

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный технический университет»  
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 1 (9), 2021**

**Online ISSN 2687-0029**

Тверь 2021

**Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»**

**Главный редактор:** Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Заместители главного редактора:**

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., доцент ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Ответственный секретарь:** Афанасьева Л.Е., к. ф.-м. н., доцент ТвГТУ

**Члены редакционной коллегии:**

*По направлению «Машиностроение и машиноведение»*

Гершман И.С., д.т.н., профессор, ВНИИЖТ

Горохов Д.Б., д.т.н., доцент БрГУ

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, ИПМех РАН

Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Матлин М.М., д.т.н., профессор, ВолгГТУ

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

Шоркин В.С., д.ф.-м.н., профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

Шустер Л.Ш., д.т.н., профессор УГАТУ

*По направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»*

Березовский Н.И., д.т.н., профессор БНТУ, Республика Беларусь

Головин К.А., д.т.н., профессор ТулГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Кантович Л.И., д.т.н., профессор НИТУ «МИСиС»

Керопян А.М., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

*По направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»*

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: [vestnik\\_tstu\\_tekh@mail.ru](mailto:vestnik_tstu_tekh@mail.ru)

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по направлениям: 05.02.00 Машиностроение и машиноведение, 05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение, 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление. Журнал выходит 4 раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: Эл № ФС 77 – 74961 от 25.01.2019 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Перепечатка материалов из журнала возможна при письменном согласии с редакцией, при этом ссылка на журнал обязательна.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Хопин П.Н., Гриб В.В.</i> Микроанализ поверхностей трения твердосмазочных покрытий различных видов нанесения.....	5
<i>Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р.</i> Триботехнические свойства композиционных покрытий для концевых фрез.....	18
<i>Мигранов М.Ш., Мигранов А.М.</i> Износостойкие покрытия для режущего инструмента после ионного смешивания.....	28

### ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Дьяченко В.П.</i> Корреляционная функция и спектральная плотность случайных колебаний количества груза на конвейере.....	40
<i>Пецык А.А., Секретов М.В.</i> Вероятностное распределение нагрузки и прочности деталей дискового распиловочного станка.....	48
<i>Харитонов Н.Д., Губанов С.Г.</i> Оптимизация гидравлического экскаватора.....	56

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Зубков Г.А.</i> Алгоритм оптимизации гиперпараметров многослойного персептрона для решения задачи прогнозирования технического состояния космического аппарата.....	64
<i>Яконовская Т.Б., Жигульская А.И.</i> Особенности 3D-моделирования торфяных месторождений в геоинформационной среде Micromine .....	71
<i>Марголис Б.И., Макаров К.И.</i> Синтез регулирующих устройств в системах автоматического управления методом линий равного быстродействия.....	86
<i>Обухов А.Д., Дедов Д.Л., Зверев М.В.</i> Обработка данных в мобильной системе имитации изолирующих дыхательных аппаратов на основе нейросетевых технологий .....	92
<i>Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б.</i> Морфологический метод системного анализа в решении прикладных задач производственной безопасности.....	102

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Khopin P.N., Grib V.V.</i> Microanalysis of the friction surfaces of solid lubricating coatings of various types of application.....	5
<i>Migranov M.Sh., Migranov A.M., Shekhtman S.R.</i> Tribotechnical properties of composite coatings for end milling cuts.....	18
<i>Migranov M.Sh., Migranov A.M.</i> Wear-resistant coatings for cutting tools after ionic mixing.....	28

### TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Dyachenko V.P.</i> Correlation function and spectral density of random fluctuations in the amount of cargo on the conveyor.....	40
<i>Petsyk A.A., Secretov M.V.</i> Probable distribution of load and strength of parts for disc sawing machine.....	48
<i>Kharitonov N.D., Gubanov S.G.</i> Optimizing a hydraulic excavator.....	56

### INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Zubkov G.A.</i> Algorithm for optimizing the hyperparameters of a multilayer perceptron for solving the problem of predicting the technical state of a space vehicle.....	64
<i>Yakonovskaya T.B., Zhigul'skaya A.I.</i> Features of 3D-modeling of peat in the geoinformation environment Micromine.....	71
<i>Margolis B.I., Makarov K.I.</i> Synthesis of regulating devices in automatic control systems by the equal speed operation line method.....	86
<i>Obukhov A.D., Dedov D.L., Zverev M.V.</i> Data processing in a mobile system of imitation of isolating respiratory equipment based on neural network technologies.....	92
<i>Puzyrev N.M., Martynov D.V., Barbashinova N.B.</i> Morphological method of system analysis in solving applied problems of industrial safety.....	102

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.892

## МИКРОАНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НАНЕСЕНИЯ

П.Н. ХОПИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук, В.В. ГРИБ<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),  
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: chopin@mail.ru

<sup>2</sup> Российский государственный университет нефти и газа  
(Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина,  
119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 65, к. 1, e-mail: grib-vladimir.g@ya.ru

© Хопин П.Н., Гриб В.В., 2021

В результате проведенных исследований установлено, что оптимальная толщина твердосмазочного покрытия суспензионного нанесения составляет от  $20 \pm 5$  мкм (согласно отечественным литературным данным) до 7,62...12,7 мкм (согласно зарубежным источникам), магнетронного нанесения – 1 мкм. При трении исходная толщина суспензионного покрытия (~20 мкм) уменьшается настолько (до 2...3 мкм), что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную пленку MoS<sub>2</sub>. Это справедливо и для магнетронно нанесенных твердосмазочных покрытий. Оптимальная шероховатость обработки основы перед суспензионным нанесением составляет  $Ra = 0,3...0,6$  мкм, для магнетронного нанесения – 0,2 мкм. С уменьшением шероховатости обработки основы перед магнетронным нанесением с  $Ra = 0,05...0,4$  коэффициент трения сопряжения  $f_{тр}$  снижается с 0,05 до 0,02.

*Ключевые слова:* твердосмазочные покрытия, суспензионное и магнетронное нанесение, толщина покрытий, шероховатость основы.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-5-17**

### ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности для автономно работающих сопряжений широко используются твердосмазочные покрытия (ТСП) различных видов нанесения [1–3]. Несмотря на большое количество исследований ТСП, до настоящего времени нет единой теории трения, объясняющей все многообразие их смазочных свойств. Не рассматривался вопрос о соотношении толщины ТСП на основе MoS<sub>2</sub> со связующими веществами и ТСП магнетронного и других методов нанесения с позиций микрошероховатости взаимодействующих поверхностей. В связи со сказанным авторами были проведены дополнительные исследования в этом направлении.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе было осуществлено сканирование поверхности образца с ТСП ВНИИ НП 212 (наполнитель MoS<sub>2</sub>, связующее мочевино-формальдегидная смола) в исходном и приработанном состоянии при помощи сканирующего рентгеновского

микроскопа Super Probe-733» японской фирмы JEOL во вторичной электронной эмиссии при ускоряющем напряжении  $E = 25$  кВ и токе зонда  $I = 3 \cdot 10^{-8}$  А [4]. Оценка микротопографии поверхностей трения осуществлялась с помощью профилографа-профилометра модели 252 завода «Калибр».

Рентгеновский микроанализ трущихся поверхностей проводился с помощью анализатора LINK серии 860. Исследовались поверхности трения с ТСП ВНИИ НП 212 (материал основы – закаленная сталь ШХ15), имеющие различную степень наработки на машине трения СМТ-1 при нагрузке  $N = 1\,000$  Н и скорости скольжения  $V = 0,5$  м/с.

Схема трения установки Е.В. Roberts [5] для проведения трибовакуумных испытаний по схеме «диск – тройной индентор» представлена на рис. 1.

