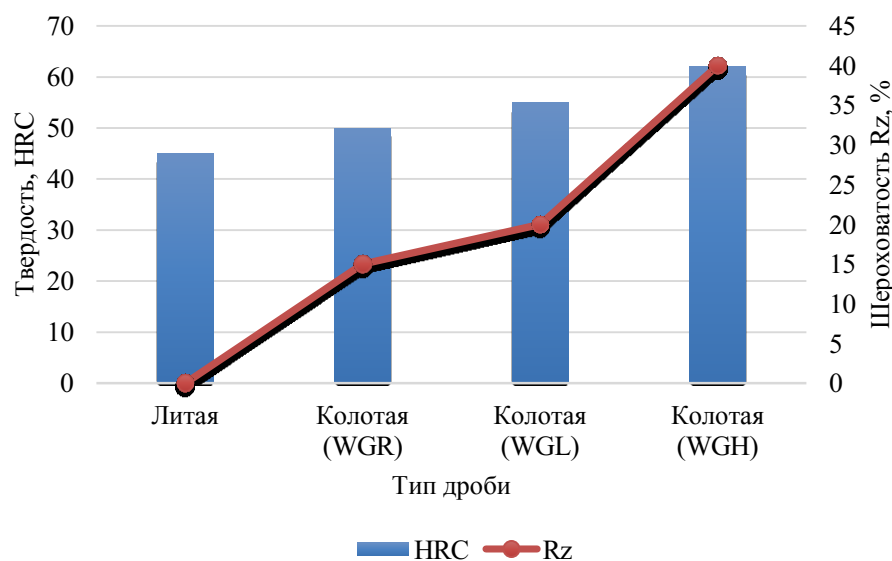


Рис. 1. Твердость и шероховатость различных типов стальной дробы

На данных из графика прослеживается четкая корреляционная зависимость шероховатости от показателей твердости дробы. Максимальные значения R_z для дробы WGH объясняются способностью ее высокотвердых частиц создавать выраженный рельеф на обрабатываемой поверхности.

Из-за удара частиц дробы и их раскола производится добавление и смешивание частиц

в сепараторе дробе-метной установки. Реальная смесь состоит из мелких и крупных фракций. При сетевом анализе по размерам частиц состав смеси должен примерно соответствовать схеме на рис. 2.

В целом проведенный анализ показывает, что дробе-метный метод имеет наибольшее применение при подготовке поверхностей стальных труб перед нанесением покрытий.

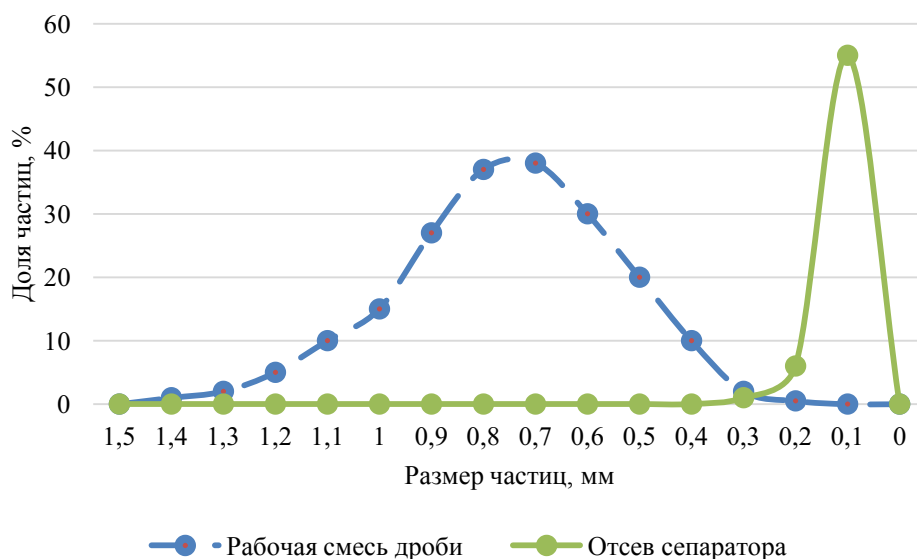


Рис. 2. Гранулометрический состав дробы и отсева при настройке сепаратора

В качестве абразивных частиц используется в основном стальная колотая дробь различной твердости. Лучше всего закрепляются покрытия на стальных поверхностях с повышенной развитой шероховатостью. Показана зависимость шероховатости от твердости дробы. Кроме того играет роль и размерность частиц дробы, их форма. Установлено, что при дробеметной обработке происходит разрушение дробы и фактически в рабочей зоне находится смесь различных фракций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горанский, Г. Г. Разработка технологий и оборудования для подготовки поверхности в УП «Технопарк БНТУ «Метолит» / Г. Г. Горанский, Э. Н. Толстяк, В. В. Саранцев // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 37. – С. 165–169.

2. Карпиков, А. В. Повышение коррозионной стойкости буровых труб дробеударной обработкой / А. В. Карпиков, Н. А. Буглов, В. А. Захаров, В. Н. Москвитин // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН*. – 2011. – № 39. – С. 228–230.

3. Габбасов, А. Ф. Выбор абразивного материала для механической очистки металлических поверхностей / А. Ф. Габбасов, А. Р. Мутигуллин, О. А. Кузнецова // *Инновационные подходы в решении проблем современного общества*. – 2018. – С. 228–230.

4. S. Khorasanizadeh The Effects of Shot and Grit Blasting Process Parameters on Steel Pipes Coating Adhesion // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. – 2010. – № 44. – С. 1493–1501.

5. Теплухин, В. Г. Повышение надежности и долговечности труб буровых установок, эксплуатируемых в условиях холодного климата / В. Г. Теплухин, А. Н. Карандашев, С. Н. Михайлов, С. Б. Ермаков // *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке*. – 2021. – С. 228–230.

УДК 621.7.04

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-27-31

Ю. К. Павлов, В. А. Терехин, Ю. Л. Чигиринский

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ШТАМПОВКИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ОТВОДОВ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru, terehin.man@mail.ru; julio-tchigirinsky@yandex.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с технологическим и инструментальным обеспечением промышленного производства толстостенных фитингов для нефте- и газопроводов. Одной из проблем при производстве названного класса деталей нефтехимического машиностроения является неравномерность толщины стенки изделия, возникающая на операциях гибки исходной заготовки за счет интенсивного растяжения «наружной» и сжатия «внутренней» стенок трубы. Предложена технология штамповки, обеспечивающая возможность изготовления детали типа «отвод» с минимальной разностенностью.

Ключевые слова: толстостенные отводы, формообразование методом штамповки, торовая оболочка, разностенность

Yu. K. Pavlov, V. A. Terekhin, Ju. L. Tchigirinsky

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF STAMPING THE THICK-WALLED BENDS

Volgograd State Technical University

The issues related to the technological and instrumental support of industrial production of thick-walled fittings for oil and gas pipelines are considered. One of the problems in the production of this class of petrochemical engineering parts is the uneven wall thickness of the product, which occurs during the operations of bending the initial billet due to intensive stretching of the "outer" and compression of the "inner" walls of the pipe. A stamping technology is proposed that provides the possibility of manufacturing a part of the "tap" type with a minimum wall thickness.

Keywords: thick-walled bends, forming by stamping, torus shell, wall thickness

Отвод – общее название класса деталей трубопровода, предназначенных для отвода транспортируемого потока от прямой трубы [1]. Технологические условия эксплуатации технологических трубопроводов различного назначения предполагают возможные значения внутреннего давления (P_y) от глубокого вакуума до 250 Мпа, при температуре рабочей среды в интервале $[-250\text{ }^{\circ}\text{C}; +700\text{ }^{\circ}\text{C}]$ и более. Среднестатистические нормы [1] расхода (по массе) типовых деталей при монтаже стальных технологических

трубопроводов составляют: прямых труб 63..64 %, отводов 18..20 %. Оставшиеся 17..18 % массы трубопровода приходятся на различного рода арматуру: запорную, регулирующую, крепежную и т. п. В сравнении с отводами различной конфигурации, прямые трубы представляют собой изделия более технологичные. Как следствие, обеспечение качества продукции при изготовлении отводов является важной производственной задачей, определяющей работоспособность трубопровода, в целом.

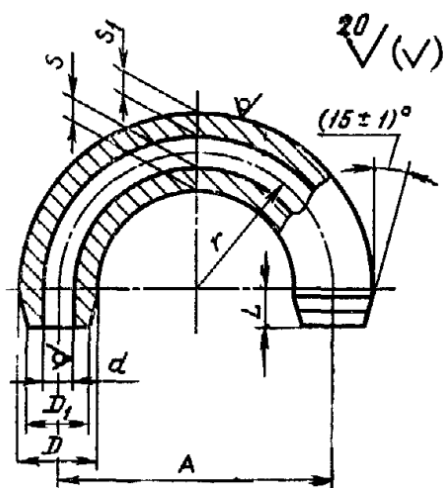


Рис. 1. Эскиз и общий вид отвода «колено двойное» [2]

В данной работе мы рассматриваем технологические особенности изготовления толстостенных отводов типа «колено двойное» [2, 3], содержащих два прямолинейных и один криволинейный участок (рис. 1). Угол поворота потока в таком отводе составляет 180° . Криволинейный участок представляет собой полутору с радиусом кривизны оси r , наружным и внутренним диаметрами, соответственно, D и d . Расчетный средний радиус трубы:

$$r_1 = 0,25(D + d). \quad (1)$$

Толщины стенок криволинейного участка составляют, соответственно, S (внутренняя) и S_1 (наружная). В расчетах на прочность [4]

принимается допущение о равенстве толщин наружной и внутренней стенок: $S = S_1$. Второе допущение предполагает, что расчет полуторного криволинейного участка допустимо выполнять [4] как для сферической (2) или цилиндрической (3) оболочек, вводя соответствующие поправочные коэффициенты:

$$m_c = (2r \pm 0,5d) / (r \pm 0,5d), \quad (2)$$

$$m_{cy} = (2r \pm 0,5d) / 2 \cdot (r \pm 0,5d), \quad (3)$$

где знак «+» – поправка на толщину внутренней стенки (утолщение), знак «-» – на толщину наружной стенки (утонение).

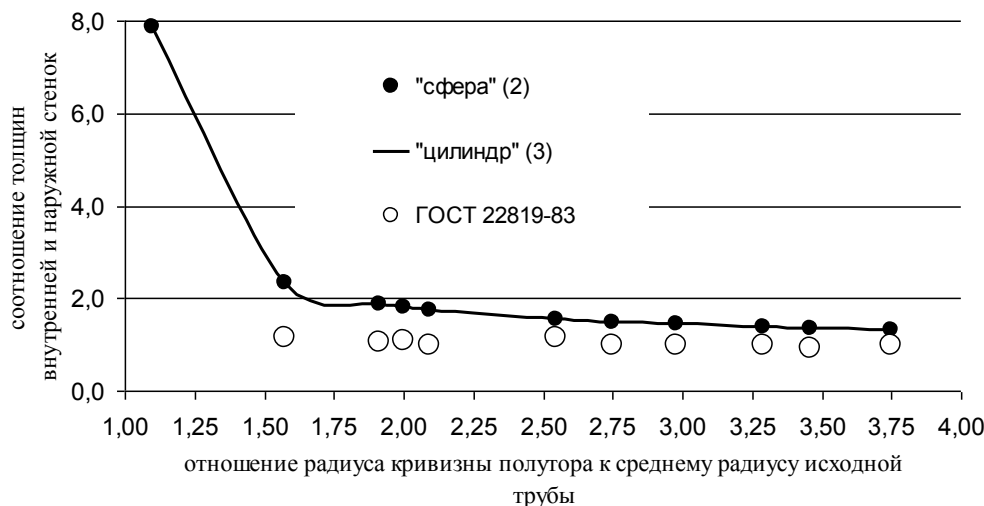


Рис. 2. Изменение толщины стенки полутора

Отметим, что поправочные коэффициенты (2, 3) не учитывают: (1) влияние угла отвода потока, который может составлять от $22,5^\circ$ до 180° и должен существенно влиять на утонение внешней стенки колена и, соответственно, на утолщение внутренней стенки; (2) не чувствительны к способу коррекции толщины стенок

ки — и «сфера» (2) и «цилиндр» (3) дают одинаковое соотношение толщин внутренней и наружной стенок (рис. 2, таблица). Также заметим, что нормативная документация [2] не учитывает влияние технологии изготовления (гибка трубы вальцовкой) на разностенность (рис. 2, таблица) изделия.

Изменение толщины стенки полутора

Способ расчета	отношение радиуса кривизны полутора к среднему радиусу трубы														
	1,10	1,57	1,91	2,00	2,10	2,50	2,55	2,75	2,98	3,00	3,25	3,29	3,46	3,50	3,75
«сфера» (2)	7,87	2,33	1,87	1,80	1,74	1,56	1,54	1,48	1,43	1,43	1,39	1,38	1,35	1,35	1,32
«цилиндр» (3)	7,87	2,33	1,87	1,80	1,74	1,56	1,54	1,48	1,43	1,43	1,39	1,38	1,35	1,35	1,32
ГОСТ [2]	—	<i>1,14</i>	<i>1,07</i>	<i>1,08</i>	<i>1,00</i>	—	<i>1,16</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	—	—	<i>1,00</i>	<i>0,93</i>	—	<i>1,00</i>

Примечание: курсивом выделены значения, приведенные в ГОСТе [2]

На практике, при гибке труб, за счет интенсивного растяжения металла на внешней стенке и сжатия на внутренней, разностенность может достигать 30..45 % и более — при малом различии радиусов кривизны колена и исходной трубы до 1,74...2,33 крат. При этом возникает нецилиндричность внутренней полости колена — различие между наибольшим и наименьшим диаметрами в поперечном сечении отверстия доходит до 15 %. Как результат увеличивается гидравлическое сопротивление отвода и, за счет утонения, а, соответственно и снижения прочности, уменьшается предельно допустимое рабочее давление — в ряде случаев, до 4 крат.

Очевидно, что основная причина описанной проблемы определяется именно технологией изготовления отвода: если в качестве исходной заготовки используется цилиндрическая труба с соосными наружной и внутренней поверхно-

стями, то в результате изгиба будет получаться колено с существенной разностенностью.

Для уменьшения разностенности необходимо изменить направление действия сил, прикладываемых к исходной заготовке. Альтернативой технологии гибки можно считать штамповку из плоского листа (рис. 3) с последующей сваркой верхней и нижней частей изделия [5].

Необходимость двух сварных швов: по наружной и внутренней направляющим оболочками, — предусмотренная рассмотренными способами (рис. 3) штамповки верхней и нижней полуформ криволинейного участка отвода, обуславливает определенное ослабление конструкции изделия. При этом, разностенность криволинейного участка колена и некруглость поперечного сечения существенно снижается. В частности, разностенность уменьшается от 45 до 30 %.

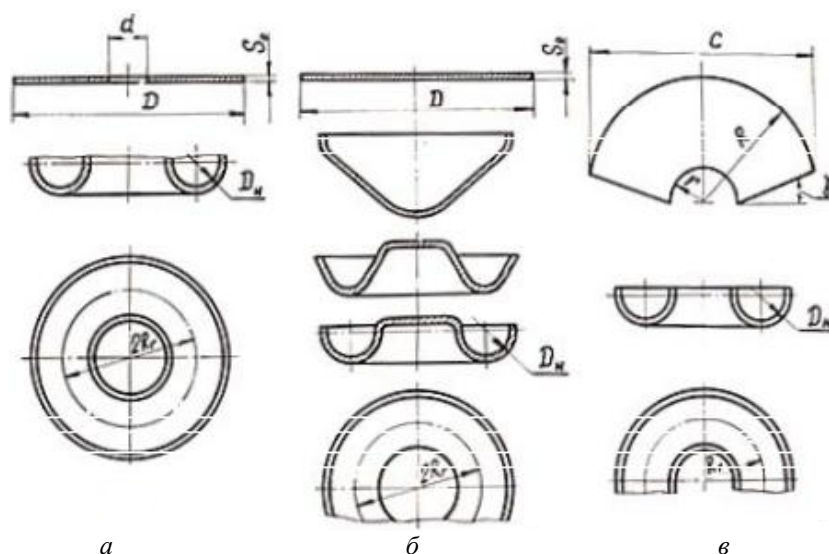


Рис. 3 Способы штамповки полуторов и отводов из листовых заготовок:
а – кольцеобразной; б – круглой; в – секторной

Способ уменьшения разностенности предполагает замену технологии раздельной штамповки верхней и нижней половин колена (рис. 3) на штамповку-«сворачивание» цельной полуторовой оболочки из плоской заготовки, которая представляет собой развертку (рис. 4, а) полутора с радиальными вырезами по боковой поверхности, что позволяет изменить направление приложения сил при выполнении операции (рис. 4, б) штамповки.

После сворачивания полуторовой оболочки

выполняется сварка по радиальным разрезам на боковой поверхности.

В результате изменения способа штамповки – (1) изменение направления приложения нагрузки [6]; (2) выполнение операции в четыре этапа [7] и, как следствие, снижение интенсивности приложения нагрузки, – обеспечивается уменьшение разностенности криволинейного участка изделия «колесо двойное» от 30 % – при традиционной штамповке [5] двух полуформ (рис. 3) до 3 % (рис. 4).

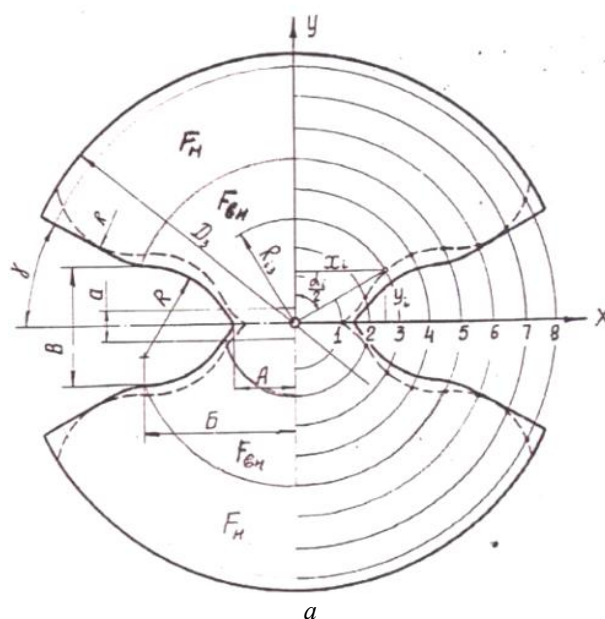
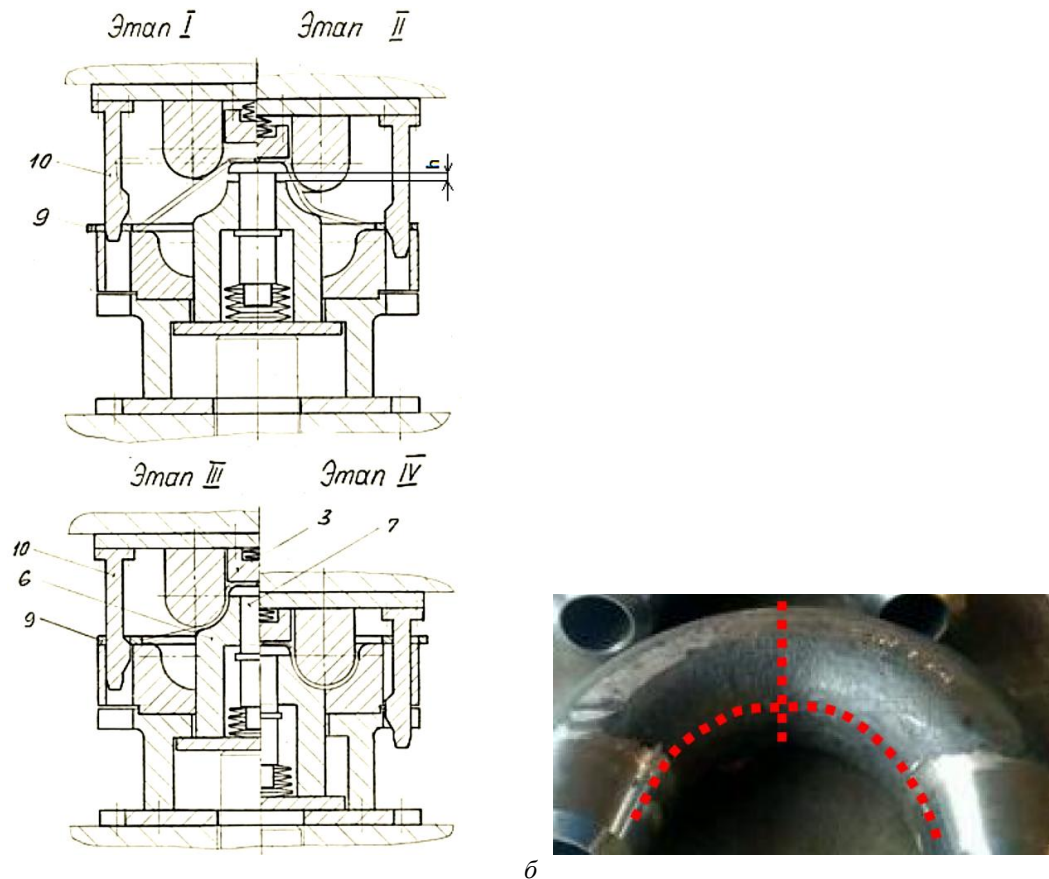


Рис. 4. Схема формирования полуторовой цельной криволинейной части отвода штамповкой из листа:
а – схема развертки боковой поверхности полутора [6] на плоскость; б – схема штамповки [7] полутора из заготовки с радиальными вырезами по боковой поверхности с последующим завариванием боковых вырезов (расположение сварных швов выделено цветом) (см. также с. 31)



б

Рис. 4. Окончание

Существенное снижение разностенности определяется тем, что изгибу при формообразовании подвергается не жесткая труба (радиус изгиба сравним с радиусом изгибаемой трубы), а плоский лист (толщина листа кратно меньше радиуса изгиба). Соответственно, поправочные коэффициенты на изменение толщины листа (2, 3) определяются только радиусом изгиба.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тавастшерна, Р. И. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов / Р. И. Тавастшерна. – М.: Высшая школа, 1983.
2. ГОСТ 22819–83. Сборочные единицы и детали трубопроводов. Колена двойные на Ру св. 10 до 100 МПа (св. 100 до 1000 кгс/см кв.). Конструкция и размеры. – М.: Изд. Стандартов, 1991.
3. ГОСТ 22790–89. Сборочные единицы и детали трубопроводов на Ру свыше 10 до 100 МПа (свыше 100 до 1000 кгс/см²). Общие технические условия. – М.: Изд. Стандартов, 1989.
4. Справочник машиностроителя. В 6 т. Т. 1, 3 / под ред. Н. С. Ачеркана. – М.: Машгиз, 1962.
5. Лукьянов, В. П. Штампы для крутоизогнутых отводов. Основные технические параметры и типовые конструкции / В. П. Лукьянов, Ю. К. Павлов // РТМ 26 3-70. Руководящий технический материал. – М.: Минхимнефтемаш, 1970.
6. А. с. № 767446, от 13.02.74. Толстостенный крутоизогнутый отвод / Ю. К. Павлов; Бюл. № 36 от 30.09.80.
7. А. с. № 439327 от 02.04.1973. Штампы для изготовления заготовки торовой оболочки / Ю. К. Павлов; Бюл. № 30 от 15.08.1974.

УДК 621.91.01

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-32-34

*А. А. Севастьянов***СИЛОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ
С РАЗЛИЧНЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРНА****Тольяттинский государственный университет**

E-mail: alex-119977@yandex.ru

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований фрезерования низколегированной стали с различным размером зерна.

Ключевые слова: диагностика процесса резания; ультрамелкозернистая структура; вибрации; концевое фрезерование; низколегированная сталь

*A. A. Sevastyanov***FORCE FEATURES OF MILLING OF LOW-ALLOY STEEL
WITH DIFFERENT GRAIN SIZE****Togliatty State University**

The article presents the results of experimental studies on the milling of low-alloy steel with different grain size.

Keywords: cutting process diagnostics; ultrafine-grained structure; vibrations; end milling; low-alloy steel

Одним из наиболее перспективных направлений современного материаловедения является исследование свойств объемных наноструктурированных металлических материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой [1, 2]. Однако, несмотря на нарастающий интерес к таким материалам со стороны исследователей и инженеров, имеется недостаток данных об

обрабатываемости резанием материалов с УМЗ структурой.

Для получения новых данных проведен эксперимент по концевому фрезерованию заготовок с различным размером зерна. В качестве исследуемого материала была выбрана малоуглеродистая низколегированная сталь 09Г2С ГОСТ 19281–2014 (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав стали 09Г2С (в % по массе)

Сталь	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	Cu	Fe
09Г2С	0,09	0,64	1,26	0,007	<0,003	0,1	0,08	0,02	0,14	Ост.

Исследовали два образца размерами 40×15×10 мм, каждый в одном из двух состояний: состоянии поставки с крупнозернистой (КЗ) структурой и после равноканального углового прессования (РКУП) по схеме «Конформ» (РКУП-К) с УМЗ структурой.

Технология РКУП-К включала в себя: гомогенизирующий отжиг стали при 820 °С с после-

дующей закалкой в воде + отпуск при 350 °С + холодное РКУП-конформ, 4 прохода по маршруту Вс + дополнительный отжиг при 350 °С с выдержкой 10 мин. Более подробно технология получения и свойства УМЗ стали приведены в [3, 4].

Механические свойства стали 09Г2С до и после РКУП-К приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Средний размер зерна (d_{cp}) и механические свойства стали 09Г2С
в различном состоянии**

Состояние стали	d_{cp} , мкм	НВ	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Исходное (КЗ состояние)	20	143	485±3,0	354±11	25±1,8
После РКУП-К (УМЗ состояние)	0,45	331	838±12	655±44	10±1,5

Эксперимент проведен на универсально-фрезерном станке PROMA FHV-50PD. Обработку заготовок проводили твердосплавной фрезой 12-12D-30C-75L-4F HRC55. В ходе обработки охлаждение не использовалось. Смещения фрезы регистрировались проксиметром

Bently Nevada. Датчик установлен напротив фрезы в направлении подачи заготовки. Измерялись статическое смещение фрезы Δ и размах колебаний r при резании (рис. 1). Результаты эксперимента приведены в табл. 3.

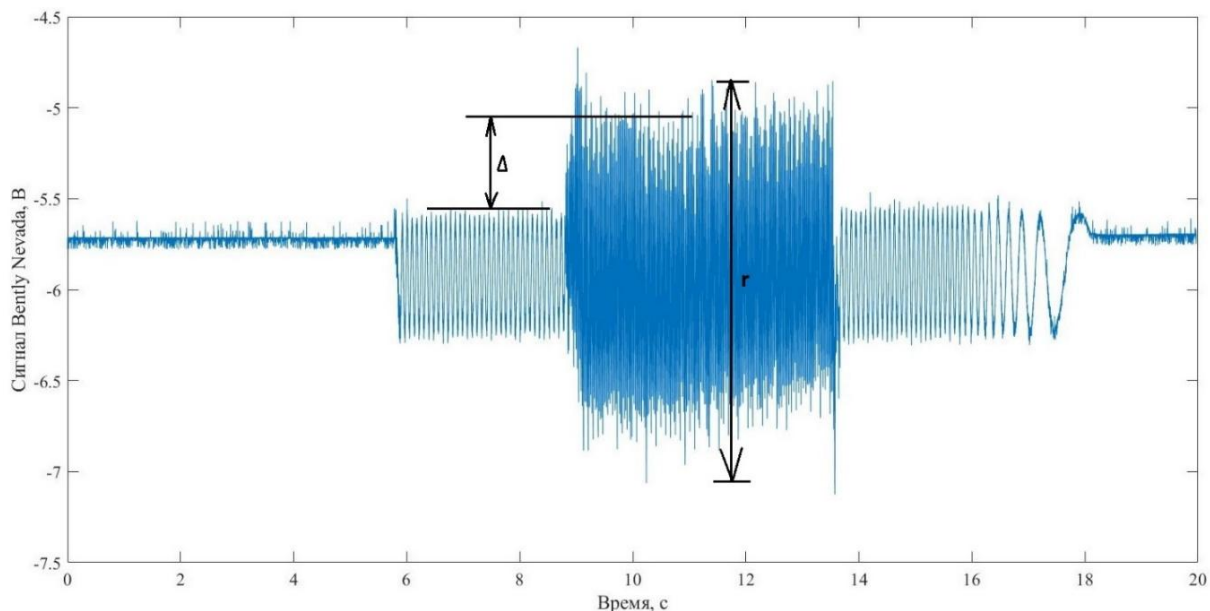


Рис. 1. Сигнал Bently Nevada (образец № 7)

Таблица 3

Результаты эксперимента

№	Материал заготовки	n, об/мин	s, мм/мин	t, мм	Δ , мкм	r, мкм
1	09Г2С КЗ	720	65	0,6	21	99
2	09Г2С КЗ	875	65	0,8	7	94
3	09Г2С КЗ	720	65	1,0	17	112
4	09Г2С КЗ	720	100	0,6	28	107
5	09Г2С КЗ	875	100	1,0	32	122
6	09Г2С КЗ	720	470	0,6	70	208
7	09Г2С КЗ	720	470	1,0	70	269
8	09Г2С КЗ	875	470	0,8	44	189
9	09Г2С КЗ	875	185	0,6	34	116
10	09Г2С КЗ	720	65	0,8	30	107
11	09Г2С УМЗ	720	65	0,6	23	76
12	09Г2С УМЗ	875	65	0,8	45	82
13	09Г2С УМЗ	720	65	1,0	46	81
14	09Г2С УМЗ	720	100	0,6	49	86
15	09Г2С УМЗ	875	100	0,8	56	72
16	09Г2С УМЗ	875	100	1,0	43	97
17	09Г2С УМЗ	720	185	0,6	76	80
18	09Г2С УМЗ	875	185	0,8	69	112
19	09Г2С УМЗ	875	185	1,0	80	113

Полученные данные можно использовать для обучения статистической модели распозна-

вать по сигналу с проксиметра тип обрабатываемого материала (рис. 2).

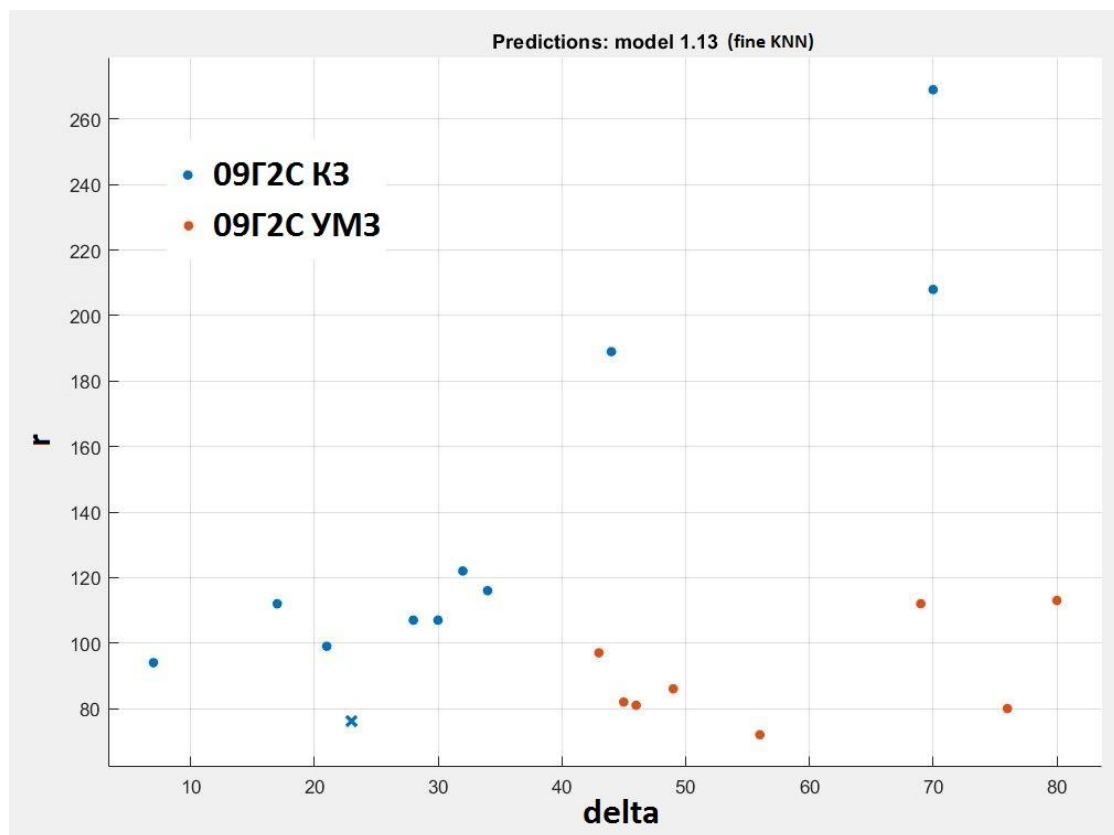


Рис. 2. Результат обучения модели

Так, на рис. 2 приведены результаты обучения модели fine KNN классификации данных. Обучение проводилось в программе Classification Learner MATLAB. Как видно из рис. 2, модель ошибается только в одном случае из 19, что дает точность обучения в 94,7 %.

Таким образом, для обработки стали 09Г2С в крупнозернистом состоянии характерны высокие значения динамической составляющей силы резания, в то время как для той же стали в ультрамелкозернистом состоянии характерны высокие значения статической составляющей. Данная закономерность может быть полезна для диагностики процесса резания низколегированной стали с различным размером зерна, а также для оптимизации режимов обработки. Для решения данных задач можно также использовать данные о температурах резания стали с различным размером зерна, которые ранее были получены автором [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Elias C.N., Meyers M.A., Valiev R.Z., Monteiro S.N. Ultra fine grained titanium for biomedical applications: an overview of performance. // J Materials Res Technol. 2013. Vol. 2, № 4. P. 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.07.003>
2. Latysh V., Krallics G., Alexandrov I., Fodor A. Application of bulk nanostructured materials in medicine. // Curr Appl Phys. 2006. Vol. 6, № 2. P. 262–266. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2005.07.053>
3. Merson E.D., Myagkikh P.N., Klevtsov G.V., Merson D.L., Vinogradov A. Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel // Engineering Fracture Mechanics. 2019. V. 210. P. 342–357. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.05.026>
4. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014. 440 p. DOI:10.1002/9781118742679
5. Распоргуев, Д. А. Исследование температуры конечного фрезерования низколегированной стали в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях / Д. А. Распоргуев, А. А. Севастьянов, Г. В. Клевцов // Frontier Materials & Technologies. – 2024. – № 1. – С. 61–69.

УДК 658.6

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-35-38

*Н. В. Устин, П. А. Норченко, А. А. Кожевникова, Р. С. Карасев***РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕННОСТИ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ» ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: nustin@bk.ru, norchenko.p.a@yandex.ru, alla.aka-78@yandex.ru, karasikroma@yandex.ru

Весовое оборудование является одним из наиболее востребованных во всех производственных сферах и сферах обращения продукции. В настоящее время насчитывается более 250 производителей весов, работающих на территории Российской Федерации, более 1000 разновидностей и модификаций. Конкурентная борьба за качество и потребителя обеспечивает применение современных инструментов инжиниринга качества продукции. В статье рассмотрено применение метода структурирования функций качества (QFD) для целей создания весового оборудования, отвечающего принципу «потребительской ценности».

Ключевые слова: конкурентоспособность продукции, структурирование функций качества, QFD-метод, метрологические характеристики весов, создание ценности, инжиниринг качества

*N. V. Ustin, P. A. Norchenko, A. A. Kozhevnikova, R. S. Karasev***IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLE "DEFINING THE VALUE OF PRODUCTS FOR THE CONSUMER" IN THE DESIGN OF WEIGHING EQUIPMENT****Volgograd State Technical University**

Weighing equipment is one of the most in-demand in all production and product circulation areas. Currently, there are more than 250 weigh-scale manufacturers operating in the Russian Federation, more than 1000 varieties and modifications. The competitive struggle for quality and the consumer is provided by the use of modern tools for engineering product quality. The article discusses the application of the Quality Function Deployment (QFD) method for the purpose of creating weighing equipment that meets the principle of "consumer value".

Keywords: product competitiveness, quality function deployment, QFD method, measurement equipment, creating value, quality engineering

Весовое оборудование и весоизмерительная техника широко используется в различных сферах деятельности без исключения. В настоящее время в Российской Федерации принят стандарт ГОСТ Р 53228–2008 «Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания» [1], разработанный на основании положений документации Международной организации законодательной метрологии (далее – МОЗМ), определяет основные термины и определения весового оборудования, основные компоненты устройства, метрологические характеристики и свойства весов, параметры классификации весов, правила определения погрешностей и допускаемых расхождений между результатами, а также методики проведения испытаний и оценки погрешности.

Несмотря на наличие общих требований к весовому оборудованию, на рынке существует большое число предложений, которые отличаются по различным показателям. При написании настоящей статьи рассмотрен список требований потребителей весового оборудования

в целях производственных лабораторий пищевого производства. Методом ранговой корреляции [7] проведена предварительная оценка степени значимости этих требований по шкале от 1,0 до 5,0 (таблица).

В целях повышения конкурентоспособности своего продукта компании создают «лишние» свойства без учета требований потребителей. Широко применяемая и обсуждаемая концепция «бережливого» производства (LEAN-производство) [2, 3] позволяет значительно сокращать потери, в том числе связанные с созданием свойств и характеристик, не востребованных потребителем в полной мере. Упомянутая концепция основана на ряде принципов, инструментов и методологий, которые способствуют проведению мониторинга процессов организации с целью сокращения потерь при производстве продукта, востребованного потребителем. Представленная статья не рассматривает концепцию «бережливого» производства, но использует понятия, приведенные в [4], в целях соблюдения единства терминологии.

**Оценка степени значимости потребительских требований
при выборе весового оборудования для лаборатории пищевого предприятия**

Формулировка требования	Оценка значимости
Безотказность в работе	4,0
Точность измерений	5,0
Цена, руб.	4,0
Наличие лучших комплектующих весов	4,0
Надежность конструкции весов	4,0
Сервисная поддержка	3,0
Гарантия, лет	4,0
Простота в обслуживании	1,0
Возможность установки дополнительного оборудования	1,0
Простота и удобство программного обеспечения	2,0

Принцип «ориентации на потребителей» заложен и в серии стандартов создания и внедрения систем менеджмента качества в организациях, в частности – в стандарте ГОСТ Р ИСО 9000–2015 [5]. Для реализации подхода к проектированию и созданию конкурентоспособной продукции в организациях применяются инструменты инжиниринга качества, описанные в учебном пособии [7]. Одним из инструментов, направленных на учет требований и пожеланий потребителей при проектировании и производстве продукции, является метод структурирования функций качества (Quality Function Deployment) – QFD [5, 6].

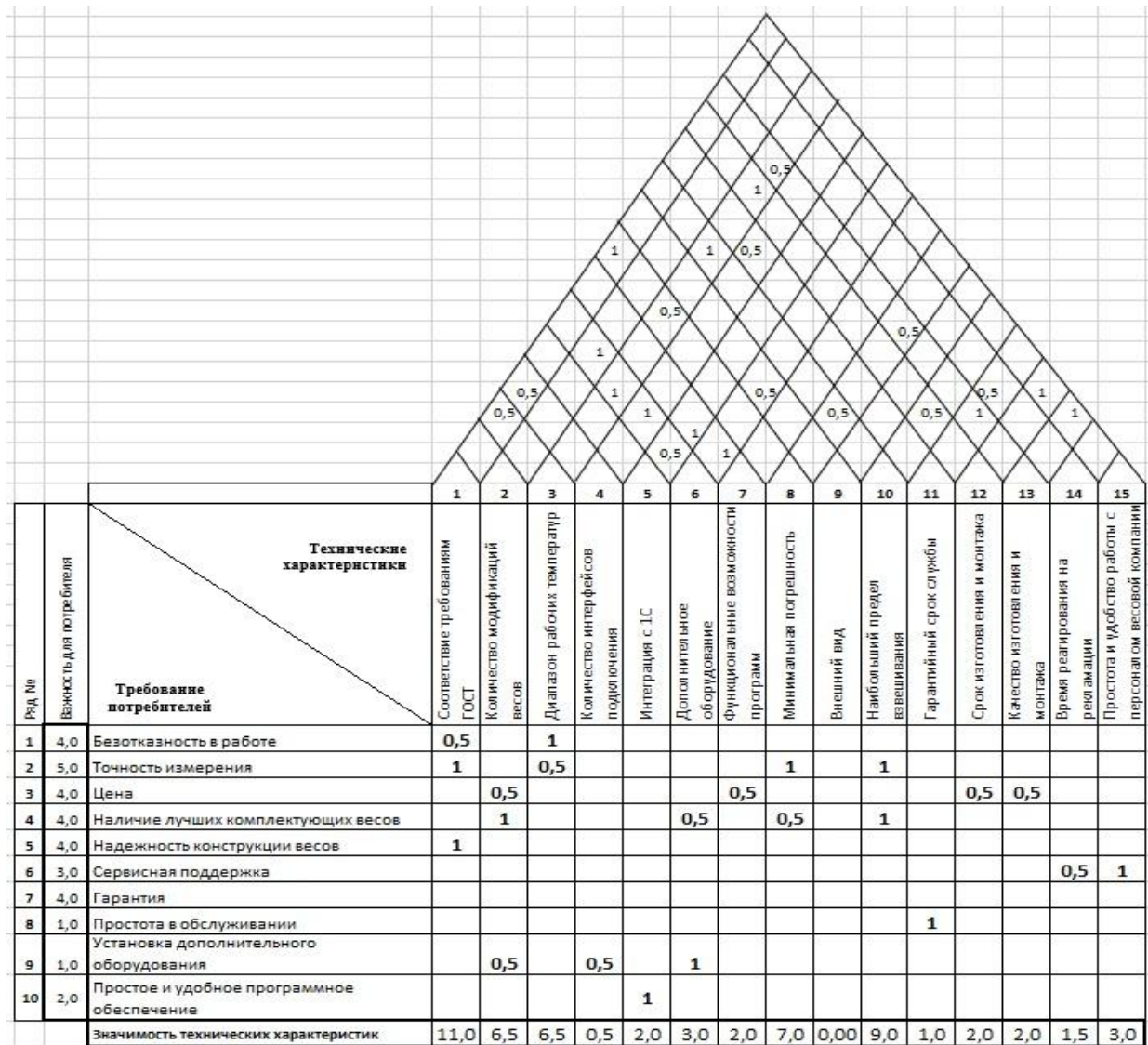
Технология структурирования функций качества (QFD) [5] основана на понимании требований потребителей, переводе этих требований на технический язык, применении системного мышления при создании технических характеристик продукта и построении сети процессов, направленных на выпуск продукции. Применение технологии QFD позволяет определять приоритетность требований потребителя к продукции, решать задачи по преобразованию этих требований в показатели качества продукции (технические, эргономические, показатели надежности и т. д.), которые являются измеримыми и могут быть применены для проектирования, производства и контроля продукции.

Последовательность применения этого метода может быть описана следующими этапами [5].

На первом этапе осуществляется мониторинг и оценка требований потребителей в отношении конкретного продукта, после чего ко-

мандой разработчиков осуществляется преобразование потребительских свойств таким образом, чтобы можно было провести количественную оценку степени его удовлетворения. Кроме того, на первом этапе требования потребителей необходимо согласовать с техническими характеристиками выпускаемого продукта. Оценка требований потребителей предполагает анализ значимости конкретного требования для потребителей. Для этих целей могут быть применены различные методики системного анализа (метода «дерева свойств», метод ранговой корреляции и т. п.)

На втором этапе командой разработчиков определяется набор технических (инженерных, метрологических, конструкторских и т. п.) характеристик, способный, с одной стороны, обеспечить конкурентоспособность продукции, а с другой, создать «фундамент» для процессов проектирования конструкции и непосредственного производства исследуемой продукции. В этом случае, основная функция методики состоит в определении взаимной связи (корреляции) между потребительскими свойствами и инженерными характеристиками продукции. При написании настоящей статьи использована оценка корреляционных связей, причем только пятью значениями коэффициента корреляции: «1» – существенная положительная связь (сильная корреляция); «минус 1» – существенная отрицательная связь; «0,5» – слабая положительная корреляция; «минус 0,5» – слабая отрицательная корреляция; «0» – корреляция отсутствует [7]. Такими числами заполняется «тело дома качества» (рисунок).



«Дом качества» при оценке весового оборудования

На третьем этапе необходимо оценить значимость (важность) каждой инженерной характеристики (строка «Значимость технических характеристик» на рисунке) с учетом ее корреляции с потребительскими свойствами продукции. При этом, следует учесть, что каждое из потребительских свойств имеет различную важность для потребителя. Такая оценка осуществляется в рамках реализации первого этапа. Степень значимости каждой инженерной характеристики определяется как сумма произведений значений «Важность для потребителей» (первый этап) и «коэффициента корреляции» между потребительскими требованиями и техническими характеристиками (второй этап) [5].

На четвертом этапе проводится оценка корреляционной связи между всеми инженерными характеристиками продукта. Некоторые из них

могут быть связаны между собой. Но, как и на третьем этапе, такая связь может отсутствовать [9]. Так, например, «Наибольший предел взвешивания» коррелирует с такими показателями как «Минимальная погрешность» (определяемая классом точности) и «Количество модификаций весов», которое в частности и определяется разбросом показателя верхнего предела измерений весового оборудования. При реализации этого этапа, как правило, производитель имеет возможность определить, каким образом можно изменить инженерные характеристики для более полного обеспечения удовлетворенности потребителей. Однако, если инженерные характеристики имеют отрицательную корреляцию, возможность их одновременной корректировки отсутствует. Для разрешения этой задачи необходимо применять различные компромиссные решения.

Оценка взаимосвязи между инженерными (техническими) характеристиками представлена в «крыше» дома качества по аналогии оценки корреляционной связи, принятой на втором этапе [5, 9].

Результатом реализации описываемой методики является построение, так называемого «Дома качества» (House of Quality), представленного на рисунке.