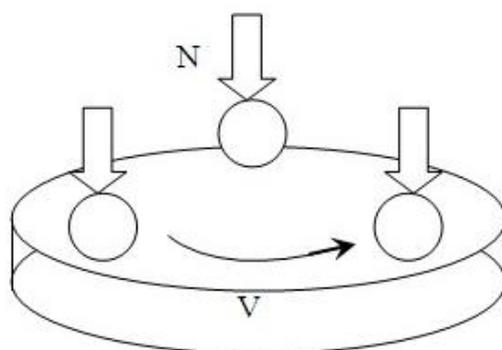


Рис. 1. Схема трения установки для трибоиспытаний в вакууме при  $p = 1,33 \cdot 10^{-5}$  Па [5]

Диск с покрытием  $\text{MoS}_2$  вращался относительно трех сферических инденторов радиусом  $R = 3,67$  мм. Общая контактная нагрузка  $N$  составила 50 Н, соответственно, на каждый индентор  $N = 16,7$  Н. Частота вращения дисков  $n = 400$  об/мин, что эквивалентно скорости скольжения  $V = 1,2$  м/с. Откачные средства на основе ионного и турбомолекулярных насосов обеспечивали вакуум  $6,65 \cdot 10^{-5}$  Па. Индентор и диск были изготовлены из подшипниковой стали (52100), титанового сплава (IMI 318, содержащего 6 % алюминия и 4 % ванадия) и нитрида кремния.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Сканирование поверхности образца с ТСП ВНИИ НП 212 в исходном и приработанном состояниях.** В результате проведения данной операции была получена фотография граничного участка исходной и приработанной поверхностей образца с ТСП, представленная на рис. 2, которая показывает, что в процессе приработки исходная структура поверхности ТСП претерпевает существенные изменения.

Внешний вид приработанной смазочной пленки  $\text{MoS}_2$  представлен на рис. 3, где на однородной поверхности образца с ТСП имеют место локальные отслоения смазочной пленки  $\text{MoS}_2$ . Визуальный микроанализ мест разрушений позволил обнаружить наличие на смазочной поверхности:

- 1) глубоких рисок, оставленных выступами шероховатой поверхности контртела, между которыми и располагаются несущие слои смазочной пленки  $\text{MoS}_2$ ;
- 2) мелких точечных вздутий, идентичных пузырьковым образованиям, отмеченным в работе [6];

3) локальных отслоений смазочной пленки.



Рис. 2. Граничный участок исходной и приработанной поверхностей образца с ТСП, увеличение  $\times 400$



Рис. 3. Внешний вид приработанной поверхности образца с ТСП

Частицы  $\text{MoS}_2$ , хаотически закрепленные после напыления в связующем полимере (рис. 4), после приработки ориентируются своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения (рис. 5).

Очевидно, что поверхностные разрушения связаны с механизмом взаимодействия связки, самой смазочной пленки и микронеровностей поверхностей основы и контртела.