Как видно, из представленного анализа с применением описанного инструмента, основными характеристиками весового оборудования, наиболее полно удовлетворяющими требованиям потребителей являются следующие метрологические характеристики весового оборудования: соответствие продукции требованиям ГОСТ Р 53228–2008; расширение пределов взвешивания; количество модификаций весов и диапазон рабочих температур. Дальнейшая оценка в сравнении с конкурентами позволит производителям весового оборудования оценивать конкурентоспособность выпускаемого продукта и работать над его модернизацией [8, 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 53228–2008. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания. – Введ. 25.12.2008. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 141 с.
2. Вумек, Д. П. Бережливое производство. Как избежать потерь и добиться процветания вашей компании / Д. П. Вумек, Д. Т. Джонс. Пер. с англ. – 2-е изд. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2005. – 473 с.
3. Litvaj, I. Lean management, lean principles, lean manufacturing / I. Litvaj // *Technológ.* – 2023. – Vol. 15, No. 1. – P. 69–71. – DOI 10.26552/tech.c.2023.1.12. – EDN TYPFAW.
4. ГОСТ Р 57524 – 2017. Бережливое производство. Поток создания ценности. – Введ. 30.06.2017. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 18 с.
5. Менеджмент качества. Практический курс : учебник и практикум для вузов / под общей редакцией А. В. Рыжаковой. – 2-е изд. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 201 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-17713-8. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/568158> (дата обращения: 05.03.2025).
6. Liu, Q. Spherical fuzzy bipartite graph based QFD methodology (SFBG-QFD): Assistive products design application / Q. Liu, X. Chen, X. Tang // *Expert Systems with Applications.* – 2024. – Vol. 239. – P. 122279. – DOI 10.1016/j.eswa.2023.122279. – EDN DRXVUG.
7. Статистические методы оценки качества продукции / М. Ю. Поляничкова [и др.]. – Волгоград : ВолгГТУ, Волгоград. – 2019. – 128 с.
8. Формирование бизнес-решений по повышению конкурентоспособности продукции (услуг) предприятий : монография / Н. С. Андрияшина [и др.]. – Н. Новгород : НГИЭИ, 2014. – 220 с.
9. Исакович, Е. Г. Весы и весовые дозаторы: метрологическое обеспечение : справочная книга метролога / Е. Г. Исакович. – Москва : Издательство стандартов, 1991.
10. Юрьева, Л. В. Обеспечение комплексной безопасности бизнеса на основе бенчмаркинга / Л. В. Юрьева, М. С. Марфицына // Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики : матер. XVI междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Екатеринбург, 12–13 марта 2019 года / отв. ред. Ю. Г. Лаврикова. – Екатеринбург : Институт экономики Уральского отделения РАН, 2019. – С. 120–122. – EDN LTUBLO.

УДК 621.373.826:621.78+004.94

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-38-42

Д. Д. Федотов¹, С. И. Ярьско²

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА–КУКА

¹ ФГБОУ ВО «СамГТУ»

² Самарский филиал ФГБУН Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

E-mail: dnsfdtv62@gmail.com, serg19541959@mail.ru

Рассмотрено моделирование процесса лазерной ударной обработки методом конечных элементов с применением модели Джонсона–Кука. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Доказана перспективность использования данной модели для прогнозирования распределения остаточных напряжений в сплавах.

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, метод конечных элементов, модель Джонсона–Кука, пиковое давление, остаточные напряжения

D. D. Fedotov¹, S. I. Yaresko²

**CALCULATION OF RESIDUAL STRESSES IN FINITE ELEMENT MODELING
OF THE LASER SHOCK PEENING PROCESS BASED ON THE JOHNSON-COOK MODEL**

¹Samara State Technical University

²Samara Branch of P. N. Lebedev Physical Institute

The modeling of the laser shock peening process using the finite element method with the Johnson-Cook model is considered. The results of the study are compared with experimental data. The prospects of using this model to predict the distribution of residual stresses in alloys have been proven.

Keywords: laser shock peening, finite element method, Johnson-Cook model, peak pressure, residual stresses

Лазерная ударная обработка (ЛУО) – перспективный метод обработки материалов, позволяющий улучшить механические свойства металлов и сплавов и повысить их устойчивость к износу и коррозии. Исследования в области лазерного ударного упрочнения проводятся уже достаточно давно [1–2], и за это время были получены значительные результаты. Основным достоинством метода ЛУО является достижение высокого уровня сжимающих остаточных напряжений. Значительный интерес к практическому применению процесса ЛУО обуславливает актуальность задачи построения математических моделей, позволяющих прогнозировать уровень наведенных остаточных напряжений в процессе ЛУО и оптимизировать параметры процесса обработки.

С тех пор как анализ результатов конечно-элементного (КЭ) моделирования ЛУО был впервые представлен Брайстедом и Брокманом в 1999 году [3], был опубликован ряд исследований процесса ЛУО с применением программного обеспечения (ПО) ABAQUS [4–5] и ANSYS LS DYNA [6–8]. Применялись различные подходы при моделировании, такие как решение в два этапа, с использованием явного и неявного шагов [4, 8] или решения с привлечением ПО ANSYS AUTODYN [9], где был реализован только явный (динамический) шаг с добавлением коэффициента затухания. Недостатком первого подхода является необходимость выгрузки файлов динамического расчета для последующего их применения при статическом расчете. При моделировании многократного воздействия эта процедура существенно усложняет расчет, однако при анализе однократного воздействия такой подход прекрасно себя зарекомендовал [10, 11]. Недостатком второго подхода, является подбор коэффициента демпфирования.

Как наиболее популярный и проверенный среди методов моделирования ЛУО, в работе использовался стандартный подход к решению задачи в 2 этапа с применением явного и неяв-

ного анализа. Импульс нагружения имеет большую амплитуду и малую длительность, поэтому на первом из этапов (называемого динамическим) расчет выполняется с применением явного решателя (Explicit). В течение данного шага проводится моделирование распространения упругопластической волны в материале. Этап завершается после полной релаксации пластической составляющей импульса давления. Далее в течение второго шага (называемого статическим) применяется неявный решатель (Implicit). На данном этапе происходит релаксация системы, в результате чего материал достигает статического равновесия. Данный решатель позволяет сократить вычислительные затраты при расчете остаточных напряжений. Напряжения в состоянии статического равновесия представляют собой остаточные напряжения.

Цель работы – разработка КЭ модели расчета остаточных напряжений при ЛУО и сравнение полученных результатов моделирования с известными экспериментальными данными.

Метод КЭ – это численный метод, эффективно используемый для решения задач механики деформируемого твердого тела и анализа тепловых процессов, включая задачи ЛУО [4, 11]. Суть метода состоит в разбиении исследуемой области (тела) на конечное число малых элементов, которые могут иметь различную форму. Для каждого элемента строится система уравнений, описывающая его поведение. Затем эти уравнения объединяются в общую систему уравнений, которая решается численно.

Построение модели ЛУО и расчет остаточных напряжений были выполнены в ПО SIMULIA ABAQUS. При этом использовались экспериментальные данные, полученные при ЛУО сплава Ti-6Al-4V [10], и модели назначались свойства, присущие данному материалу.

В процессе решения была создана модель квадратного сечения 20 на 20 мм, которая была разбита на четырехугольные КЭ размером 0.1 мм.

Считая задачу осесимметричной, на границе было задано условие симметричности, что в дальнейшем позволило физически упростить вычислительный процесс.

Помимо конечных элементов при построении модели были использованы бесконечные элементы на границе моделируемого тела. Конечные элементы являются упругопластиче-

скими, полностью нелинейными элементами, которые используются для расчета поля остаточных напряжений. Бесконечные элементы являются только упругими элементами и используются в качестве неотражающих границ при моделировании (рис. 1), их применение позволяет избежать отражения ударной волны от границ моделируемого тела.

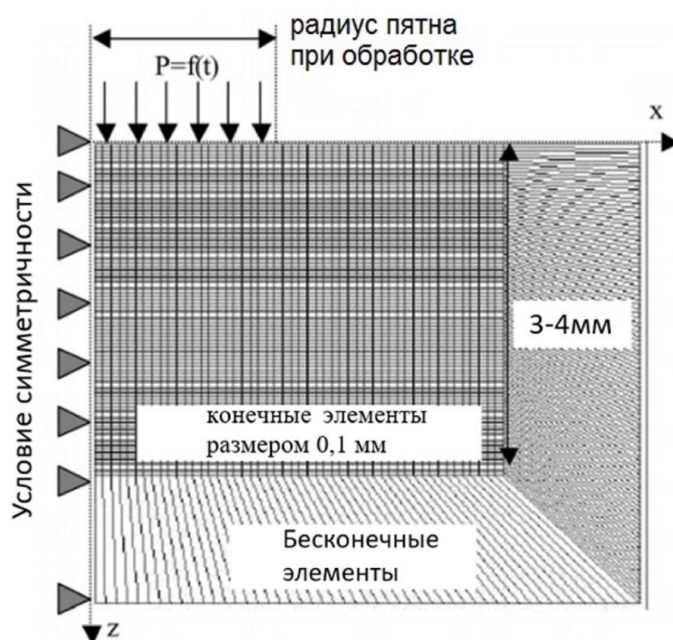


Рис. 1. Схема модели пластины, разбитой на КЭ и закрепленной в пространстве с приложенной нагрузкой

При моделировании ЛУО были использованы режимы обработки, описанные в [10] и представленные в таблице.

Режимы обработки
при лазерном ударном упрочнении

Режимы обработки	Значения
Количество ударов	1
Длительность импульса, нс	10
Пиковое давление, ГПа	5,5
Диаметр пятна, мм	8

При моделировании одиночного удара (импульса) ЛУО данные о нагрузке вводились в ПО ABAQUS с учетом длительности импульса и мощности лазерного излучения. При расчете полагалось, что в зоне удара прикладывается равномерно распределенная нагрузка.

При моделировании было использовано пиковое давление $P_{\max} = 5,5$ ГПа, реализованное в работе [10]. Однако при известных характеристиках лазерного излучения при необходимости вычислить величину пикового давления можно достаточно просто [11]:

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z(\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1})} \sqrt{W(\text{GWcm}^{-2})}, \quad (1)$$

где Z – приведенный акустический импеданс среды, W – плотность мощности лазерного излучения, α – эффективность взаимодействия, принятая равной 0,1 для воды [11].

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2},$$

где Z_1 – акустический импеданс воды, а Z_2 – акустический импеданс металла.

При приложении нагрузки известно несколько способов, чтобы задать амплитуду удара [12]. В нашем случае профиль давления получен на основе экспериментов [10]. Экспе-

риментальная проверка профиля давления, как правило, осуществляется путем проведения испытаний с различной интенсивностью лазерного воздействия и регистрацией, используя методы лазерной интерферометрии, результирующей скорости тыльной поверхности образца, движущейся с высокой скоростью, при помощи системы VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) - системы интерферометра скорости для любого отражателя [13, 14]. При расчете полагалось, что согласно [10] давление растет в течение первых нескольких наносекунд, затем постепенно уменьшается (рис. 2).

При ЛУО скорости деформации в материале превышают величину 10^6с^{-1} . При таких скоростях металлы ведут себя иначе, чем в квазистатических условиях. По мере увеличения скорости деформации металлы обычно демонстрируют небольшое увеличение модуля упругости и предела текучести. Эти изменения при моделировании ЛУО позволяет учесть использование основных положений модели Джонсона–Кука [15], главное преимущество которой заключается в том, что оценка параметров модели, описывающих напряжение течения материала при анализе быстропротекающих процессов, достаточно проста.

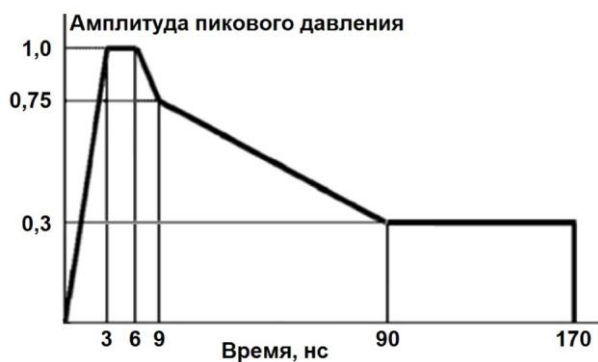


Рис. 2. Зависимость амплитуды давления от длительности импульса при ЛУО

Модель Джонсона–Кука является одной из наиболее часто используемых моделей при исследовании быстропротекающих процессов, например, удара.

Эта модель описывает напряжение, при котором начинается пластическая деформация материала (напряжение течения (σ)), как произведение трех величин: величины деформационного упрочнения, величины, зависящей от скорости деформации, и термической величины (2):

$$\sigma = [A + B \cdot \varepsilon^n] \left[1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 - (T')^m], \quad (2)$$

где

$$T' = \frac{T - T_r}{T - T_m}, \quad (3)$$

при комнатной температуре T_r и температуре плавления T_m величины A ; B , n , C , ε_0 и m определяются экспериментально при испытаниях на разрывном стержне Гопкинсона для скоростей деформации до 10^4с^{-1} ; параметр A – начальный предел текучести при комнатной температуре; параметр n и B учитывает деформационное упрочнение, а параметр m моделирует термическое размягчение; параметр C представляет чувствительность к скорости деформации.

Решение выполнялось за два шага, описанные выше, как наиболее проверенный способ среди известных методов моделирования ЛУО. После окончания расчета данные о распределении ОН по глубине после ЛУО сравнивались с известными из [10] экспериментальными результатами (рис. 3).

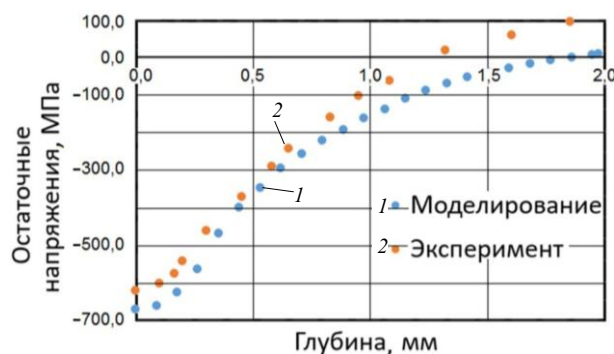


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по глубине образца после однократной ЛУО при $P_{\max}=5,5$ ГПа и длительности импульса 10 нс

Видно (рис. 3), что отличия результатов моделирования от экспериментальных данных менее 10 %, следовательно, возможно прогнозирование результатов ЛУО практически для любых металлов, в том числе и конструкционных сталей, и оптимизация режимов обработки для достижения заданного уровня остаточных напряжений.

В заключении отметим, что КЭ моделирование процесса ЛУО является перспективным направлением исследований и позволяет, как оптимизировать параметры процесса обработки, так и прогнозировать ее результаты. Применение данного подхода способствует повышению качества и надежности изделий, снижению затрат на производство и расширению области применения ЛУО в промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tolga Bozdana A.* On the mechanical surface enhancement techniques in aerospace industry – a review of technology // *Aircr. Eng. Aerospace Technol.* – 2005. – V. 77(4). – PP. 279-292. doi: 10.1108/00022660510606349
2. Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology / Y. Sano, K. Akita, K. Masaki et al. // *J. Laser Micro/Nanoeng.* – 2006. – V. 1(3). – PP. 161-166. doi:10.2961/jlmn.2006.03.0002
3. *Braisted, W.; Brockman, R.* Finite element simulation of laser shock peening // *Int. J. Fatigue.* – 1999. – 21(7). – PP. 719–724. DOI:10.1016/S0142-1123(99)00035-3
4. Material model validation for laser shock peening process simulation / H.K. Amarchinta, R.V. Grandhi, K. Langer, D.S. Stargel / *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.* – 2008. – 17(1). – 015010. DOI:10.1088/0965-0393/17/1/015010
5. *Peyre, P.; Chaieb, I.; Braham, C.* FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels // *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 2007; 15, 205–221. DOI:10.1088/0965-0393/15/3/002
6. Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy / S. Bhamare, G. Ramakrishnan, S.R. Mannava et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2013. – 232. – PP. 464–474. DOI:10.1016/j.surfcoat.2013.06.003
7. *Ballard P.; Fournier J.; Fabbro R.; Frelat J.* Residual Stresses Induced by Laser-Shocks // *J. Phys. IV France* 01. – 1991. – C3-487-C3-494. DOI:10.1051/jp4:1991369
8. An Efficient Reliability-Based Simulation Method for Optimum Laser Peening Treatment / P.J. Hassler, A.S. Malik, K. Langer, et al. // *J. Manuf. Sci. Eng.* – 2016. – 138(11). – 111001. <https://doi.org/10.1115/1.4033604>
9. *Kim R., Suh J., Shin D.* FE Analysis of Laser Shock Peening on STS304 and the Effect of Static Damping on the Solution // *Metals.* – 2021. – 11(10). – P. 1516. DOI:10.3390/met11101516
10. *Nakhodchi S., Poormir M.A., Gharibdsti M.S.* A finite element study of thermal residual stress relaxation in multiple laser shock peened Ti-6Al-4V // *Modares Mechanical Engineering.* – 2018. – 18(3). – PP. 38-44. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-37-en.html>
11. Numerical Simulation and Experimental of Residual Stress Field of SAE1070 Spring Steel Induced by Laser Shock / Bing Han, Changliang Xu, Jialian Shi and Hua Song // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.* – 2013. – 5(20). – PP. 4869-4877. DOI:10.19026/rjaset.5.4334
12. *Crudo C., Enrico Troiani E.* Investigation on Laser Shock Peening Capability by FE Simulation // *Universita' di Bologna. Scuola Di Ingegneria Ed Architettura.* – 2012-2013. – 4.1.3.1-Cod. 8197. 103p.
13. *Peyre P., Scherpereel X, Berthe L, Fabbro R.* Current trends in laser shock processing // *Surface Engineering.* – 1998. – 14(5). – PP. 377-380. <https://doi.org/10.1179/sur.1998.14.5.377>
14. *Barker L. M.* Laser interferometry in shock-wave research // *Experimental Mechanics* 12, 209–215 (1972). <https://doi.org/10.1007/BF02318100>
15. *Johnson, G. R. and Cook, W. H.* A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures // *Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague, Netherlands, 19-21 April 1983, PP.541-547.*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 66.048.3.069.833

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-43-46

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ЗАГРУЗКИ-ВЫГРУЗКИ НАСАДОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ В ТЕПЛОМАССООБМЕННОЙ КОЛОННЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: pahp@vstu.ru, natasha292009@yandex.ru

Существующие конструкции массообменных насадочных колонн обладают существенным недостатком: сложностью и длительностью загрузки и замены насадочных контактных устройств: колец Рашига, седел Берля, седел Инталокса и др. Проблема усугубляется большими затратами времени при упорядоченной укладке элементов насадки в массообменную колонну. Использование в колоннах регулярной насадки (плоскопараллельной, гофрированной, сотовой, проволоочной) чаще всего является экономически невыгодным, из-за чего в промышленности чаще всего используют именно нерегулярную насадку, а именно керамические кольца Рашига. Поэтому разработка автоматизированного способа загрузки и выгрузки контактных насадочных устройств в массообменную колонну сможет найти широкое распространение в химической и нефтехимической промышленности, так как позволит значительно сократить время, закладываемое на замену насадки, что приведет к уменьшению простоя оборудования.

Ключевые слова: теплообменная колонна, контактные устройства, насадка, кольца Рашига, нерегулярная и упорядоченная укладка, ректификация, абсорбция, годовая стоимость эксплуатации

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR LOADING AND UNLOADING PACKED CONTACT DEVICES IN HEAT AND MASS-EXCHANGE COLUMN

Volgograd State Technical University

Existing designs of mass-exchange packed columns have a significant drawback: the complexity and duration of loading and replacing the packed contact devices: Raschig rings, Berl seats, Intalox seats, etc. The problem is aggravated by the large time costs of orderly laying of the packing elements in the mass-exchange column. The use of regular packing (plane-parallel, corrugated, honeycomb, wire) in columns is most often economically unprofitable, which is why irregular packing, namely ceramic Raschig rings, is most often used in industry. Therefore, the development of an automated method for loading and unloading contact packing devices in a mass-exchange column can be widely used in the chemical and petrochemical industries, as it will significantly reduce the time allocated for replacing the packing, which will lead to a decrease in equipment downtime.

Keywords: heat and mass transfer column, contact devices, nozzle, Raschig rings, irregular and orderly installation, rectification, absorption, annual cost of operation

Наибольшее распространение в химической промышленности получили насадочные массообменные колонны из-за простоты устройства и относительно низкого гидравлического сопротивления. Пониженное гидравлическое сопротивление по газовой фазе обуславливает преимущественное использование насадочных ап-

паратов в абсорбции и ректификации, так как на транспортировку газовой (паровой) фазы через аппарат приходится значительные энергетические затраты, что ограничивает использование в абсорбции барботажных аппаратов [1, 2].

Насадочные массообменные аппараты чаще всего используются с противоточной или сме-

шанной структурой потоков, близкой к модели идеального вытеснения, это обеспечивает наибольшую движущую силу массопередачи, что и приводит к высокой производительности колонны [3].

В массообменной колонне (абсорбционной, ректификационной или экстракционной) насадка укладывается на опорные решетки. Для укладки насадки в колонну предусмотрены погрузочные и разгрузочные люки. Высота слоя (секции, сегмента) насадки определяется тремя факторами: необходимо равномерное орошение насадки; если насадка изготовлена из хрупких материалов (керамики, пластмассы), нижние слои насадки могут быть раздавлены весом насадки; высота слоя насадки ограничена прочностью опорной решетки [4, 5].

Основным и главным недостатком насадочных массообменных колонн является их большие объемы, из-за чего возникает проблема внутренней укладки насадочных контактных устройств. Также необходимо отметить, что существующие на данный момент конструкции массообменных насадочных колонн обладают еще одним существенным недостатком: сложностью и длительностью загрузки и замены насадочных контактных устройств (колец Рашига, седел Берля, седел Инталокса и др.), особенно в промышленных колоннах большой высоты и диаметра. Особенно данная проблема усугубляется по затратам времени при упорядоченной укладке элементов насадки.

Широкого применения в промышленности насадки с индивидуальной укладкой не получили, так как это резко увеличивает трудоемкость и себестоимость монтажа. Поэтому решение проблемы автоматизированной загрузки и выгрузки контактных устройств в массообменную колонну имеет большое значение [4].

Регулярная насадка с регулируемой укладкой состоит из отдельных элементов (кольца, треугольные призмы с постоянным или переменным по высоте сечением), которые укладывают в корпусе колонны слоями. Для упрощения монтажа такой насадки отдельные элементы могут быть предварительно собраны в контейнеры автоматическими манипуляторами, которые затем устанавливают в корпус колонны [5].

Целью данной работы является разработка способа уменьшения затрат времени и трудоемкости за счет внедрения автоматизированной системы загрузки и замены элементов регулируемой упорядоченной насадки внутри массообменной колонны.

Объектом автоматизации является насадочная массообменная колонна, в которой АСУ ТП включает в себя: подсистему сбора данных о ходе проведения массообменного процесса (датчики температуры, давления, весовой датчик) и подсистему стабилизации температуры [6].

Одним из разработанных способов, как отмечалось выше, является установка нерегулярной регулируемой насадки в собранные заранее цилиндрические емкости с перфорированным днищем-решеткой под насадку (рис. 1). В цилиндрическую емкость насыпаны в навал или упорядочено установлены в ряды насадочные контактные устройства. Наружный диаметр цилиндрической емкости d_n составляет 0,95–0,97 от диаметра колонны D_k , а высота 1,05–1,1 высоты насадки в колонне. В верхней части цилиндрической емкости 2 жестко прикреплены три или четыре монтажные петли 7, позволяющие легко вытаскивать и опускать цилиндр 2 автоматизированным манипулятором внутрь корпуса колонны 1. Также внутри колонны установлен автоматизированный комплекс динамического управления орошения насадки массообменной колонной.

Недостатком разработанного автоматизированного способа является невозможность опускания в колонну последующих слоев слоя насадки.

Данная проблема может быть решена за счет выполнения цилиндра в форме овала (рис. 2). Установка последующего слоя насадки в овалах цилиндра 4 на опорные кольца 2, позволит быстро вынимать насадку путем поворота (рис. 2). Цилиндр, минуя опорные кольца и манжету, будет полностью, выходить из колонны, что позволяет быстро проводить процесс очистки или полной замены колец Рашига, из-за чего колонна меньше будет простаивать на ремонт.

Установка последующего слоя насадки в овалах цилиндра 4 на опорные кольца 2, позволит быстро вынимать насадку путем поворота (рис. 2). Цилиндр, минуя опорные кольца и манжету, будет полностью, выходить из колонны, что позволяет быстро проводить процесс очистки или полной замены колец Рашига, из-за чего колонна меньше будет простаивать на ремонт.

Еще одним способом решения проблемы загрузки-выгрузки контактных устройств, может быть установка с помощью автоматизированного манипулятора цилиндров внутрь колонны один над другим (рис. 3). В данном случае необходимо под каждым цилиндром с насадкой устанавливать датчик веса, для предотвращения возможных нагрузок на корпус аппарата, а также температуры.

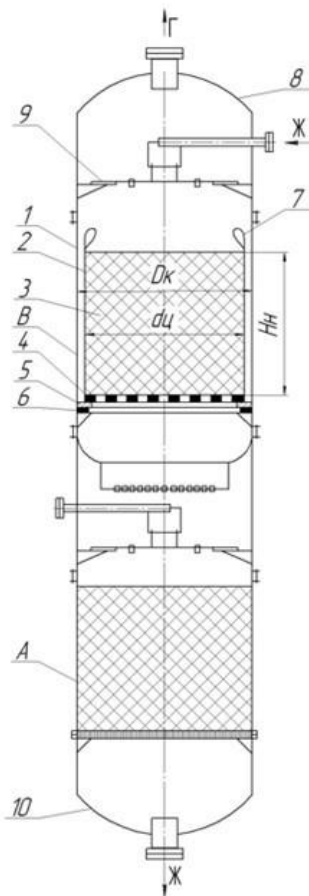


Рис. 1. Насадочная массообменная колонна предлагаемой конструкции:

1 – корпус колонны с внутренним диаметром D_k ; 2 – цилиндрическая емкость с наружным диаметром d_u ; 3 – насадка; 4 – решетка под насадку; 5 прокладка; 6 – кольцо опорное; 7 – петля монтажная; 8 – крышка с патрубками выхода газа и входа жидкости; 9 – распределительная тарелка для подачи жидкости на насадку; 10 – днище с патрубком отвода жидкости; А – типовая засыпка насадки в исчерпывающей части колонны; В – предлагаемая установка цилиндрической емкости с насадкой

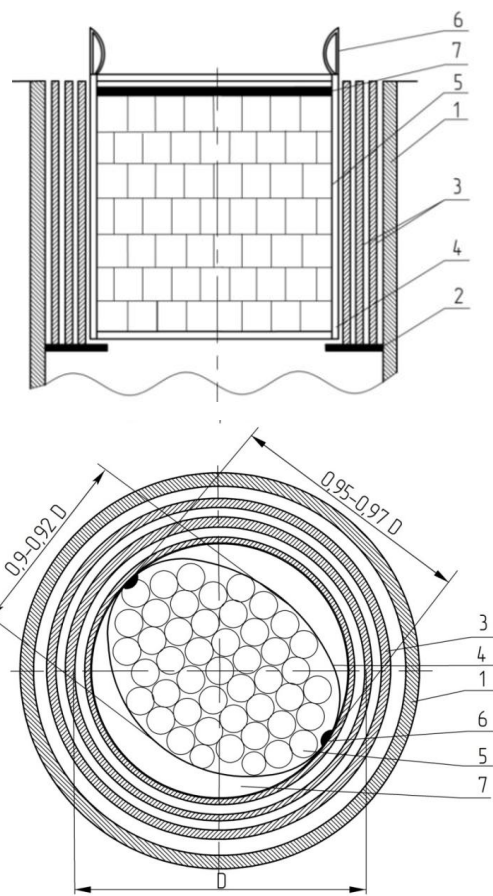


Рис. 2. Разработанная конструкция массообменной кольцевой колонны:

1 – внешний корпус, с внутренним диаметром D ; 2 – опорные полукольца; 3 – открытые вертикальные цилиндры (3 шт.); 4 – центральный цилиндр, выполненный в форме овала, большая ось которого соответствует 0,95–0,97 от диаметра ближайшего вертикального цилиндра массообменной колонны, а меньшая ось составляет 0,9–0,92 от диаметра ближайшего вертикального цилиндра колонны; 5 – кольца Рашига; 6 – крючки; 7 – манжета, выполненная из эластичного материала (например, резины)

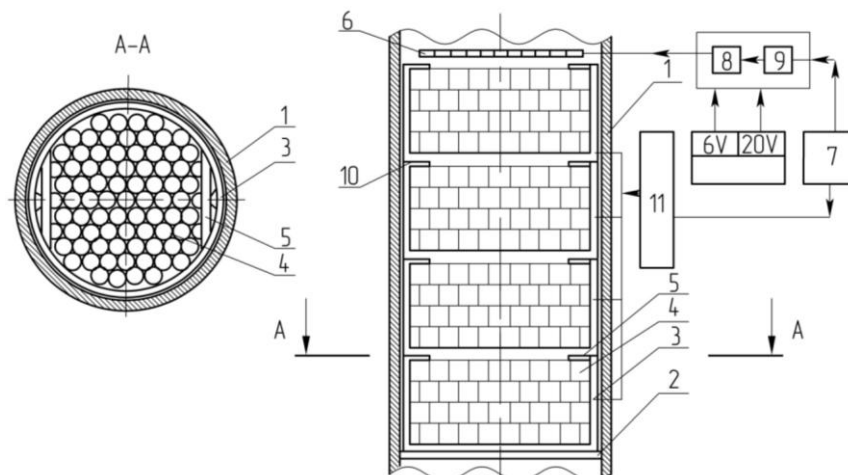


Рис. 3. Предлагаемая массообменная колонна:

1 – корпус колонны; 2 – опорное кольцо; 3 – цилиндр; 4 – кольца Рашига; 5 – крючки; 6 – управляемый распределитель жидкости с электромагнитными клапанами; 7 – компьютер с ПО управления распределителем жидкости температуры; 8 – усилитель; 9 – модуль дискретного управления LTR42; 10 – датчик веса и температуры; 11 – коммутирующий модуль датчика веса и температуры [6]

Также необходимо отметить, что использование данного автоматизированного способа приведет к возможности уйти от внедрения в колонну погрузочных и разгрузочных люков. Регулируемую укладку колец Рашига в цилиндры можно проводить за счет внедрения в технологические линии роботизации (автоматический манипулятор), что приведет к повышению производительности труда, уменьшению издержек производства, исключению влияния человеческого фактора, при проведении монотонных работ, требующих высокой точности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лаптев, А. Г. Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями : монография / А. Г. Лаптев, Т. М. Фарахов, О. Г. Дударовская. – Спб. : Страта, 2016. – 214 с.
2. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.
3. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 10-е изд. стереотип., доработ. – М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
4. Сокол, Б. А. Насадки массообменных колонн / Б. А. Сокол. – Москва, 2009. – 298 с.
5. Голованчиков, А. Б. Моделирование процесса в насадочной ректификационной колонне с диффузионной структурой потока по жидкой фазе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 14 (178) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 8–12.
6. Павленко, А. Н. Автоматизированная система управления распределителем жидкости дистилляционного исследовательского стенда со структурированной насадкой / А. Н. Павленко, В. Е. Жуков [и др.] // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 19–25.

УДК 621.22

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-46-49

Д. В. Кимбор, А. В. Дроботов

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МАЛОГАБАРИТНОГО МЕМБРАННОГО НАСОСА С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: Daniil2001v@gmail.com, alexey.drobotov@gmail.com

Рассмотрены основные достоинства аддитивных технологий в производстве малогабаритных насосов. Предложена оптимизированная конструкция мембранного насоса, адаптированная для печати на 3D-принтере.

Ключевые слова: малогабаритный мембранный насос, аддитивные технологии и их особенности, 5D-печать эластичными материалами

D. V. Kimbor, A. V. Drobotov

SMALL-SIZED DIAPHRAGM PUMP DESIGN OPTIMIZATION, CONSIDERING THE CAPABILITIES OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

Volgograd State Technical University

The main advantages of additive technologies in the production of small pumps are considered. An optimized diaphragm pump design adapted for 3D-printing is proposed.

Keywords: small-sized diaphragm pump, additive technologies and their features, 5D-printing with elastic materials

Малогабаритные насосы – это компактные устройства, способные обеспечивать эффективное перемещение жидкости или газа в различных сферах: в промышленности и производстве, в быту и в медицине. Они нашли широкое применение во многих отраслях благодаря своей надежности и удобству использования. Их компактность позволяет экономить пространство и устанавливать их даже в ограниченных пространствах. Малогабаритные насосы широко применяют в автомобильной отрасли для подачи топлива, смазочных материалов и ох-

лаждающих жидкостей в двигателе автомобиля, а также в омывателе стекол.

Традиционные методы производства малогабаритных насосов включают использование стандартных производственных процессов, таких как литье, обработка металла резанием и сборка из деталей. Эти методы имеют свои преимущества, такие как высокая производительность, надежность и относительно низкая стоимость серийного производства. Однако они также имеют ограничения, такие как трудоемкость производства сложных форм в мелкосо-

рийном производстве и дорогостоящая производственная оснастка.

В данной работе рассмотрена адаптация конструкции малогабаритных насосов для производства аддитивными методами, их технические характеристики и возможности дальнейшего развития данной области.

При адаптации конструкции для аддитивного производства нужно учитывать ограничения и недостатки этого метода производства [0].

Например, ограничения по размерам, точности, особенностям материалов, используемых для 3D-печати, и их влияние на прочность, жесткость и износостойкость деталей насоса [0].

В целом, адаптация конструкции малогабаритных насосов для производства аддитивными методами может принести значительные преимущества, такие как улучшение производи-

тельности, экономия затрат и возможность инноваций в дизайне.

Рассмотрим адаптированный мембранный насос для аддитивного производства.

Основным рабочим органом мембранного насоса является мембрана диаметром 60 мм. Габариты насоса при этом не превышают 65 мм. При создании малорасходного мембранного насоса требовались специализированные решения, которые не всегда возможно реализовать с помощью традиционных методов производства. Предложенная конструкция мембранного насоса (рис. 1) состоит из четырех основных деталей: мембраны диаметром 60 мм, распределительного механизма, задней крышки с креплением для электромотора, передней крышки с креплением для приводного механизма. А также, из вспомогательных элементов: штока, шатуна, кривошипа и двух шариков.

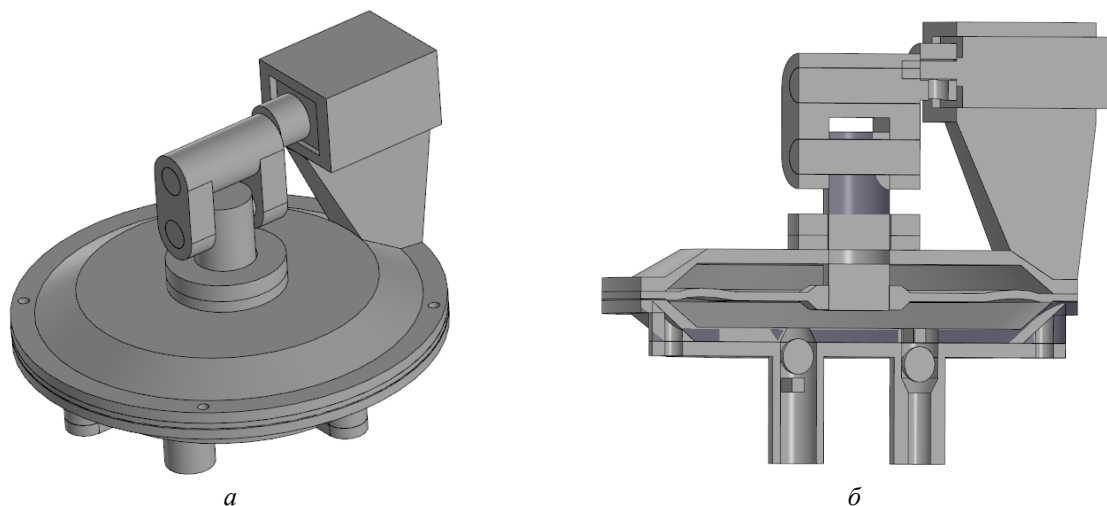


Рис. 1. 3D-сборка прототипа мембранного насоса:
а – вид в сборе; б – вид в разрезе

Корпус и детали мембранного насоса рационально печатать из материал *PETG*, потому что он обладает достаточной прочностью и ударной стойкостью, что делает его подходящим для механических компонентов, которые могут подвергаться нагрузкам в процессе эксплуатации. Во-вторых, материал устойчив к воздействию различных химических веществ, что особенно важно в насосах, работающих с агрессивными жидкостями.

Температурная стабильность *PETG* позволяет ему сохранять свои свойства при высоких температурах, что критично для надежной работы насоса. Кроме того, материалом *PETG* легко печатать, он менее склонен к деформации

по сравнению с *ABS* и не требует специальных условий, таких как закрытая камера для печати.

При проектировании деталей для 3D-печати необходимо учитывать толщину тонких стенок [0]. Так, если толщина стенки составляет менее 6 диаметров сопла, применяемого для печати, то ее толщина следует устанавливать кратно толщине используемого сопла. То есть, если используется сопло диаметром 0,4 мм, то стенки тоньше 2,6 мм должны быть кратны его размеру: 2,4, 2,0, 1,6, 1,2, 0,8 или 0,4 мм. Промежуточные значения толщины использовать не рекомендуется, так как они напечатаются с пропусками.

Важной особенностью 3D-печати являются поддержки. Они представляют собой времен-

ные вспомогательные элементы, используемые для поддержки нависающих элементов объекта во время печати. Они играют важную роль в предотвращении деформаций, способствуя точности и качеству производства деталей. Поддержки позволяют создавать сложные объекты. Создание правильных поддержек требует опыта и умения разработчика. От правильного расположения поддержек зависит прочность и качество печатаемого объекта. После завершения печати следует удалить поддержки. Важно проследить, чтобы поддержка была удалена полностью, без остатков, которые могут нарушить функциональность компонентов насоса.

Печать мембранных компонентов в 5D-режиме имеет несколько значительных преимуществ. Во-первых, 5D-печать позволяет создавать более сложные и детализированные геометрические формы, что особенно важно для мембран, которые могут иметь специфические требования к форме и структуре. Это обеспечивает лучшую адаптацию к условиям эксплуатации и повышает функциональность.

Во-вторых, использование 5D-технологии печати увеличивает точность и качество печати,

что особенно важно для мембран, требующих высокой степени детализации и точности в размерах. Это позволяет минимизировать отходы и улучшить характеристики готовых изделий.

Третьим преимуществом является возможность использования различных материалов в одном процессе. 5D-печать может комбинировать разные типы полимеров, что позволяет создавать мембраны с уникальными свойствами, такими как гибкость, прочность и устойчивость к химическим воздействиям.

Кроме того, 5D-печать сокращает время на производство, так как позволяет выполнять комплексные операции за один проход, что особенно актуально для серийного производства. Наконец, возможность интеграции различных функций в одну деталь снижает необходимость в сборке из нескольких компонентов, упрощая процесс и повышая надежность конечного продукта.

Технология 5D-печати дает возможность печатать мембраны (рис. 2) непосредственно на штоке, что улучшит качество ее адгезии к штоку и предотвратит возможность ее отслаивания от основания штока.

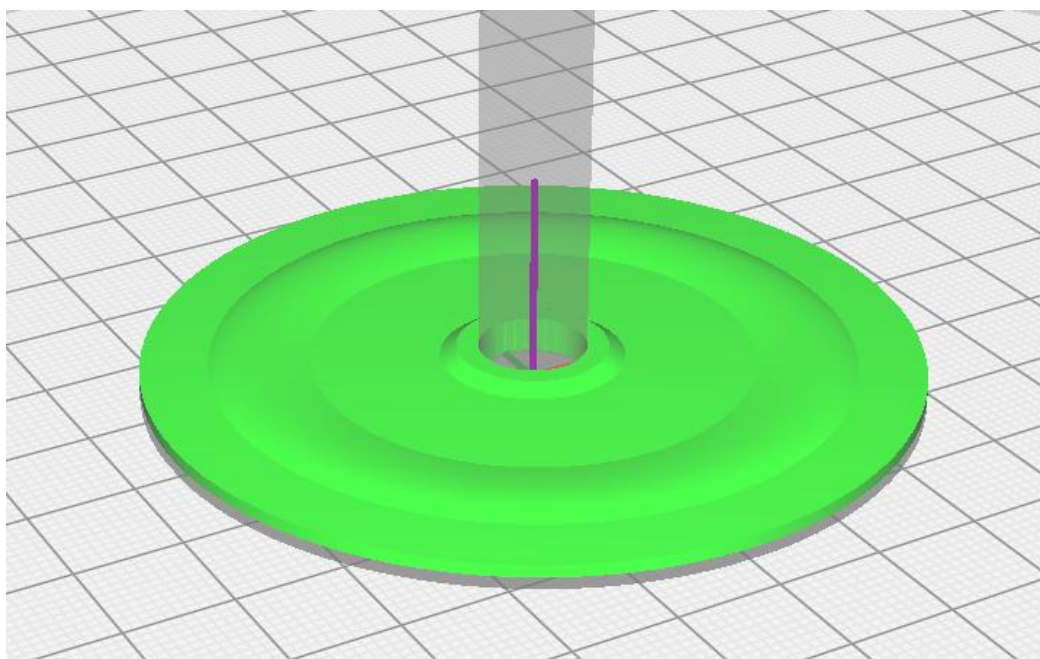


Рис. 2. Расположение мембраны на штоке для 5D-печати

Мембрана должна быть достаточно гибкой и эластичной для обеспечения эффективного сжатия и расширения в процессе работы насоса. Для печати мембраны будем использовать материал серии *SealantTPU A95*, т.к. он обладает высокой химической стойкостью к раство-

рам кислот и щелочей, жирам, маслам, ксилолу, дизельному топливу, способен работать в повышенных температурных режимах.

Таким образом, аддитивное производство предоставляет ряд преимуществ для производства малогабаритных насосов: гибкость, высо-

кая точность и детализация, а также сокращение времени и затрат – все это делает 3D-печать хорошим методом для единичного и мелкосерийного изготовления качественных насосов. В будущем, с развитием технологий аддитивного производства, можно ожидать еще большего увеличения эффективности и применимости этого метода в данном производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алгоритм деления объемной модели на слои для 3D-печати / И. А. Гушин, А. Р. Авдеев, А. А. Швец, А. В. Дроботов // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2016. – Вып. 11, ч. 2. – С. 99–105.
2. Анализ способов повышения производительности устройств объемной печати для изготовления сборочных изделий / А. В. Дроботов, А. Р. Авдеев, А. А. Швец // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 11. – С. 3–6.

3. Модуль «Производство» в программном комплексе «Виртуальный 3D-принтер 1.0» / Е. А. Синицин, О. И. Бритова, В. В. Попов [и др.] // Супервычисления и математическое моделирование : тр. XVIII междунар. конф., Саров, 23–26 мая 2022 года. – Саров : Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики – Российский федеральный ядерный центр, 2023. – С. 391–399. – DOI 10.53403/9785951505279_2023_391_399. – EDN YCWDTW.

4. Производство манжетных уплотнений поршня методами 3D- и 5D-печати / И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, И. А. Гушин [и др.] // Аддитивные технологии: настоящее и будущее : матер. VII Междунар. конф., Москва, 07–08 октября 2021 года. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 2021. – С. 120–133. – EDN WALGTG.

5. Шеметов, Л. И. Трансформация геометрии образца для механических испытаний конструкционных материалов в FDM-структуре / Л. И. Шеметов, В. Б. Распопина, А. С. Чернышков // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 386–400. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-3-386-400. – EDN PSJDTZ.

УДК 004.032.26

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-49-52

Б. А. Крижевский, М. П. Кухтик

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОМАДНЫХ КОНФЕТ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: krizhevskiy.boris@gmail.com, mpkuhtik@gmail.com

Разработана автоматизированная система прогнозирования качества помадных конфет на основе нейронной сети. Описана обучающая выборка технологических параметров и модель нейронной сети. Рассмотрен алгоритм работы системы прогнозирования. Получены рекомендации по корректировке технологических параметров, и установлено их влияние на оценку качества продукции для обучающей выборки.

Ключевые слова: помадные конфеты, нейронная сеть, прогнозирование качества, обучающая выборка

B. A. Krizhevskiy, M. P. Kukhtik

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR PREDICTING THE QUALITY OF FONDANT CANDIES BASED ON A NEURAL NETWORK

Volgograd State Technical University

An automated system for predicting the quality of fondant candies based on a neural network has been developed. The training sample of technological parameters and the neural network model have been described. The algorithm of the forecasting system operation has been considered. Recommendations for adjusting process parameters have been obtained and their impact on the assessment of product quality for the training sample have been determined.

Keywords: fondant candies, neural network, quality predicting, training sample

Контроль качества пищевой продукции является ключевым фактором успешного функционирования предприятий пищевой промышленности. Особую актуальность данная задача приобретает в условиях значительного износа оборудования кондитерской промышленности

РФ, что приводит к колебаниям технологических параметров и снижению качества продукции [1]. Процесс производства помадных конфет представляет собой сложную систему множества взаимодействующих факторов. Современные системы контроля и управления не могут

в полной мере учесть взаимосвязь между параметрами и их влияние на конечный результат. При слабоформализованных связях контролируемых параметров хода процесса производства с показателями вкуса конфет задача повышения качества продукции может быть решена на основе использования искусственной нейронной сети [2].

Предлагается разработать нейронную сеть, интегрированную в автоматизированную систему производства помадных конфет для того, чтобы на основе технологических данных, получаемых с датчиков оборудования, предсказывать оценку качества продукта и выдавать оператору рекомендации по изменению технологических параметров для улучшения качества.

Для обучения модели нейронной сети была создана обучающая выборка (таблица) [3].