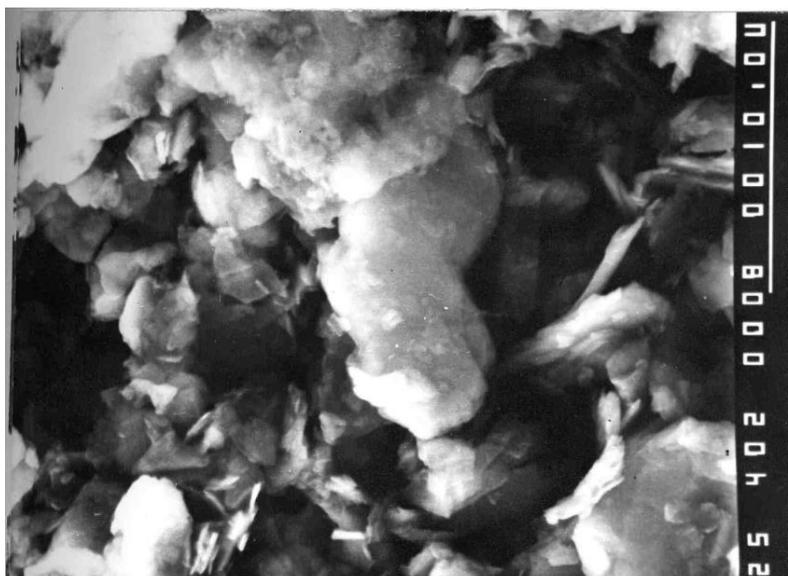


Рис. 4. Структура исходной поверхности образца с ТСП. Увеличение  $\times 4000$

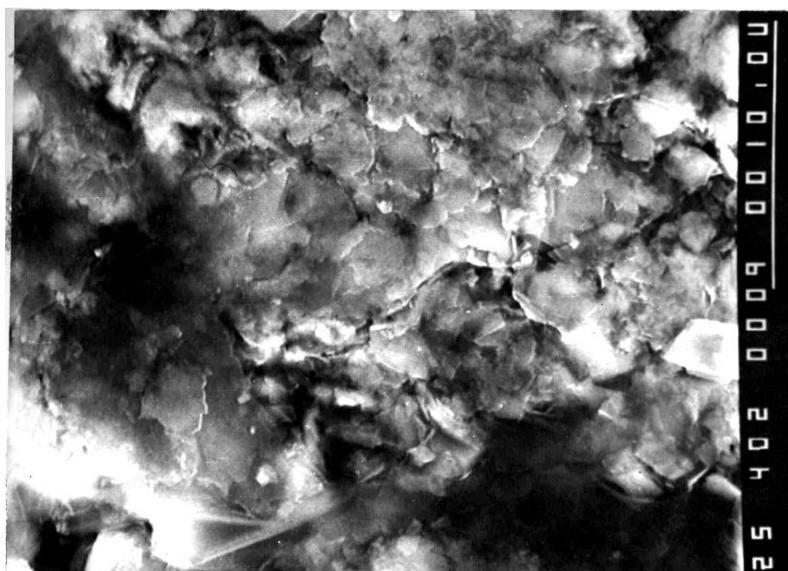


Рис. 5. Структура приработанной поверхности образца с ТСП.  
Увеличение  $\times 4\ 000$

**Оценка микротопографии поверхностей трения.** В связи с вышесказанным на следующем этапе исследовались изменения в процессе трения топографических характеристик контактирующих поверхностей. Полученные профили поверхностей образца с ТСП и контртела в исходном состоянии и после приработки представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Согласно полученным данным, вне зависимости от исходной толщины ТСП основная часть изношенного слоя (75...80 %) приходится на период приработки и лишь 20...25 % – на установившийся режим трения. Таким образом, именно смазочная пленка толщиной в 2...3 мкм обеспечивает в основном функционирование пары трения в течение почти всего срока службы покрытия. Рентгеноструктурный анализ показал, что толщина ТСП в начальный период составляет 2...5 мкм, а в период задира – 0,4...0,6 мкм [7].

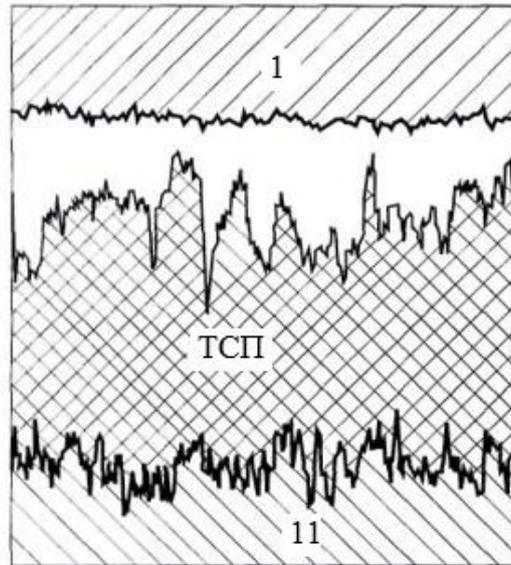


Рис. 6. Совмещенные профилограммы поверхностей (сверху вниз) контртела 1, нанесенного ТСП ВНИИ НП 212 (на образце) и подложки 11 (после пескоструйной обработки) в исходном состоянии пары трения перед испытаниями. Вертикальное увеличение  $\times 5\,000$ , горизонтальное увеличение  $\times 100$ ,  $Ra_{\text{ТСП}} = 1,44$  мкм;  $\delta = 20$  мкм;  $Ra_{\text{основы}} = 0,75$  мкм