Обучающая выборка

Параметр	Значение
Температура нагрева смеси, °C	116,9
Время варки массы, мин	24,6
Скорость перемешивания, об/мин	51
Время кристаллизации, мин	21,9
Температура кристаллизации, °C	21,3
Время выдержки в тоннеле, ч	8,3
Температура тоннеля, °C	16,7
Оценка экспертов (от 1 до 10)	6

Данная выборка содержит в себе все требуемые входные и итоговые параметры для обучения, такие как: температура нагрева смеси, время варки массы, скорость перемешивания, время кристаллизации, температура кристаллизации, время выдержки в тоннеле, температура тоннеля, оценка экспертов. Выборка состоит из 2100 строк (каждая строка представляет собой отдельное наблюдение), каждая строка разбита на столбцы, в каждом столбце свой параметр. Пример одного наблюдения обучающей выборки приведен в таблице.

Как видно из обучающей выборки, входами нейросетевой модели являются технологические параметры: температура операции, время операции, скорость. Выходным значением модели является оценка экспертов (субъективная оценка вкуса по шкале от 1 до 10), на основе которой будет прогнозироваться качество произведенной продукции.

Структура нейронной сети представлена на рис. 1. Она состоит из входного и выходного слоя, а также слоя активации. Ее структура предназначена для решения задач регрессии (прогнозирования числового значения) [4].

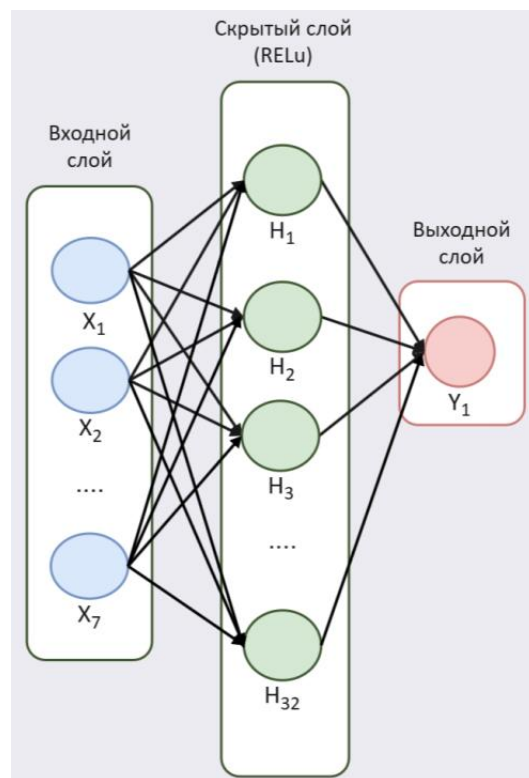


Рис. 1. Структура нейронной сети

Входной слой служит для приема исходных данных – семи технологических параметров, таких как температура, время операции, скорость и др. Эти параметры предварительно нормализуются в диапазоне от 0 до 1, что устраняет влияние разницы в масштабах признаков и ускоряет процесс обучения. Нормализация также снижает риск доминирования отдельных параметров над остальными, обеспечивая сбалансированный вклад каждого признака в прогноз.

Скрытый слой, состоящий из 32 нейронов, выполняет ключевую роль в преобразовании входных данных. Каждый нейрон этого слоя анализирует комбинации признаков, выявляя нелинейные зависимости между технологическими параметрами и итоговой оценкой качества. Функция активации ReLU, используемая в этом слое, позволяет модели эффективно обучаться: она «включает» нейроны только при положительных значениях входных сигналов, что ускоряет расчеты и предотвращает затуха-

ние градиентов – распространенную проблему при обучении глубоких сетей [5]. Для повышения обобщающей способности в скрытый слой добавлена L2-регуляризация, которая штрафует модель за избыточно большие веса, тем самым снижая риск переобучения на шумах или случайных паттернах в данных.

Выходной слой содержит один нейрон с линейной функцией активации, который формирует итоговый прогноз – числовое значение оценки качества в диапазоне от 1 до 10. Линейная активация выбрана для обеспечения непрерывного вывода, что критично для регрессионных задач. Этот слой агрегирует информацию, извлеченную скрытым слоем, и преобразует ее в окончательную оценку, соответствующую экспертной шкале.

Алгоритм работы автоматизированной системы прогнозирования на основе нейросети состоит в следующем. При необходимости произ-

вести оценку качества продукции оператор со своего ПК (сервера хранения и обработки данных) посредством клика кнопки в веб-интерфейсе системы отправляет запрос на получение информации технологических параметров с датчиков. После поступления данных от датчиков на ПК оператора происходит перенаправление информации на обученную модель нейросети посредством обработчика серверного фреймворка Django. После обработки информации от модели поступают данные о предсказанной оценке и ее зависимостях от технологических параметров, а также рекомендации по корректировке технологических параметров. Полученные данные от модели выводятся на веб-странице с отображением информативного графика зависимостей (градиента) качества продукции от технологических параметров. На рис. 2 приведен пример выводимой информации в веб-интерфейсе системы оператору.

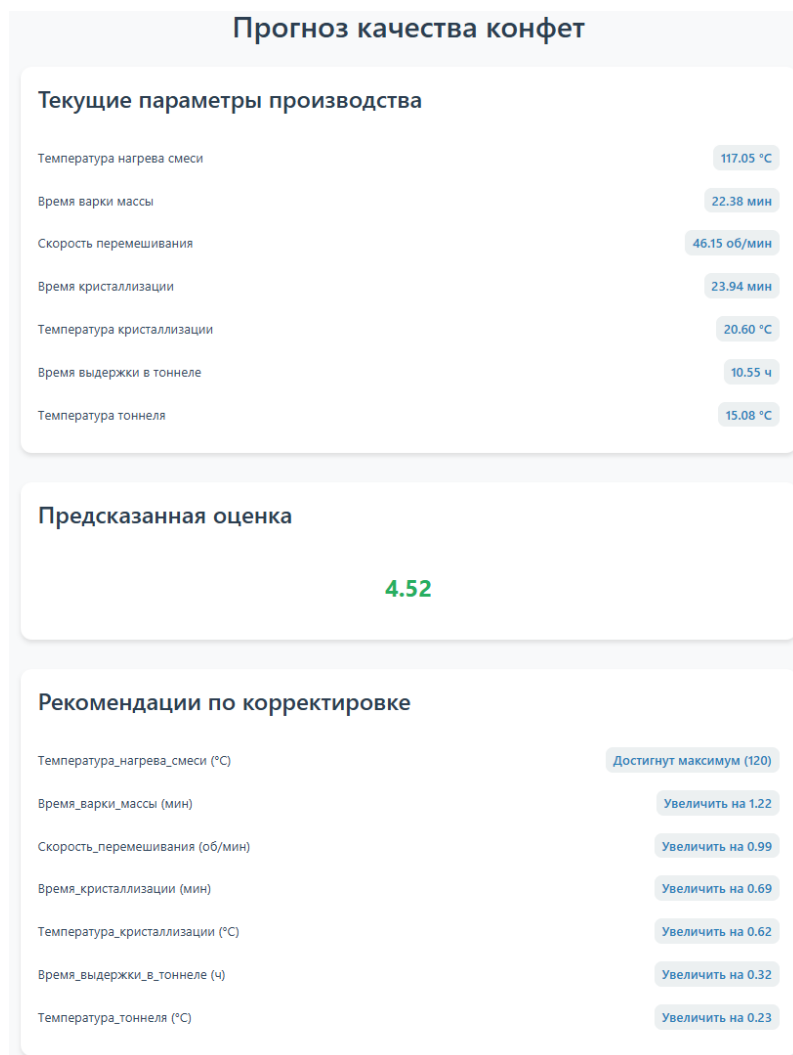


Рис. 2. Данные о технологических параметрах и рекомендации по корректировке

На рис. 3 представлен выводимый график зависимости оценки качества от технологических параметров, у каждого параметра есть свой градиент (положительное или отрицательное влияние на показатель оценки вкуса). Градиенты в нейронной сети выполняют роль «инструктора», который корректирует внутренние

параметры модели (веса) для минимизации ошибки предсказания. В контексте задачи прогнозирования экспертной оценки качества продукции градиенты определяют, как изменения технологических параметров (например, температуры, времени операции) влияют на итоговый результат.

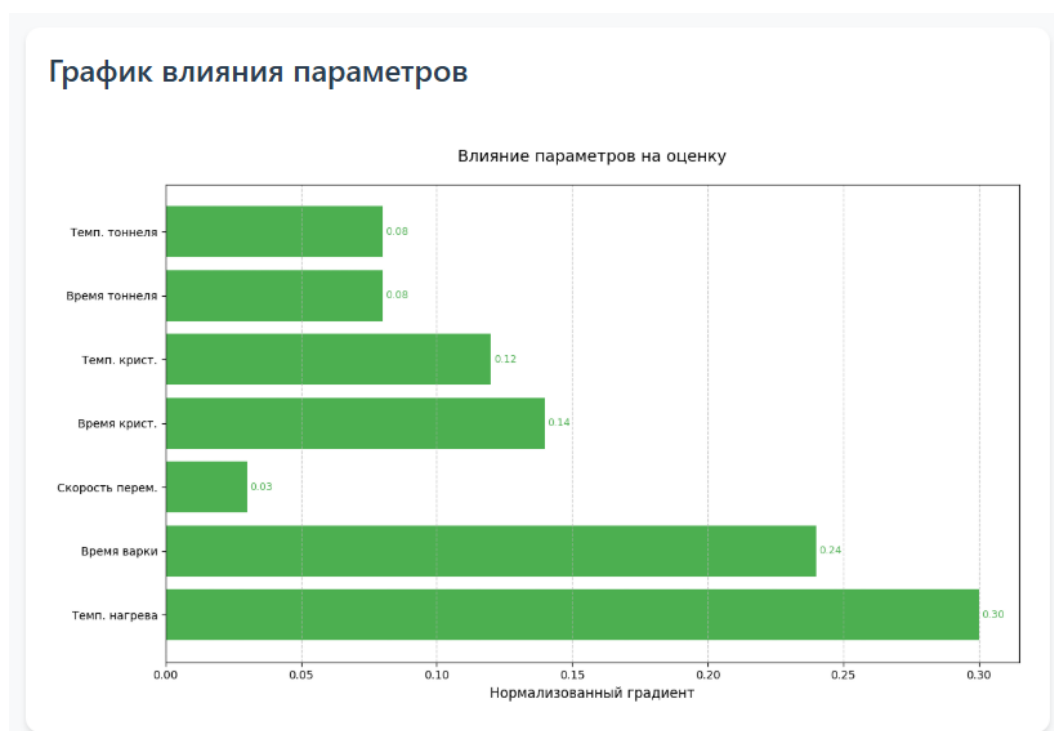


Рис. 3. График влияния параметров на оценку качества

Разработанная автоматизированная система прогнозирования на основе нейросети позволяет улучшить показатели качества кондитерской продукции и помогает определить приоритеты модернизации оборудования. Реализованный подход может быть адаптирован для других типов кондитерских изделий и технологических процессов, что делает его универсальным инструментом повышения эффективности производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Титов, А. К.* Состояние и перспективы развития кондитерской промышленности Российской Федерации на современном этапе / А. К. Титов // Вестник Академии знаний. – 2021. – № 47(6). – С. 319–323. – DOI: 10.24412/2304-6139-2021-6-319-323. – EDN VOVZNV.

2. *Благовещенский, И. Г.* Методологические основы создания экспертных систем контроля и прогнозирования качества пищевой продукции с использованием интеллектуальных технологий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / Благовещенский И. Г. ; МГУПП. – Москва, 2018.

3. *Репников, А. И.* Разработка нейронной сети для определения кавитационного запаса насосных агрегатов / А. И. Репников, Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 3 (250) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 69–71. – DOI: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-69-71.

4. Введение в архитектуры нейронных сетей [Электронный ресурс]: сайт. – URL: <https://habr.com/ru/companies/oleg-bunin/articles/340184/> (дата обращения: 04.05.2025)

5. Функции активации нейросети: сигмоида, линейная, ступенчатая, ReLu, tahn [Электронный ресурс]: сайт. – URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/activation-functions/> (дата обращения: 04.05.2025)

УДК 654.071.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-53-55

*Р. Е. Меженин, В. Г. Барабанов***РАЗРАБОТКА ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЗОННОГО РЕЖИМА
НА БАЗЕ ПЛК ОВЕН****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: romankryt13@yandex.ru, vbarabanov@vstu.ru

В статье представлены особенности разработки приточно-вытяжной климатической установки с автоматическим сезонным регулированием. Авторами предложена система управления на базе ПЛК ОВЕН, обеспечивающая оптимизацию параметров микроклимата и снижение энергопотребления.

Ключевые слова: климатическая установка, сезонный режим, программируемый логический контроллер

*R. E. Mezhenin, V. G. Barabanov***DEVELOPMENT OF A SUPPLY AND EXHAUST AIR CONDITIONING SYSTEM
WITH THE POSSIBILITY OF CHANGING THE SEASONAL
REGIME BASED ON OVEN PLC****Volgograd State Technical University**

The article presents the features of the development of a supply and exhaust air conditioning system with automatic seasonal control. The authors proposed a PLC-based OVEN control system that optimizes microclimate parameters and reduced energy consumption.

Keywords: climate control system, seasonal mode, programmable logic controller

Промышленное производство характеризуется специфическими условиями труда, где технологическое оборудование генерирует токсичные выбросы, газовые примеси, тепловые нагрузки и аэрозольные частицы. На Волгоградском заводе технического углерода, специализирующемся на синтезе сажевых продуктов, эти факторы приобретают особую значимость из-за выделения высокодисперсных частиц углерода (10–500 нм) и взрывоопасных концентраций пыли. Для минимизации негативного воздействия на персонал и окружающую среду в промышленных цехах внедряются приточно-вытяжные вентиляционные системы (ПВВ). Данные системы представляют собой многоуровневые инженерные комплексы, предназначенные для нормализации микроклиматических показателей и удаления из рабочей зоны вредных веществ промышленного происхождения [2].

Перед проектированием ПВВ для такого предприятия обязательным этапом является анализ проектной документации с детальным изучением технологических процессов. Критически важным параметром при разработке системы выступает точное определение состава загрязняющих веществ: для завода технического углерода ключевыми рисками являются превышение

ПДК сажевой пыли (≥ 4 мг/м³), образование взрывоопасных концентраций (от 20 г/м³), а также тепловыделения до 5 кВт/м² от реакторных линий. Дополнительные функции ПВВ на данном производстве включают терморегуляцию рабочей зоны (+16...+22 °С), предотвращение формирования «тепловых куполов», поддержание влажности 40–60 % для подавления пылеобразования и аварийное усиление вытяжки при превышении ПДК токсичных газов. Энергоэффективность системы обеспечивается рекуперацией тепла вытяжных потоков, снижающей затраты на подогрев приточного воздуха до 40 %. Таким образом, ПВВ выполняет санитарно-гигиенические задачи в соответствии со СНиП 41-01–2003 и ГОСТ 12.1.005–88 и технологические функции, непосредственно влияющие на безопасность персонала.

Разрабатываемая система автоматизации приточно-вытяжной установки для Волгоградского завода технического углерода предусматривает использование программируемого логического контроллера ПЛК210 ОВЕН в качестве центрального управляющего элемента. В системе реализуется обработка сигналов от датчиков температуры и влажности, установленных в критических точках воздушного тракта, с формированием управляющих команд для

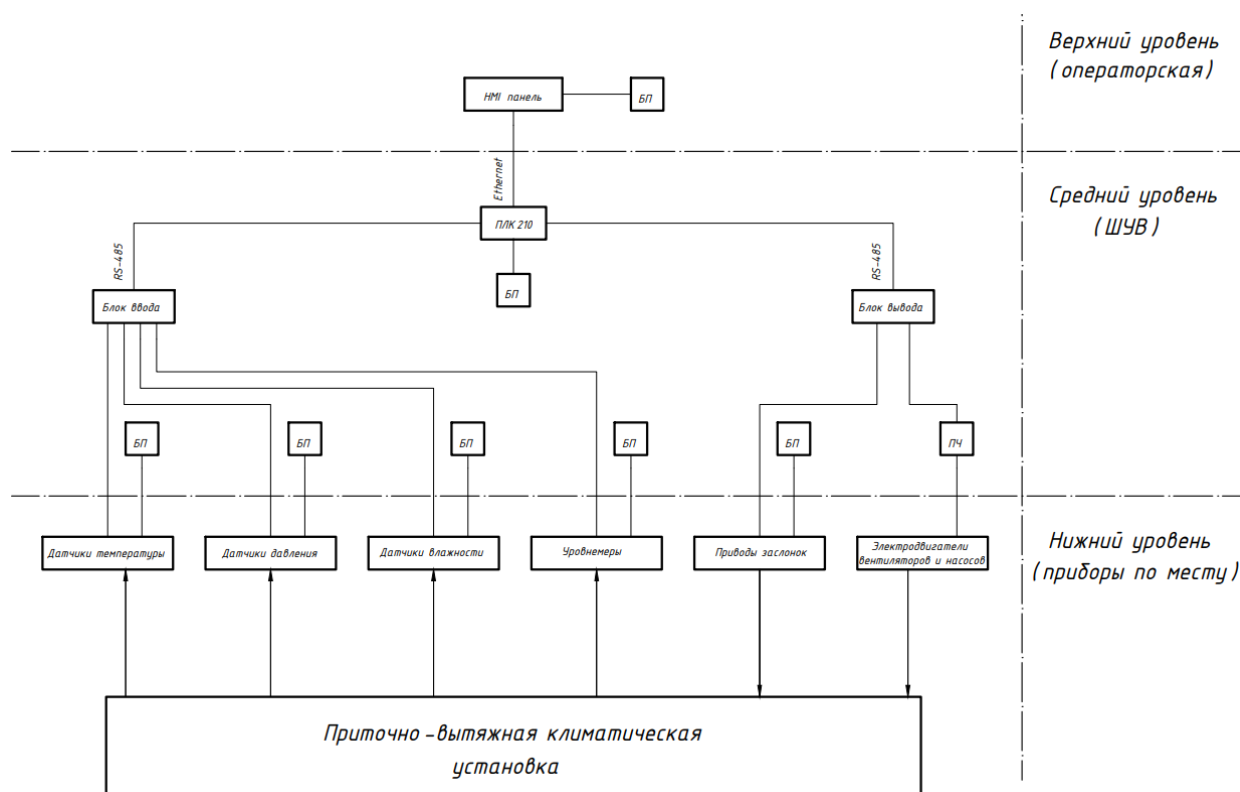
исполнительных механизмов [1]. Алгоритм сезонного регулирования включает два основных режима: при температуре наружного воздуха $\leq +5$ °С (зимний режим) ПЛК активирует насос циркуляции теплоносителя для подогрева воздуха через калориферную секцию, одновременно обеспечивая максимальную рекуперацию тепла. В летнем режиме (температура $\geq +15$ °С) система переключается на работу с насосом хладагента, осуществляющим охлаждение приточного воздуха.

Разработка предусматривает круглогодичное поддержание функции увлажнения воздуха для подавления сажевых частиц (рисунок), где ПЛК регулирует производительность увлажняющих насосов, обеспечивая относительную влажность не ниже 40 % в рабочих зонах. Система реализует плавное регулирование производительности вентиляторов и положения заслонок через частотные преобразователи и сервоприводы с аналоговым управлением.

Для обеспечения безопасности эксплуата-

ции проектом предусматривается интеграция реле сухого хода, передающего сигнал на контроллер при падении давления воды ниже 0.5 бар, что вызывает блокировку насосов увлажнения. При снижении температуры приточного воздуха до $+5$ °С формируется команда аварийного отключения калорифера. Разрабатываемая система автоматически усиливает производительность вытяжки при превышении допустимых концентраций вредных веществ [3].

Программирование управляющего контроллера ПЛК210 ОВЕН осуществляется в интегрированной среде разработки CODESYS 3.5, соответствующей требованиям стандарта МЭК 61131-3. Процесс разработки программного обеспечения начинается с конфигурации аппаратных модулей ввода-вывода, где задаются параметры подключения аналоговых датчиков температуры, влажности и исполнительных устройств. Основное внимание уделяется реализации алгоритмов сезонного регулирования, для чего применяется язык структурированного текста (ST).



Электрическая структурная схема разрабатываемой климатической установки

Этот язык позволяет описать сложную логику переключения между режимами на основе анализа температурных условий наружного воздуха. При программировании функций безопасности создаются высокоприоритетные про-

граммные задачи с минимальным циклом выполнения. Эти задачи обрабатывают сигналы аварийных датчиков, включая реле контроля давления воды и термозащиты калорифера. Для контуров регулирования температуры и влаж-

ности используются готовые функциональные блоки ПИД-регуляторов из стандартной библиотеки CODESYS, которые настраиваются с учетом динамических характеристик объекта управления. Параметры регуляторов адаптируются в зависимости от текущего режима работы установки.

Регулирование приточной и вытяжной заслонок в климатической установке зависит от температуры наружного воздуха, что обеспечивает безопасность оборудования, энергоэффективность и поддержание требуемого воздухообмена. В зимний режим система переходит при температуре ниже $+8^{\circ}\text{C}$, ограничивая открытие приточной заслонки до 30–50 %, чтобы минимизировать поступление холодного воздуха. Это предотвращает обмерзание трубок водяного калорифера, которое возникает при резком охлаждении теплоносителя ниже, а также снижает теплопотери. Одновременно вытяжная заслонка регулируется для поддержания перепада давления в пределах 10–15 Па, что исключает избыточную потерю тепла через вытяжку. При этом минимальное открытие приточной заслонки (не менее 30 %) гарантирует требуемый воздухообмен.

В летнем режиме, активируемом при температуре выше $+12^{\circ}\text{C}$, приточная заслонка открывается на 80–100 %, обеспечивая максимальный приток воздуха для охлаждения помещений и эффективного вывода загрязнений.

Резкие перепады температуры компенсируются алгоритмом с гистерезисом $\pm 2^{\circ}\text{C}$, что снижает частоту переключений режимов в межсезонье и продлевает ресурс оборудования.

При температурах ниже -15°C система автоматически снижает скорость вентиляторов на 20 % для уменьшения риска обмерзания, а в случае угрозы заморозки теплоносителя (падение температуры обратной воды ниже $+40^{\circ}\text{C}$) заслонки полностью закрываются, переключая циркуляцию на малый контур.

Внедрение разработанной системы управления приточно-вытяжной вентиляцией на базе

ПЛК210 ОВЕН на Волгоградском заводе технического углерода прогнозирует значительное повышение энергоэффективности и улучшение эксплуатационных показателей. Ожидается снижение энергопотребления на 28–32 % за счет оптимизации сезонных режимов работы, где максимальное использование рекуперации тепла в зимний период позволит сократить затраты на подогрев приточного воздуха, а летний алгоритм минимизации теплопритоков через рекуператор уменьшит нагрузку на систему охлаждения. Автоматическое регулирование производительности вентиляторов с помощью частотных преобразователей обеспечит адаптацию к текущей нагрузке, исключая работу оборудования на избыточной мощности, что дополнительно снизит электропотребление на 15–18 % по сравнению с дискретным управлением [4].

В результате разработана система автоматизации приточно-вытяжной климатической установки с возможностью сезонного регулирования на базе ПЛК ОВЕН, что позволит оптимизировать энергоэффективность и микроклимат производственных помещений Волгоградского завода технического углерода. Реализованы алгоритмы автоматического переключения режимов, контроля параметров и безопасности оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гильванов, Д. Р. Новые подходы к автоматизации систем вентиляции и кондиционирования / Д. Р. Гильванов // *Science and technology*. – 2024. – С. 15–18.
2. Гурьянов, Д. В. Автоматизированная приточно-вытяжная система вентиляции / Д. В. Гурьянов, В. А. Каширин // *Наука и Образование*. – 2023. – Т. 6, № 2. – С. 9.
3. Мухлисова, Д. Н. Текущие проблемы автоматизации вентиляции / Д. Н. Мухлисова // *Инновационная наука*. – 2024. – Т. 1, № 12-1. – С. 87–88.
4. Рязанов, М. Ю. Области применения местной вентиляции в современных производственных процессах / М. Ю. Рязанов, О. А. Аверкова // *Fundamental science and technology*. – Уфа : Научно-издательский центр «Вестник науки», 2025. – С. 97–101.

УДК 628.32

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-56-59

*В. А. Пугачева, С. Г. Поступаева***МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
УСТАНОВКИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: viktoriakmv@list.ru, posvetlana@mail.ru

В статье проводится исследование системы управления установкой очистки высокоминерализованных сточных вод с содержанием солей свыше 10 г/дм^3 на базе контроллера ОВЕН ПЛК-160 [M02]. Разработанная система имеет многоступенчатую систему очистки, включающую в себя: коагуляцию, отстаивание, фильтрацию, УФ-обеззараживание. Спроектированы комбинированная структурная и комбинированная технологическая схемы АСУ установкой очистки сточных вод.

Ключевые слова: очистка сточных вод, модернизация системы, программируемый логический контроллер

*V. A. Pugacheva, S. G. Postupaeva***MODERNIZATION OF THE AUTOMATION SYSTEM
OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS****Volgograd State Technical University**

The article studies the control system of a plant for treating highly mineralized wastewater with a salt content of over 10 g/dm^3 based on the OWEN PLC-160 [M02] controller. The developed system has a multi-stage cleaning system, including: coagulation, settling, filtration, UV disinfection. Combined structural and combined technological ACS schemes for the wastewater treatment plant have been designed.

Keywords: wastewater treatment, system modernization, programmable logic controller

Очистка сточных вод на предприятии – важная составляющая технологического процесса. По сравнению с бытовыми стоками, промышленные содержат больше видов вредных загрязняющих веществ. Такие воды запрещено сбрасывать в общую канализацию без предварительной очистки.

Очистка сточных вод может производиться несколькими методами – механическим, физико-химическим, биологическим, биохимическим, химическим и комплексным [1]. Установки для очистки сточных вод предназначены для очистки от остаточных нефтепродуктов и механических примесей и доведения обрабатываемой воды до таких кондиционных характеристик, которые позволяют применять эту воду в системе сбора и подготовки нефти и газа с блоком водоподготовки (ППД).

При потреблении технической воды на Волгоградском УПХГ образуется единый поток сточных вод – рассол от размыва подземных резервуаров в толще каменной соли при эксплуатации подземных хранилищ для жидких и сжиженных продуктов. Единственным суще-

ствующим способом очистки от метанола является микробный. Однако, в силу содержания в сточных водах Волгоградского УПХГ большого количества солей (свыше 10 г/дм^3) данный способ является невозможным. Поэтому возникает необходимость в проведении модернизации существующей установки очистки сточных вод с целью повышения качества очистки, снижения затрат на обслуживание и эксплуатацию системы.

В качестве средств автоматизации были подобраны датчики давления Метран-150 и ПД-100И, счетчики жидкости ультразвуковые US-800, клапаны электромагнитные СК-11-15 и преобразователи частоты Е4-8400 и Е3-9100. Для управления технологическим процессом очистки сточных вод будет применен программируемый логический контроллер (ПЛК) ОВЕН ПЛК-160 [M02] [2]. Также к ПЛК необходимо добавить модули дискретного вывода МУ110-32Р и аналогового ввода МВ110-8А.

Структура разработанной АСУ ТП очистки сточных вод представлена на рис. 1.

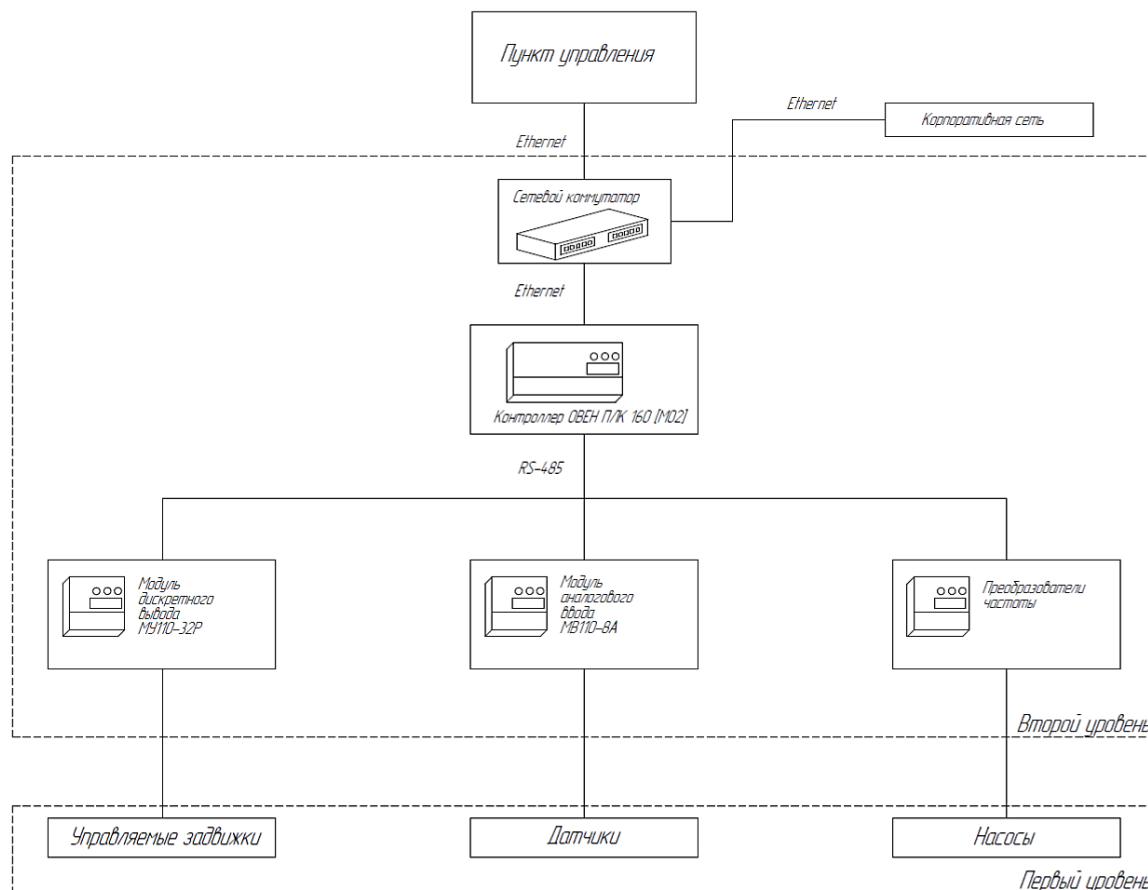


Рис. 1. Комбинированная структурная схема АСУ установкой очистки сточных вод

АСУ ТП выполняет следующие функции:

- дистанционное программное управление насосами подачи реагентов на разбавление;
- автоматическое управление системой дозирования раствора коагулянта;
- программное управление аппаратами подготовки реагентов;
- дистанционное программное управление насосами раздачи реагентов;
- дистанционное программное управление насосами откачки стоков;
- автоматическое программное управление клапанами.

На первом уровне АСУ ТП находятся: электропривода насосов, информационно-измерительные комплексы датчиков и первичных преобразователей (расходомеры, датчики уровней, интенсивности УФО), насосы подачи воды на фильтрацию, блоки управления напорными фильтрами для реализации автоматической работы фильтров, установки ультрафиолетовой очистки, шиберная задвижка с электроприводом, винтовые насосы осадка, насосы-дозаторы для коагулянта и флокулянта, перемешивающие устройства, электромагнитные клапаны.

Второй уровень АСУ ТП очистных сооружений состоит из локальных шкафов управления технологическим оборудованием.

В ходе проведения исследований для модернизации была разработана схема комбинированная технологическая АСУ ТП очистки сточных вод (рис. 2).

В сточных водах требуется проводить дозирование неорганического коагулянта, необходимого для более быстрого выпадения осадка. Жидкий коагулянт приготавливается в баке ME06, тут же и дозируется. В статическом смесителе M1X01.0I сточные воды смешиваются с коагулянтом, а далее поступают в емкость механической очистки E01.01 в баке ME01. Очищенные механически воды поступают в промежуточный бак V02.01, предназначенный для хранения промывной воды для фильтров.

Насосы P02.01A/B имеют частотно-регулируемый привод и подают воду из V02.01 на фильтры. Фильтры F02.01A/B осуществляют доочистку дождевых вод в баке ME02 и имеют управляющие клапаны EUV02.01A/B. Данные клапаны осуществляют контроль над работой фильтров с помощью таймера: по истечении вре-

мени фильтр осуществляет промывку. После взрыхления и сброса флоккул в дренаж включает-

ся режим прямой промывки. После окончания данной промывки начинается режим фильтрации.

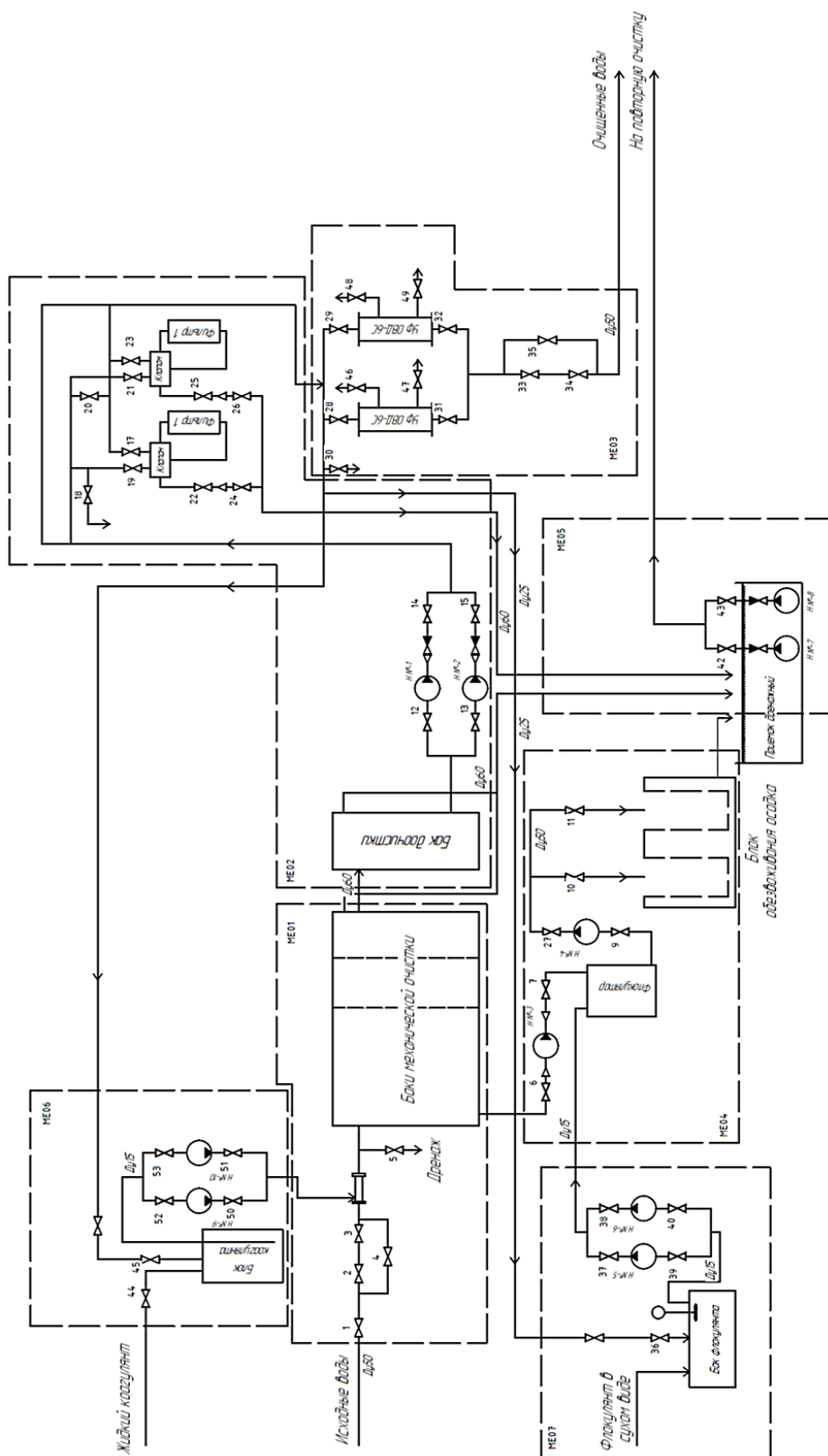


Рис. 2. Комбинированная технологическая схема АСУ ТП очистки сточных вод

Часть фильтрата поступает на заполнение баков реагентов. Промывная вода с загрязнителями поступает в дренажный приемок.

Установка УФ UV03.01A/B служит следующим этапом после доочистки и находится в баке ME03. Она выполняет функцию дезинфекции сточных вод перед их выпуском. После обеззараживания сточные воды собираются в приемных камерах насосных станций.

В процессе очистки дождевых вод в установке E01.01 появляется осадок, который удаляется с помощью винтового насоса P04.01, осуществляющего функцию перекачки осадка во флокулятор FC04.01 в баке ME04. В баке ME07 происходит приготовление и дозирование флокулянта. Он необходим для образования флоккулов в осадке с помощью флокулятора, который медленно перемешивает осадок в сочетании с рабочим раствором. Сфлокулированная смесь перекачивается в мешковую сушилку благодаря винтовому насосу P04.02. После выдержки меш-

ка, наполненного осадком, по таймеру, оператор заменяет его. Дренажный приемок V05.01 в баке ME05 служит для сбора фильтрата от блока обезвоживания, промывных вод фильтров и других жидкостей. Насосы P05.01A/B отводят собранные дренажные и промывные воды в канализационную магистраль КЗ.

Таким образом, проведенное исследование установки очистки сточных вод позволяет провести модернизацию ее системы управления с применением современных средств автоматизации, обеспечивающие высокую надежность и эффективность работы оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ современных методов и технологий промышленной водоочистки / Е. Н. Неверов, А. К. Горелкина [и др.] // Ползуновский вестник. – 2023. – № 3. – С. 215–225.
2. ПЛК160 [M02] программируемый контроллер для средних систем [Электронный ресурс]. – URL: <https://owen.ru/product/plk160> (дата обращения 12.05.2025).

УДК 654.071.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-59-61

Р. Ф. Тарасов, В. Г. Барабанов

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТКАЧКИ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СТОКОВ НА БАЗЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПЛК HCFA

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tarasov.r.f@gmail.com, vbarabanov@vstu.ru

В статье приведены особенности и принцип работы канализационных насосных станций. Авторами предложена система управления на базе ПЛК HCFA, обеспечивающая оптимизацию энергоэффективности и повышение надежности системы.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, насосная станция

R. F. Tarasov, V. G. Barabanov

DEVELOPMENT OF A SEWAGE PUMPING CONTROL SYSTEM BASED ON HCFA INDUSTRIAL PLC

Volgograd State Technical University

The article describes the features and operating principle of sewage pumping stations. The authors have analyzed the existing control systems for pumping sewage as part of wastewater disposal systems.

Keywords: automated control system, pumping station

Канализационные насосные станции (КНС) играют важную роль в системе коммунального водоснабжения и водоотведения. Они необходимы для перекачки сточных вод из низменных районов в системы очистки или на более высокие уровни [1, 2].

Необходимость КНС обусловлена:

1. Поддержание санитарии. КНС защищают от затопления сточными водами низменные территории.
2. Повышение эффективности. Они позволяют обеспечить надежное удаление сточных вод, минимизируя риски засоров и аварий.
3. Экологическая безопасность. Своевремен-

ное удаление и обработка сточных вод помогают предотвратить загрязнение окружающей среды.

4. Развитие инфраструктуры. При строительстве новых жилых и коммерческих объектов наличие КНС позволяет успешно интегрировать их в существующую систему водоотведения.

Канализационные насосные станции активно используются как в городах, так и в сельских районах. Они устанавливаются:

1. В новых районах. На этапе планирования новых жилых массивов или промышленных зон.

2. В старых системах. Для модернизации и улучшения существующих канализационных систем с целью повышения их производительности.

3. В сложных рельефах. КНС часто устанавливаются в горах или на холмах, где сточные воды не могут самостоятельно стекать вниз.

Таким образом, КНС становятся неотъемлемой частью современных систем водоснабжения и водоотведения, способствуя их эффективной работе и обеспечивая санитарные нормы.

Основные составляющие современной КНС:

1. Насосное оборудование. Центральный элемент для перекачки сточных вод, включая объемные и центробежные насосы.

2. Приемная камера. Основной резервуар для сбора сточных вод, который фильтрует твердые частицы и обеспечивает равномерную загрузку насосов.

3. Система управления. Автоматизированные системы для мониторинга состояния, контроля уровня воды и управления работой насосов.

4. Система фильтрации. Устройства для удаления крупных частиц и предотвращения повреждений насосов.

5. Корпус и конструктивные элементы. Прочные материалы, обеспечивающие защиту от коррозии и доступ к оборудованию.

6. Выходной канал. Проход для отводимых сточных вод в системы очистки или дальнейшего распределения.

7. Системы аварийной безопасности. Защита от непредвиденных ситуаций, включая автоматическое отключение и резервные насосы.

8. Датчики и мониторинг. Устройства для контроля качества сточных вод и состояния оборудования.

Основные преимущества автоматизированных КНС:

Автоматизация канализационных насосных станций не только упрощает их эксплуатацию,

но и продлевает срок службы оборудования. Благодаря точному управлению насосами снижается их износ, а своевременное оповещение о неполадках позволяет избежать серьезных повреждений. Кроме того, такие системы помогают экономить электроэнергию, так как насосы работают только при необходимости.

Внедрение автоматизированных решений делает канализационные насосные станции более надежными и удобными в эксплуатации. Это особенно важно для крупных городов, где нагрузка на системы водоотведения постоянно растет. Современные технологии позволяют не только упростить управление КНС, но и сделать их более устойчивыми к внешним воздействиям.

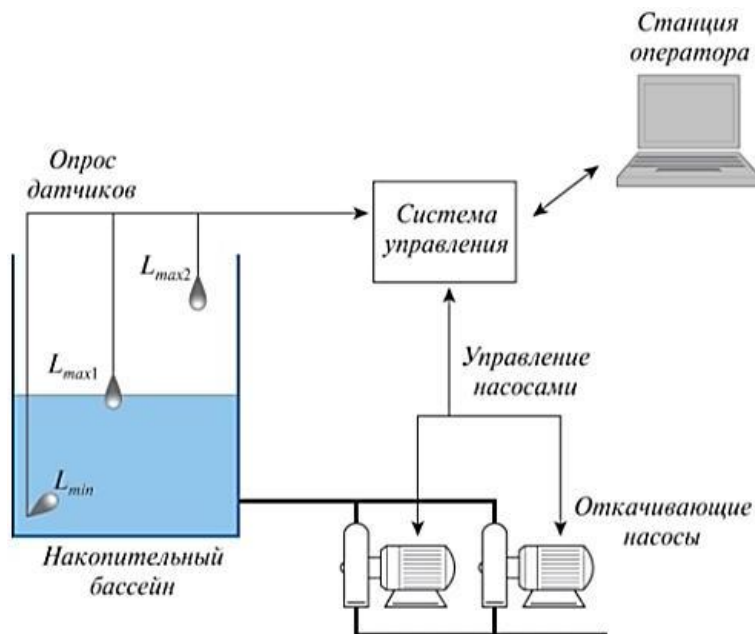
Принцип работы системы:

Сточные воды попадают в приемный резервуар станции и накапливаются до определенного уровня. После достижения заданного уровня автоматика запускает насосы, которые качают стоки в напорный трубопровод для дальнейшей отправки к очистным сооружениям.

Насосы работают в тесной связи с другими компонентами системы, такими как датчики уровня, блоки управления и системы удаленного мониторинга. Датчики уровня контролируют объем сточных вод в резервуаре и передают сигналы на блок управления, который регулирует работу самих насосов, обеспечивая их своевременное включение и выключение. Принцип работы схематично приведен на рисунке.

Для эффективной работы станции водоканала, требовалась модернизация путем внедрения автоматизированной системы управления [3]. Необходимо было выполнить требования к разрабатываемой системе: оптимизировать эксплуатационные показатели объекта, минимизировать затраты, использовать при разработке системы сертифицированное оборудование, простота настройки.

В результате была разработана система на базе программируемого логического контроллера HCFAPLC HCM511-32MT4-D. Она автоматически управляет процессом перекачки сточных вод. Если уровень стоков в приемной емкости превышает заданные значения, система активирует насосы с использованием частотных преобразователей. Датчик уровня APLISENS SG-25 обеспечивает точное измерение уровня жидкости, а в случае необходимости подключается резервный насос. Также предусмотрены защитные функции от «сухого хода» и контроль уровней с помощью поплавковых выключателей.



Принцип работы системы откачки стоков

Программирование управляющего контроллера ПЛКНСМ511-32MT4-D HCFA осуществляется в интегрированной среде разработки CODESYS 3.5, соответствующей требованиям стандарта МЭК 61131-3. Процесс разработки программного кода включает в себя конфигурацию аппаратных модулей ввода-вывода, где задаются параметры подключения аналоговых датчиков уровня, преобразователей избыточного давления перед и после насоса. Основное внимание уделяется реализации алгоритма управления и защиты оборудования, для чего применяется язык структурированного текста (ST). При программировании функций безопасности создаются высокоприоритетные программные задачи с минимальным циклом выполнения. Эти задачи обрабатывают сигналы аварийных датчиков, включая преобразователи давления воды на входе и выходе насосов, температуры обмоток ЭД, температуры подшипников ЭД, сигнализаторов воды в масляных камерах, сигнализаторов течи в полости электродвигателей и вибрации насосов.

Была разработана функциональная схема, алгоритм работы, опирающийся на принцип работы, так же структурная схема и произведен подбор комплектующих системы.

Внедрение автоматизированной системы управления позволило сэкономить расход электроэнергии, упростила работу обслуживающего персонала, а также значительно повысила безопасность эксплуатации канализационной насосной станции. Система автоматически отсле-

живает различные технологические параметры, что позволяет предотвращать возможные аварийные ситуации, обеспечив надежную работу насосной станции. В результате вероятность, что система окажется работоспособной спустя 5000 ч рабочего времени возросла на 6 %. Также введение автоматики позволит снизить затраты на электроэнергию на 15–18 %. Такого экономического эффекта удалось достичь за счет управления насосами с помощью частотных преобразователей, которые контролируются ПЛК напрямую.