Анализ профилограмм, приведенных на рис. 6 и 7, показывает, что в процессе приработки существенно изменяется топографическое состояние контактных поверхностей пары трения с ТСП. Кроме изнашивания исходного слоя покрытия толщиной  $\delta = 20$  мкм до толщины 2...3 мкм, происходит приработка поверхностей образца с ТСП и контртела до близких значений равновесной шероховатости  $Ra$  контртела – 0,18 мкм,  $Ra_{\text{ТСП}} = 0,22$  мкм. С учетом известного соотношения [8]

$$R_{\max} \approx Rz = 6 \cdot Ra \quad (1)$$

сумма значений наибольшей высоты неровностей профиля материала основы и контртела после приработки составила ( $R_{\max \text{ осн}} + R_{\max \text{ контртела}}$ ) для исходного состояния 6,18 мкм, а после приработки – 4,92 мкм. На основании этого можно заключить, что для рассматриваемых условий трения исходная толщина ТСП (~20 мкм) уменьшается до 2...3 мкм, т.е. настолько, что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную пленку  $\text{MoS}_2$ . Причем это взаимодействие наступает именно в тот момент, когда коэффициент трения стабилизируется, т.е. создаются наиболее благоприятные условия смазывания поверхностей. Графическая интерпретация топографической модели трения пары с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  со связующим представлена на рис. 8.

Используя предложенную модель трения, можно предположить, что причиной образования микродефектов, которые наблюдались многими исследователями сразу после образования сплошной смазочной пленки [6], является выход на поверхность отдельных наиболее высоких микровыступов неровностей материала основы.

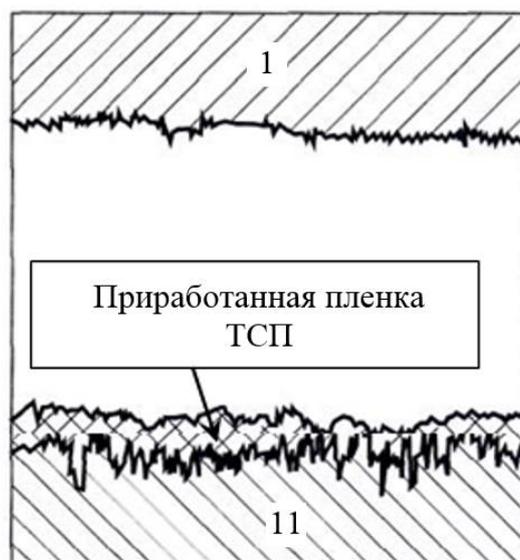


Рис. 7. Совмещенные профилограммы поверхностей (сверху вниз) контртела 1, приработанной пленки ТСП ВНИИ НП 212 (на образце) и подложки (основы) 11 после приработки пары трения. Вертикальное увеличение  $\times 5\,000$ , горизонтальное увеличение  $\times 100$ ,  $Ra_{\text{ТСП}} = 0,22 \text{ мкм}$ ;  $\delta = 2 \dots 3 \text{ мкм}$ ;  $Ra_{\text{основы}} = 0,64 \text{ мкм}$