В результате анализа существующих систем управления КНС в составе систем водоотведения была разработана автоматизированная система управления рассматриваемым в работе объектом. Данная разработка позволила повысить надежность и снизить затраты на электроэнергию, улучшить точность управления, а также повысить безопасность работы персонала КНС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Невзорова, А. Б. Автоматизация технологических процессов систем водоснабжения и канализации : учеб.-метод. пособие / А. Б. Невзорова ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 151 с.
2. Зуев, К. И. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения : учеб. пособие / К. И. Зуев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. – 224 с.
3. Автоматизация канализационных насосных станций: техническое описание // Компания «АВОК»: официальный сайт. – URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7112 (Дата обращения 15.05.2025).

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-62-64

Д. М. Текутов, С. Г. Поступаева

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ФИНАНСИРОВАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tdm-111@mail.ru, posvetlana@mail.ru

Описывается способ модернизации автоматизированной системы противопожарной защиты (АСПЗ) с использованием метода многокритериальной автоматизации. Проведен анализ структуры и параметров АСПЗ как сложной технической системы, определены критерии модернизации на основе функциональных, качественных и стоимостных показателей, разработан алгоритм модернизации в условиях ограниченного финансирования.

Ключевые слова: автоматизированная система противопожарной защиты, многокритериальная оптимизация, критерии оптимизации, крупные промышленные объекты

D. M. Tekutov, S. G. Postupaeva

MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF AN AUTOMATED FIRE PROTECTION SYSTEM UNDER LIMITED FUNDING

Volgograd State Technical University

The article describes a method for upgrading an automated fire protection system (AFPS) using a multi-criteria automation method. The analysis of the structure and parameters of the AFPS as a complex technical system is carried out, the criteria for upgrading are determined based on functional, quality and cost indicators, and an algorithm for upgrading under conditions of limited funding is developed.

Keywords: automated fire protection system, multi-criteria optimization, optimization criteria, large industrial facilities

АСПЗ представляет собой сложную многоуровневую систему, входящую в автоматизированную систему управления крупного промышленного объекта. Она обеспечивает безопасность персонала, сохранность имущества и непрерывность технологических процессов. В связи с этим от нее требуется высокая степень надежности, адаптивности и функциональности [1].

Обычно, в условиях ограниченного финансирования, модернизация АСПЗ проводится не полностью, а частично, что порождает следующие проблемы:

- отсутствие объективного критерия для выбора очередности модернизации;
- трудности оценки эффективности улучшений по единственному показателю;
- не самую высокую вероятность распределения ресурсов, снижающую общую эффективность АСПЗ.

Кроме того, существующие методы модернизации зачастую опираются на экспертные мнения без формализованной поддержки принятия решений, что затрудняет обоснование технических и финансовых приоритетов.

Целью данной работы является повышение

эффективности модернизации АСПЗ крупных промышленных объектов за счет определения оптимальных направлений и многокритериальной оптимизации.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) провести анализ структуры и параметров АСПЗ как сложной технической системы, функционирующей во взаимодействии с другими подсистемами промышленного объекта;
- 2) определить множество критериев модернизации на основе функциональных, качественных и стоимостных показателей;
- 3) разработать алгоритм модернизации АСПЗ на основе метода многокритериальной оптимизации.

АСПЗ является сложным техническим объектом, который можно представить в виде математической модели, определяющей зависимость выходных параметров $Y(t)$ от параметров составляющих элементов $X(t)$ в момент времени t :

$$Y_j(t) = y(X(t)), \quad j = \overline{1, m},$$

при $X(t) = [X_1(t), \dots, X_n(t)]^T,$

$$Y(t) = [Y_1(t), \dots, Y_n(t)]^T. \quad (1)$$

Выходные параметры в данной модели отражают показатели качества, характеризующие корректность функционирования системы. Их значения зависят не только от характеристик отдельных элементов, но и от особенностей взаимосвязей между ними, то есть от конфигурации системы в целом. При фиксированном составе и структуре системы выходные параметры определяются исключительно входными воздействиями и параметрами внешней среды.

При модернизации или создании новой АСПЗ нельзя ее оценить только по одному показателю – существует множество параметров, часть из которых противоречивы (улучшение одного параметра может негативно сказаться на параметрах другого).

Существующие методы оптимизации можно разделить на четыре основные группы, в каждой из которых осуществляется:

- упорядоченная оптимизация по скалярным критериям с использованием приоритетов и последовательных уступок;
- оптимизация, рассчитанная на выявление Парето-оптимальных решений;
- оптимизация в смысле поиска решения вблизи от некоторого «идеального» значения;
- компромиссная оптимизация, в частности, агрегирование критериев с использованием весовых коэффициентов или реализацию пороговых стратегий выбора.

Каждая из этих групп имеет свои достоинства и недостатки. При этом анализ показал, что в результате применения именно четвертого метода решение будет наиболее бюджетным. Кроме того, решение на его основе также является Парето-оптимальным. Принимая во внимание указанные обстоятельства, можно утверждать, что оптимизация на основе компромиссных соотношений является наиболее подходящим методом для решения задачи оптимизации АСПЗ.

Основной принцип этого метода заключается в нахождении оптимального решения путем назначения допустимых значений локальных критериев либо установления определенных весовых соотношений между локальными критериями [3]. В последнем случае формирование обобщенной целевой функции происходит через введение меры согласованности между всеми нормированными частными показателями качества и представления данной функции в виде свертки.

Постановка задачи оптимизации следующая:

Пусть

$$V = \{v_i\}, i = 1, 2, \dots, N,$$

где V – множество допустимых вариантов отдельных мероприятий по модернизации или совершенствованию системы противопожарной защиты; N – общее количество рассматриваемых вариантов.

Решение задачи оптимизации сводится к определению варианта v^* , максимизацию интегрального критерия F :

$$v^* = \max F_i, \quad (2)$$

где F_i – оператор свертки, агрегирующий оценки f_j по частным критериям каждой i -ой работы с учетом их значимости, выраженной через соответствующие весовые коэффициенты W_j ,

$$F_i = F(W_1, W_2, \dots, W_j, \dots, W_m; f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_m) \quad (3)$$

где m – число частных параметров, используемых в системе оценки.

В качестве интегрального критерия используется взвешенная сумма частных критериев каждого варианта

$$F_i = \sum_{j=1}^m W_j f_j. \quad (4)$$

Для получения результата, обладающим прикладной ценностью, важным является выбор показателей для оценки с их весовыми коэффициентами W_i .

В последствии, принимая во внимание технологические и инфраструктурные особенности крупного промышленного объекта, выделяются три группы показателей: функциональные, качественные и стоимостные [2].

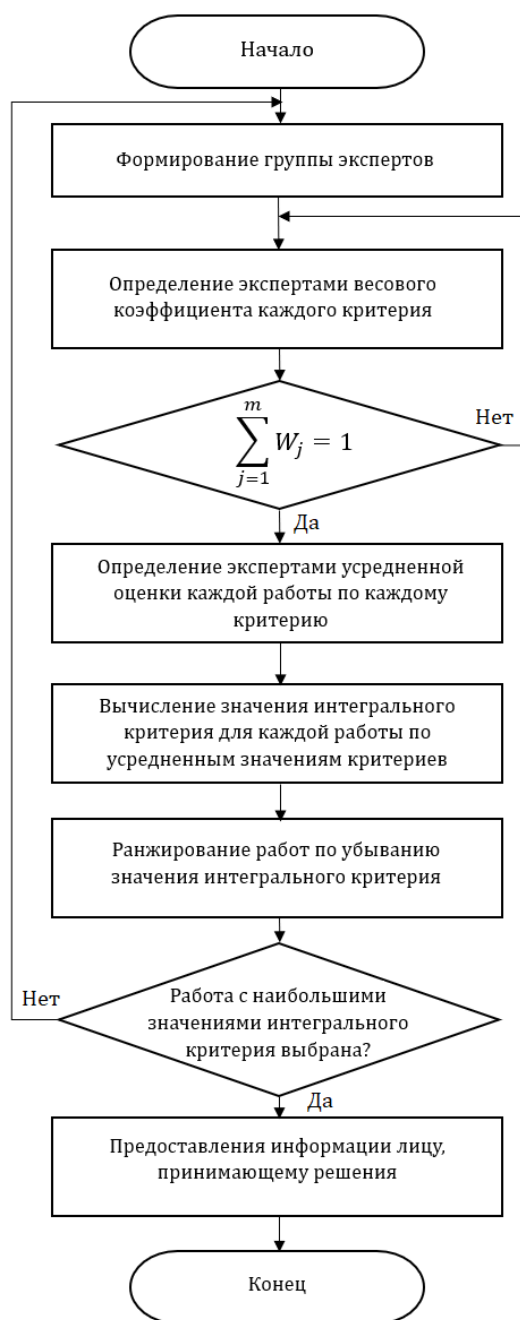
Функциональные показатели характеризуются временем обнаружения пожара, помехоустойчивостью и надежностью системы.

Качественные показатели характеризуются критериями удобства эксплуатации и адаптивности системы.

Стоимостные показатели характеризуются стоимостью модернизации и эксплуатационных расходов.

Каждому из критериев присваивается оценка по индивидуальной шкале, где максимальный параметр соответствует высокой степени улучшения, а минимальный – отсутствию изменений.

Интегральная оценка каждого варианта определяется посредством взвешенной суммы частных критериев. Для обеспечения корректно-



Алгоритм принятия оптимального решения на основе многокритериальной оптимизации

сти агрегирования сумма весовых коэффициентов W_j должна быть равна единице:

$$\sum_{j=1}^m W_j = 1. \quad (5)$$

После расчета интегрального критерия для каждого из вариантов осуществляется их ранжирование в порядке убывания значений критерия. Окончательное решение о приоритетности проведения работ принимается руководством технической службы крупного промышленного объекта.

Данный метод предполагает создание алгоритма принятия оптимального решения (рисунк).

Таким образом, в результате проведенного исследования был разработан алгоритм многокритериальной оптимизации, который позволяет определить оптимальные направления модернизации АСПЗ крупных промышленных объектов. Данный метод позволяет не только оптимально распределить ресурсы, но и повысить эффективность процесса модернизации АСПЗ, что особенно важно в условиях ограниченного бюджета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валиев, Р. Р. Методика многокритериальной оценки эффективности принятия решений при тушении пожаров на объектах нефтегазовой промышленности / Р. Р. Валиев, И. Ф. Хафизов, Ф. Ш. Хафизов, А. А. Шарафутдинов // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 4. – С. 63–69.
2. Буцынская, Т. А. Применение метода векторной оптимизации при совершенствовании систем пожарной сигнализации / Т. А. Буцынская, С. Ю. Журавлев // Пожарная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 93–97
3. Тертерян, А. С. Методы оптимизации многокритериальных задач с использованием локальной качественной важности критериев / А. С. Тертерян // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах : матер. XVII Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2021. – ИЦ «Наука», 2021. – С. 415–423.

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-65-67

*М. С. Трубицына, Д. С. Давыдов, И. М. Шандыбина, М. П. Кухтик***ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ
КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПЭТ-БУТЫЛОК****Волгоградский государственный технический университет**E-mail: trubits2003@mail.ru, evpifg538@gmail.com, ishandybina@yandex.ru,
mpkuhtik@gmail.com

Создана 3D-модель автоматической линии поточного контроля герметичности ПЭТ-бутылок. Разработана имитационная модель и алгоритм работы линии, реализованный в виде программы. В результате проведенного исследования работы линии установлен характер влияния производительности линии на долю отбракованных бутылок.

Ключевые слова: автоматическая линия, контроль герметичности, алгоритм работы, имитационная модель, ПЭТ-бутылка, производительность

*M. S. Trubitsyna, D. S. Davydov, I. M. Shandybina, M. P. Kukhtik***STUDY OF THE OPERATION OF AN AUTOMATIC LINE FOR
CONTROL OF HERMETICITY OF PET BOTTLES****Volgograd State Technical University**

A 3D model of an automatic flow control line for the tightness of PET bottles has been created. A simulation model and an algorithm for the line's operation have been developed, implemented as a program. As a result of the conducted study of the line operation, the nature of the influence of the line productivity on the proportion of rejected bottles has been established.

Keywords: automatic line, leak test, operating algorithm, simulation model, PET bottle, productivity

Анализ существующих систем автоматического контроля герметичности бутылок показывает наличие ряда серьезных недостатков, которые необходимо учитывать при разработке новых устройств [1–3]. Устранение проблем с настройкой, повышение производительности, снижение вероятности ложных срабатываний и внедрение модульной структуры могут значительно повысить эффективность и конкурентоспособность нового решения на рынке.

Компанией «Таурас-Феникс» было выдано техническое задание на разработку системы автоматического поточного контроля герметичности ПЭТ-бутылок. В среде КОМПАС-3D создана 3D-модель автоматической линии (рис. 1), предназначенной для высокоскоростного контроля качества бутылок на конвейере. Каждый узел этой линии должен работать быстро, надежно и с минимальным вмешательством человека.

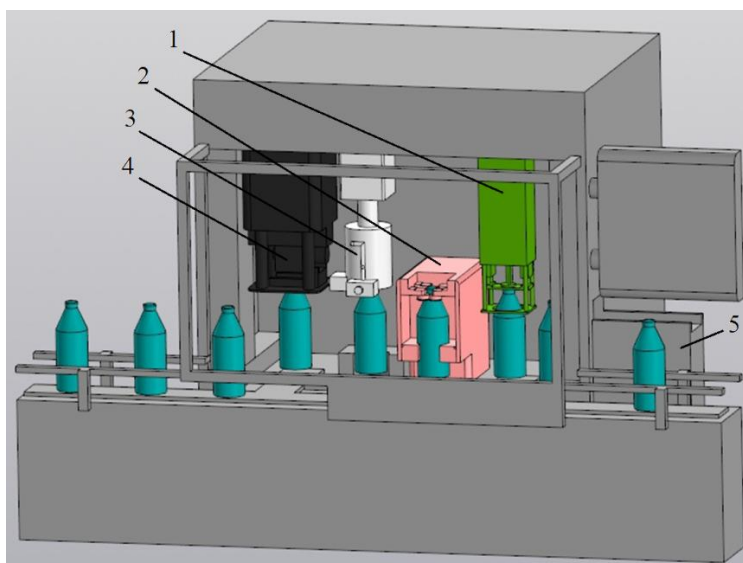


Рис. 1. Общий вид автоматической линии:

1 – узел контроля герметичности уплотнения; 2 – узел контроля внутреннего давления;
3 – узел контроля крутящего момента; 4 – узел контроля угла примыкания; 5 – отсек для брака

Рассмотрим алгоритм работы автоматической линии. Бутылка устанавливается на конвейерную ленту и последовательно проходит через узлы контроля герметичности уплотнения, контроля внутреннего давления, контроля крутящего момента и контроля угла примыкания. Если бутылка проходит проверку всех узлов, то она считается годной и отправляется

в отсек для годной продукции. Если бутылка не проходит любую из проверок качества, она отправляется в отсек для брака.

В среде AnyLogic разработана имитационная модель, иллюстрирующая полный цикл контроля качества, который проходит бутылка. На рис. 2 представлена блок-схема этой модели.

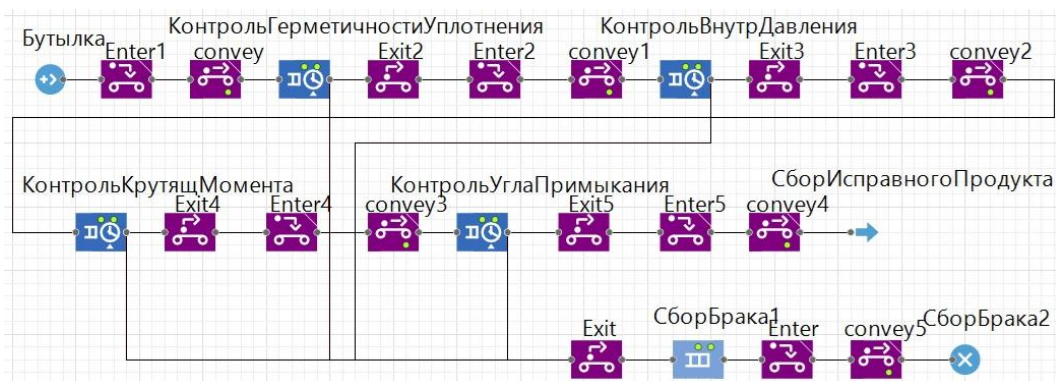


Рис. 2. Блок-схема имитационной модели

Разработанный алгоритм реализован в виде программы, написанной на языке Python. Прохождение бутылки через каждый узел контроля является здесь случайным событием. Данную

программу легко адаптировать к различным параметрам линии контроля. На рис. 3 приведен ее фрагмент.

```

38 def process_bottle(self, bottle):
39     """Обрабатывает бутылку, проверяя крышку и герметичность."""
40     if not self.check_cap(bottle):
41         self.rejected_bottles.append(bottle)
42         print(f"Бутылка {bottle.id} отбракована: крышка не закручена.")
43         return False
44     elif not self.check_seal(bottle):
45         self.rejected_bottles.append(bottle)
46         print(f"Бутылка {bottle.id} отбракована: нет герметичности.")
47         return False
48     print(f"Бутылка {bottle.id} прошла проверку.")
49     return True

```

Рис. 3. Фрагмент программы

В результате симуляции работы этой программы на экран выводится общее количество обработанных бутылок, количество отбракованных бутылок и их идентификаторы. С помощью созданной программы и онлайн-компилятора online-python.com было исследовано влияние производительности линии на долю отбракованных бутылок. Симуляция программы запускалась на 1 минуту. Верхняя

и нижняя границы анализируемого диапазона производительности равны 450 и 200 бут./ч. Эти значения соответствуют 8 с. и 10,3 с., отводимым на прохождение одной бутылки через все узлы контроля линии. Для каждого значения производительности симуляция запускалась трижды. Доля отбракованных бутылок определялась как среднее значение трех результатов симуляций (таблица).

Результаты анализа работы программы

Производительность линии, бут./ч	Число отбракованных бутылок / всего бутылок			Доля отбракованных бутылок, %
	1-я симуляция	2-я симуляция	3-я симуляция	
450	7 / 8	8 / 8	7 / 8	92
430	6 / 8	7 / 8	7 / 8	83
410	6 / 7	6 / 7	5 / 7	81
390	6 / 7	5 / 7	5 / 7	76
370	5 / 7	5 / 7	5 / 7	71
350	4 / 6	5 / 6	3 / 6	67

В результате проведенного исследования работы автоматической линии контроля установлено, что с повышением производительности доля отбракованных бутылок увеличивается. Максимальное значение производительности, с которой можно эксплуатировать линию, может быть определено с помощью разработанной программы, если известно значение доли брака, допустимое на конкретном производстве.

Предложенный алгоритм является основой для внедрения линии на производстве, он позволит обеспечить высокую производительность линии и точность отбраковки. С помощью разработанной программы и имитацион-

ной модели можно визуализировать, тестировать и анализировать работу автоматической линии поточного контроля герметичности ПЭТ-бутылок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жежера, Н. И. Автоматизация испытаний изделий на герметичность : учеб. пособие / Н. И. Жежера. – 4-е изд. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 552 с.
2. Мартынов, В. В. Модель роботизированного комплекса по контролю параметров жидких фасованных продуктов / В. В. Мартынов // European Journal of Natural History. – 2023. – № 6. – С. 32–36. – EDN PUEDFV.
3. Процесс контроля герметичности укупоривания бутылок [Электронный ресурс]: сайт. – URL: https://i-cap.ru/useful_8 (дата обращения: 21.05.2025)

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-67-70

М. С. Трубицына, Р. А. Сангаджиев, А. В. Шапин, И. М. Шандыбина

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
УЗЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ КОНТРОЛЯ
ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПЭТ-БУТЫЛОК

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: trubits2003@mail.ru, Artemoriginbq@gmail.com,
rodionsangadziev@gmail.com, ishandybina@yandex.ru

Созданы 3D-модели узлов автоматической линии поточного контроля герметичности ПЭТ-бутылок. Описан принцип работы каждого узла. В результате проведенных исследований получены оптимальные значения ключевых технологических параметров узлов линии для обеспечения их надежной работы при высоких нагрузках.

Ключевые слова: автоматическая линия, контроль герметичности, 3D-модель, ПЭТ-бутылка, оптимизация конструктивных параметров

M. S. Trubitsyna, R. A. Sangadzhiev, A. V. Shapin, I. M. Shandybina

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF UNITS
OF AUTOMATIC LINE FOR CONTROL OF HERMETICITY OF PET BOTTLES

Volgograd State Technical University

3D models of units of the automatic flow control line for the tightness of PET bottles have been created. The operating principle of each unit has been described. As a result of the conducted research, optimal values of key technological parameters of line units have been obtained to ensure their reliable operation under high loads.

Keywords: automatic line, leak test, 3D model, PET bottle, optimization of technological parameters

Автоматический поточный контроль герметичности ПЭТ-бутылок является необходимым элементом современных производственных процессов, который обеспечивает качество, безопасность и эффективность упаковки. Внедрение таких систем не только улучшает производственные показатели, но и способствует удовлетворению потребностей клиентов и соблюдению отраслевых стандартов.

Компанией «Таурас-Феникс» было выдано техническое задание на разработку системы автоматического поточного контроля герметичности ПЭТ-бутылок. В результате проведения анализа существующих решений в области контроля герметичности упаковки было выделено три наиболее подходящих решения [1–3], которые легли в основу концепции системы.

В среде КОМПАС-3D созданы 3D-модели узлов автоматической линии поточного контроля герметичности ПЭТ-бутылок. Рассмотрим конструкцию и назначение каждого узла линии.

Узел контроля герметичности уплотнения (рис. 1, а) предназначен для того, чтобы проверить, что бутылка полностью герметична и не пропускает газ или жидкость. Это необходимо для предотвращения порчи продукта, протечек и выхода углекислого газа из газированных напитков. Контроль герметичности производится путем создания небольшого вакуума или нагнетания давления в области вокруг горлышка бутылки. Любое падение давления или потока воздуха указывает на утечку.

Узел контроля внутреннего давления (рис. 1, б) предназначен для проверки соответствия давления в бутылке установленным стандартам. Это особенно важно для газированных напитков, где соблюдение давления влияет на вкус и срок хранения продукта. Контроль осуществляется за счет прямого измерения давления с помощью датчиков. Датчик либо находится в непосредственном контакте с бутылкой, либо измеряет давление через механический интерфейс.

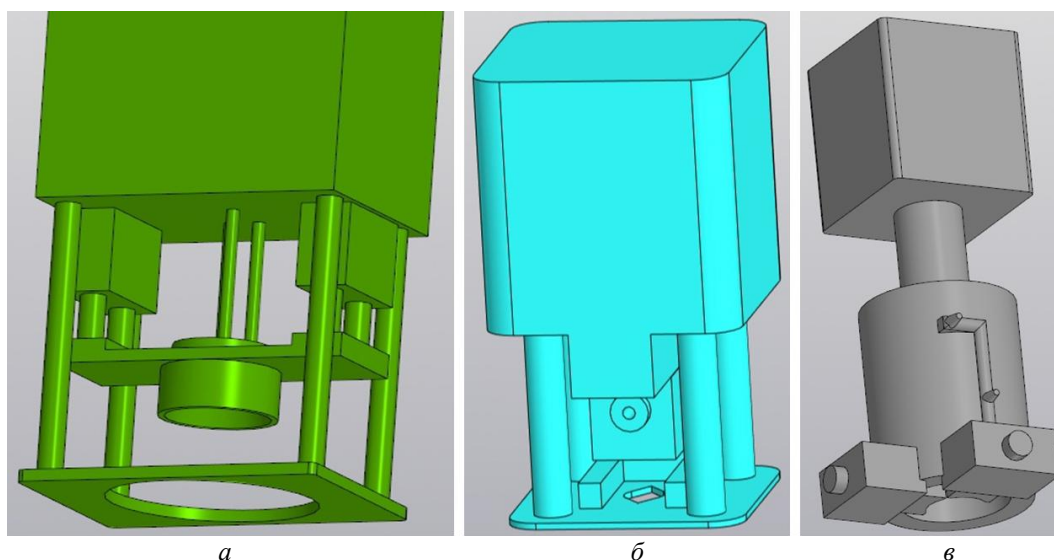


Рис. 1. Узлы автоматической линии:
а – узел контроля герметичности уплотнения; б – узел контроля внутреннего давления;
в – узел контроля крутящего момента

Узел контроля крутящего момента (рис. 1, в) предназначен для того, чтобы проверить, с каким усилием была закручена крышка. Недостаточно закрученные крышки могут протекать. Слишком сильно закрученные крышки могут повредиться или повредить бутылку и затруднить ее открывание. В данном узле используется устройство, измеряющее крутящий момент, прилагаемый к крышке. Бутылка проходит через приспособление или механизм захвата, ко-

торый создает противодействующий крутящий момент. С помощью тензодатчика в сочетании с энкодером могут быть измерены точный угол поворота и приложенное усилие.

Узел контроля угла примыкания (рис. 2, а) предназначен для проверки правильности положения крышки относительно горлышка бутылки. Неправильный угол примыкания может привести к нарушению герметичности или снижению эстетического качества упаковки.

Отсек для брака (рис. 2, б) предназначен для бутылок, не прошедших проверку в любом из узлов контроля. Это важно для выявления дефектов, предотвращения попадания к потребителю бракованных бутылок и повышения

эффективности системы сортировки. Обычно для перемещения бракованных бутылок на другой конвейер или в контейнер для сбора используется пневматический или механический привод.

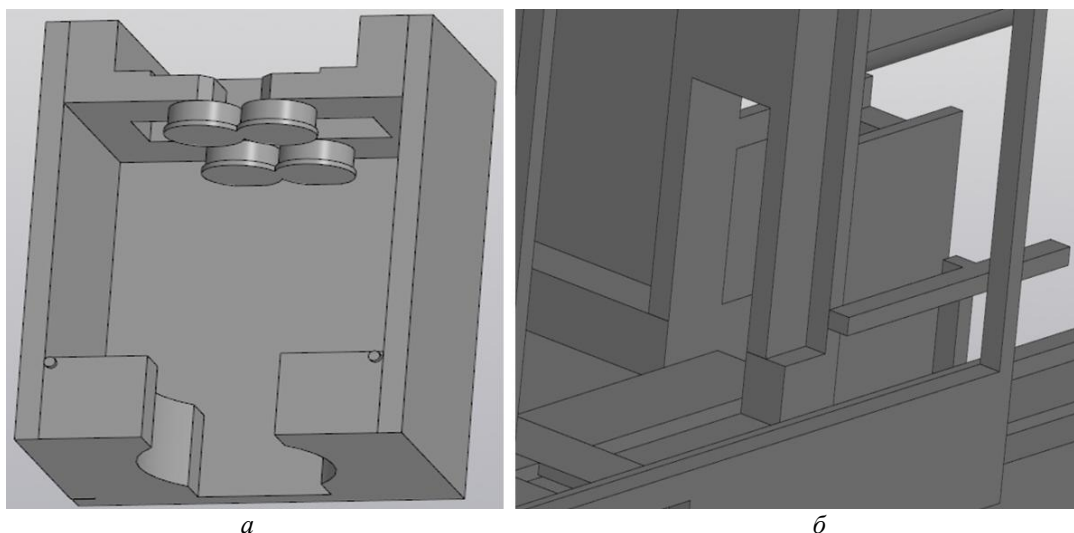


Рис. 2. Узлы автоматической линии:
а – узел контроля угла примыкания; б – отсек для брака

Каждый узел автоматической линии играет важную роль в процессе поточного контроля герметичности ПЭТ-бутылок, выполняя строго определенную задачу. Эти элементы работают в единой системе, обеспечивая комплексный подход к контролю, что позволяет гарантировать высокие стандарты качества упаковки.

При проектировании линии следует уделить особое внимание оптимизации ключевых технологических параметров ее узлов. Найдем оптимальные значения технологических параметров пневматической камеры, конвейера и датчика контроля крышек на основе общеизвестных законов физики. Исходные данные для расчетов будем выбирать в соответствии с заданием на разработку.

Для проверки герметичности бутылок в пневматической камере используется избыточное давление. Необходимый объем сжатого воздуха для проведения проверки рассчитывается, исходя из следующего условия:

$$P_c \cdot V_b = P_n \cdot (V_6 + V_k), \quad (1)$$

где P_c – давление в системе подачи воздуха, $P_c = 0,8$ МПа; V_b – объем сжатого воздуха; P_n – проверочное избыточное давление, $P_n = 0,2$ МПа; V_6 – объем бутылки, $V_6 = 1$ л = $0,001$ м³; V_k – объем пневматической камеры, $V_k = 0,005$ м³.

Отсюда объем сжатого воздуха составит

$$V_b = P_n \cdot (V_6 + V_k) / P_c = 0,2 \cdot (0,001 + 0,005) / 0,8 = 0,0015 \text{ м}^3. \quad (2)$$

Усилие F_o , необходимое для отвода бракованных бутылок с конвейера, равно:

$$F_o = m_6 \cdot a_o, \quad (3)$$

где m_6 – масса бутылки, $m_6 = 0,05$ кг; a_o – ускорение отвода, $a_o = 2$ м/с².

$$F_o = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ Н}. \quad (4)$$

Для плавной и эффективной работы системы отбраковки механизм отвода должен обеспечивать усилие не менее 0,1 Н.

Момент инерции транспортной ленты I_n определяется следующим образом:

$$I_n = 0,5 \cdot m_n \cdot R_n^2, \quad (5)$$

где m_n – масса ленты, $m_n = 10$ кг; R_n – радиус привода, $R_n = 0,1$ м.

$$I_n = 0,5 \cdot 10 \cdot 0,1^2 = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (6)$$

Этот параметр гарантирует стабильность движения ленты и отсутствие перегрузок на приводе.

Производительность работы датчика контроля крышек бутылок P_d равна:

$$P_d = 1 / (t_c + t_o), \quad (7)$$

где t_c – время съема изображения, $t_c = 0,02$ с;
 t_o – время обработки изображения, $t_o = 0,03$ с.

$$P_d = 1 / (0,02 + 0,03) = 20 \text{ бут./с} = 72000 \text{ бут./ч.} \quad (8)$$

Максимальная производительность датчика составляет 72 тыс. бутылок в час, что в несколько раз превышает требования к производительности самых высокоскоростных анализаторов герметичности.

Это обеспечивает запас мощности для стабильной работы системы.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены оптимальные значения ключевых технологических параметров узлов линии для обеспечения их надежной работы при высоких нагрузках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2298774 Российская Федерация, МПК G01M 3/00. Способ контроля герметичности емкостей / В. И. Никулин, В. Я. Семенов ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – № 2005131324/28 ; заявл. 10.10.2005 ; опубл. 10.05.2007, Бюл. № 13.
2. Пат. 2451271 Российская Федерация, МПК G01 M3/00. Способ и устройство для проверки герметичности емкостей / А. Монцель ; заявитель и патентообладатель КХС ГМБХ. – № 2010147372/28 ; заявл. 03.04.2009 ; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
3. Пат. 2728322 Российская Федерация, МПК G01 M3/02. Способ контроля герметичности изделий и устройство для его осуществления / М. А. Могильников, А. С. Чув, А. В. Ким, М. Ю. Куляхтин, И. А. Спиридонов, О. Б. Могильникова ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-исследовательский технологический институт им. П. И. Снегирева». – № 2019139577 ; заявл. 05.12.2019 ; опубл. 29.07.2020, Бюл. № 22.

УДК 681.523.5: 621.791.75

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-70-73

Я. Ю. Якоби, С. В. Шостенко

ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ МНОГОКООРДИНАТНАЯ СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТА ПРИ СВАРКЕ СИЛЬФОННЫХ КОРОБОК

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: appaa1972@gmail.com, sergejshostenko@yandex.ru

В статье описывается разработанная пневматическая многокоординатная следящая система для автоматизированного управления положением инструмента при сварке сильфонных коробок из нержавеющей стали (12×18Н10Т). Система решает задачу точного позиционирования сварочной горелки для работы с тонкостенными конструкциями (ширина шва 0,4–1,2 мм) методом дуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов (аргон/гелий).

Ключевые слова: пневматическая следящая система, сварка сильфонов, тонкостенные конструкции

Ya. Yu. Yakobi, S. V. Shostenko

PNEUMATIC MULTI-COORDINATE SERVO SYSTEM FOR AUTOMATED CONTROL OF TOOL POSITIONING DURING WELDING OF BELLOWS BOXES

Volgograd State Technical University

The article describes a developed pneumatic multi-coordinate servo system for automated control of tool positioning during welding of bellows boxes made of stainless steel (12×18Н10Т). The system solves the problem of precise positioning of the welding torch for working with thin-walled structures (weld width 0.4–1.2 mm) using non-consumable electrode arc welding in a protective gas environment (argon/helium).

Keywords: pneumatic servo system, bellows welding, thin-walled structures

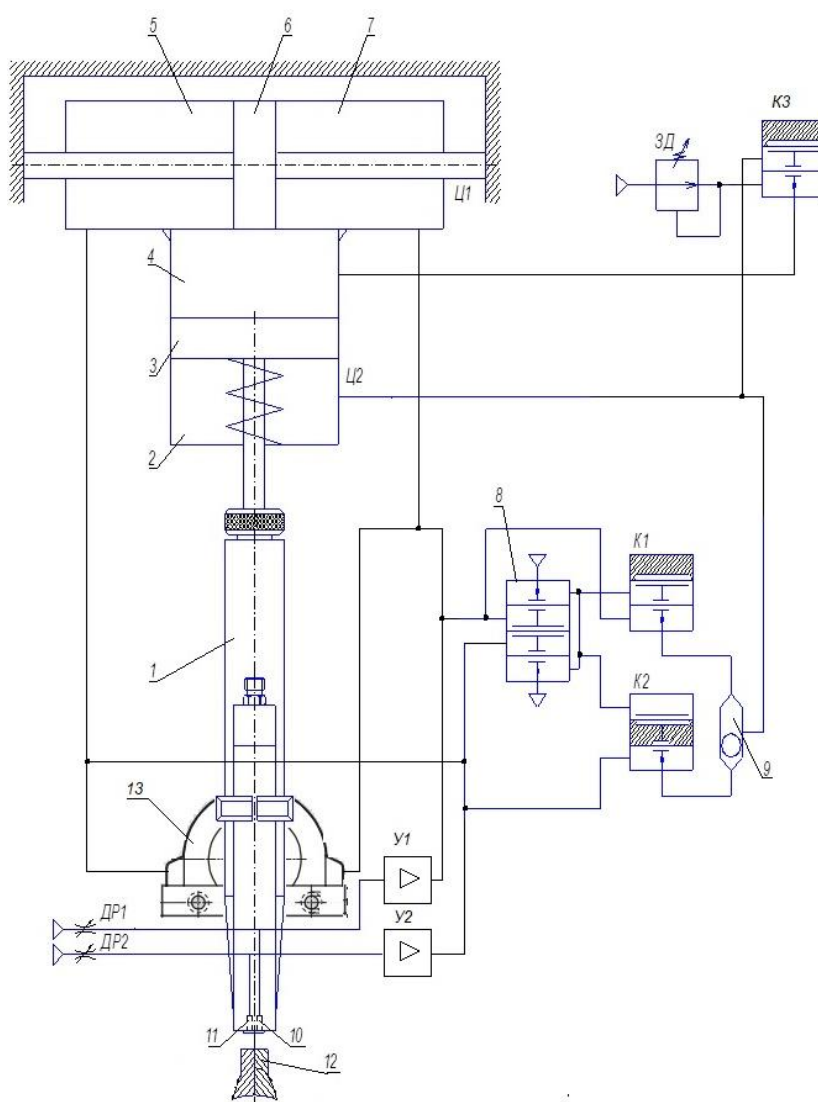
При изготовлении сварных сильфонных конструкций стоит вопрос автоматизации процесса управления положением сварочной горелки по стыку. Сильфонная коробка серии ССП представляет собой сварную конструкцию

из нержавеющей стали 12×18Н10Т и выпускается в широком диапазоне диаметров от 35 до 177,6 мм. Коробка сильфонов и ее присоединение к крепежным фланцам выполняется методом дуговой сварки неплавящимся электродом

в защитной газовой среде [1]. При этом толщина свариваемых по наружному и внутреннему стыкам колец не превышает 0,6 мм, а общая ширина свариваемого шва колеблется в диапазоне от 0,4 до 1,2 мм. В этих условиях сварка сопряжена с необходимостью точного наведения иглы сварочной головки на шов с поддержанием необходимого зазора, горизонтального, вертикального и углового позиционирования инструмента. В настоящее время этот процесс в промышленности не автоматизирован, полностью управляется и контролируется оператором-сварщиком, что сопряжено с необходимостью

стью периодической корректировки положения сварочной горелки в трех направлениях: по вертикали, по горизонтали и углу наклона.

Для автоматизации процесса сварки коробов пластинчатых сильфонов серии ССП по наружному диаметру предложено использовать бесконтактную трехкоординатную пневматическую следящую систему (рисунок). Новизна разработки заключается в применении бесконтактного метода контроля положения инструмента при сварке тонкостенных конструкций с использованием пневматических щелевых первичных преобразователей [2].



Пневматическая многокоординатная следящая система
автоматизированного управления положением инструмента

Следящая пневматическая система состоит из сварочной горелки 1, которая закреплена на валу поворотного механизма углового перемещения 13, установленного на поршне 3 пнев-

моцилиндра Ц2 привода вертикального и горизонтального перемещения. К горелке, в свою очередь, прикреплен дифференциальный пневматический датчик, в котором размещаются

целевые сопла 10 и 11, образующие соответственно с дросселями ДР1, ДР2 струйные датчики положения, междроссельное пространство которых через усилители сигнала У1, У2 подключено к входам элемента сравнения 8 и к соответствующим камерам 5 и 7 пневмоцилиндра Ц1 с поршнем 6, который обеспечивает продольное перемещение сварочной головки. К корпусу пневмоцилиндра Ц1 жестко крепится пневмоцилиндр Ц2 вертикального перемещения, содержащий камеры 2 и 4.

Камера 2 подключена к выходу элемента ИЛИ 9, входы которого соединены с выходами замыкающего К1 и размыкающего К2 пневмоклапанов. Управляющие входы пневмоклапанов К1 и К2 соединены с выходом элемента сравнения 8, а питающие входы подключены, соответственно, к камерам 5 и 7. К камере 4 через замыкающий клапан К3 подключен датчик давления ЗД, обеспечивающий постоянство зазора между концом сварочной горелки 1 и свариваемой кромкой изделия 12 по вертикали.

Перед работой система настраивается на заданную величину зазора в вертикальном направлении. Для этого с помощью датчика ЗД регулируется давление в камере 4 пневмоцилиндра вертикального перемещения Ц2, обеспечивающее положение сварочной горелки 1 относительно кромки изделия 12 с заданным зазором.

Система работает следующим образом. Перед сваркой каждого нового стыка оператор сварочной установки с пульта выводит горелку на требуемое начальное положение в центре стыка. При этом, при сварке наклонных швов, дополнительно обеспечивается начальное угловое положение сварочной горелки. Далее установка запускается на сварку стыка. В случае, когда сварочная головка 1 расположена точно по центру свариваемой кромки изделия 12, устанавливается равенство давлений на выходах струйных датчиков положения с соплами 10 и 11, что обеспечивает равные давления в камерах 5 и 7 пневмоцилиндра Ц1. При этом корпус пневмоцилиндра Ц1 не будет перемещаться в горизонтальном направлении и, соответственно, сварочная горелка 1 будет оставаться в равновесии относительно центра свариваемой кромки трубы 12. Одновременно сигнал давлений на выходах струйных датчиков положения с соплами 10 и 11 подается на входы привода углового положения инструмента 13. При равенстве давлений на выходе струйного диффе-

ренциального пневмодатчика привод углового перемещения 13 не будет перемещать сварочную головку 1.

Также сигнал давлений на выходах датчиков с соплами 10 и 11 подается на входы элемента сравнения 8 обеспечивая наличие сигнала на его выходе, что вызывает открытие клапана К1, а значит свободную подачу воздуха через элемент ИЛИ 9 в камеру 2 пневмоцилиндра Ц2. Рост давления на выходе элемента 9 вызывает срабатывание клапана К3 и подключение датчика ЗД к камере 4 пневмопривода Ц2. Так как в камере 4 с помощью датчика давления ЗД заранее установлен определенный уровень давления, то повышение давления в камере 2 будет происходить до тех пор, пока не установится требуемое положение сварочной горелки 1 по отношению к кромке изделия 12, соответствующее заданной величине зазора при сварке.

При перемещении сварочного аппарата вдоль шва изделия 12 положение свариваемой кромки относительно центра сварочной горелки 1 в горизонтальном и угловом направлении может измениться. Например, при смещении кромки влево, или соответствующем наклоне плоскости стыка изделия 12 уменьшается перекрытие сопла 10, что вызывает падение давления на соответствующем входе струйного датчика положения и в камере 5 пневмоцилиндра Ц1. Разность давлений в камерах 5 и 7 обеспечивает смещение корпуса пневмоцилиндра Ц1 влево, то есть в сторону камеры с меньшим давлением. Аналогичное действие производит при угловом смещении инструмента, когда срабатывает привод углового перемещения 13. Соответственно происходит перемещение сварочной головки 1 влево, либо на заданный угол до установления равенства давлений на выходах струйных датчиков положения и в камерах 5, 7. При этом сварочная головка 1 располагается точно по центру свариваемой кромки изделия 12. Совместная работа приводов горизонтального перемещения Ц1 и углового перемещения 13 быстрее приводит систему в равновесное состояние. При смещении в процессе сварки кромки изделия 12 вправо или соответствующем угловом отклонении кромки свариваемого стыка, приводы Ц1 и 13 отработывают аналогично, до полного равновесия давлений на выходах струйных датчиков положения с соплами 10 и 11, что обеспечивает требуемое горизонтальное и угловое положение сварочной головки.

При изменении зазора между сварочной головкой 1 и кромкой изделия 12 по вертикали, независимо от горизонтального или углового положения кромки относительно центра сварочной головки 1, происходит регулирование положения инструмента по высоте. При изменении сопротивления в одном из сопел 10, 11, вызывающем повышение давления, например, в струйном датчике положения 11, происходит переключение элемента сравнения 8, и на его выходе сигнал исчезает. Это приводит к открытию клапана К2 и давление от струйного датчика положения с соплом 11 подается через клапан К2 и элемент ИЛИ 9 в камеру 2 пневмоцилиндра Ц2. Повышение давления в камере 2 вызывает перемещение поршня 3 со сварочной горелкой 1 вверх. Происходит отвод инструмента от изделия 12, при этом давление начинает снижаться до установленного равновесия сил, действующих на поршень 3. Система стабилизируется. Независимо от положения кромки изделия 12 относительно целевых сопел 10, 11 слежение по вертикали обеспечивает включение клапанов К1, К2. Если, например, давление на выходе датчика положения с соплом 11 будет больше, то происходит переключение элемента сравнения 9, и на его выходе появляется сигнала, что вызывает открытие клапана К1 и давление поступит через элемент ИЛИ 9 в камеру 2, то есть пневмоцилиндр Ц2 всегда получает сигнал от того струйного датчика положения, в котором давление больше. Таким образом, слежение за положением свариваемой кромки детали 12 происходит всегда одновременно по двум линейным и одной угловой координате.

В конце сварки каждого стыка происходит наведение дифференциального датчика на зону уже выполненного стыка с шаровой по сечению формой. При этом в обоих ветвях пневматического первичного преобразователя происходит резкое уменьшение давления, что вызывает отключение клапана К3, снижение давление к камере 4 привода Ц2 и возврат привода Ц2 в верхнее положение за счет встроенной пружины. При отведении сварочной головки от стыка происходит обрыв дуги и автоматическое

отключение источника сварочного тока. Далее цикл сварки повторяется.

Представленная на рисунке трехкоординатная следящая САУ положением сварочного инструмента допускает реализацию на типовых промышленных пневматических логических элементах и промышленных приводах линейных перемещений (например, моделей SLE-...-KF-A-G, DSNU-...-S2-P-A, DAR-10-90-Рот концерна FESTO[3]). Параметры целевого дифференциального датчика перемещений выбираются в зависимости от толщины и диаметра свариваемых колец пластинчатых сильфонов.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение технологии питания пневмодатчика инертным газом позволяет обеспечить крепление первичного преобразователя на корпусе сварочной головки в непосредственной близости (не более 10 мм) от сварочной дуги без нарушения газовой защиты зоны сварки стыка.

2. Предложенная многокоординатная система управления положением сварочного инструмента позволит осуществлять управление сразу по трем координатам от одного первичного дифференциального преобразователя без механического контакта со свариваемым изделием.

3. Реализация системы управления исключительно на промышленных пневматических устройствах обеспечит ее низкую стоимость производства и эксплуатации, высвобождение оператора-сварщика от вредных условий работы, увеличение качества выпускаемой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева ; под ред. В. И. Федосьева. – М. : Машгиз, 1962. – 455 с.
2. Шостенко, С. В. Исследование и разработка пневматических следящих систем управления положением инструмента при сварке тонкостенных изделий / С. В. Шостенко ; ВолгГТУ. – Волгоград, 1997. – 10 с.
3. FESTO. Пневматика для автоматизации [Электронный ресурс] : электронный каталог. – Берлин, 2021. – Режим доступа: <https://ru-festo.com>, свободный. (Дата обращения: 15.05.2025 г.).

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 2025 г. Поз. № 3ж. Дата выхода в свет 00.08.2025 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 № 0000.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, 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.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word 2003–2010 и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей в электронном виде в полном соответствии с распечатанным оригиналом.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст 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) только по умолчанию; 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.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи, адрес электронной почты, а также аннотация и ключевые слова на русском языке. Затем на английском языке повторяются инициалы и фамилия автора (авторов), заглавие статьи, организация или предприятие, в котором работает автор статьи, аннотация и ключевые слова. В конце статьи ставится дата и подпись автора (всех авторов).

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.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать семь страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки,

помеченные буквами *а*, *б*, и т. д. Рекомендуется включать в журнал статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором, без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), рецензия доктора наук, компетентного в предметной области предоставляемой статьи. Для сотрудников Волгоградского государственного технического университета и подразделений также необходима документация, подтверждающая возможность открытого опубликования (экспертное заключение о возможности опубликования статьи, акт идентификации статьи). Для сторонних авторов также должно быть приложено сопроводительное письмо на имя ответственного секретаря серии с просьбой о публикации.