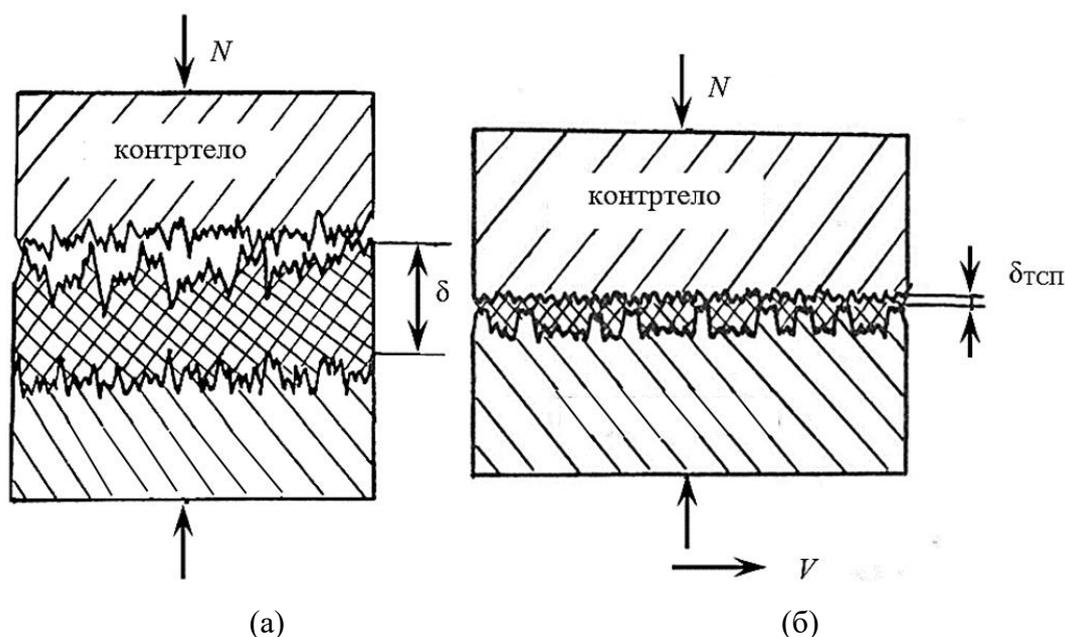


Рис. 8. Топографическая модель трения пары о ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  со связующим веществом: в исходном состоянии (а) и после приработки (б)

**Рентгеновский микроанализ трущихся поверхностей.** Анализ полученных данных, представленных в работе [4], показал следующее:

1) на всех этапах наработки начиная с окончания приработки, кроме основных элементов смазочной пленки  $\text{MoS}_2$ , т.е. Mo и S, на диаграммах наблюдается Fe;

2) по мере наработки на неповрежденных участках, где сохранилась пленка ТСП, мощность пика, соответствующего железу, возрастает, т.е. все большее число неровностей основы или выступает на поверхность, или оказывается в непо-

средственной близости от нее; так, например, при времени наработки  $\tau = 28$  мин  $Fe = 16$  %; при  $\tau = 180$  мин  $Fe = 25$  %, а при  $\tau = 360$  мин  $Fe = 44$  %;

3) пик Fe наблюдается не только на поврежденных местах, но и в структуре смазочной пленки (на неповрежденных участках), хотя и существенно меньший по мощности, причем содержание Fe близко к содержанию основных элементов смазочной пленки  $MoS_2$ ;

4) большая интенсивность пика S по сравнению с Mo связана с тем, что в структуре  $MoS_2$  на один атом молибдена приходится два атома S;

5) появление в незначительных количествах хрома определяется химическим составом металла основы, т.е. подшипниковой стали ШХ15, где Cr имеет наибольший процент из всех легирующих элементов (1,3...1,65 %);

6) снижение содержания Mo и S при переходе от смазочной пленки (неповрежденные места) к местам дефектов объясняется тем, что частицы  $MoS_2$  распределены хаотично и не дают таких интенсивных пиков, как в смазочной структуре.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что наибольшие выступы микронеровностей металлической основы могут выходить на поверхность трения при уменьшении толщины ТСП с 20 мкм до нескольких микрометров. В этот момент на поверхности трения образуется смазочная пленка  $MoS_2$ , о чем свидетельствует резкое снижение  $f_{тр}$ . [9]. В дальнейшем на установившемся режиме именно шероховатость поверхности основы выдерживает всю нагрузку на контакт, а низкое трение обеспечивается смазочной пленкой  $MoS_2$ , удерживаемой на поверхности трения между микронеровностями основы за счет связующих компонентов композиционного ТСП. Следовательно, если контактная нагрузка не превысит предела текучести материала основы (что имеет место в данном случае, при использовании образцов из закаленной стали ШХ15, HRC = 60), то ресурс работы рассматриваемого типа ТСП будет определяться ресурсом связующего. Подтверждением этому служит тот факт, что без связующего как  $MoS_2$ , так и графит имеют малый срок работы на поверхностях трения.

Согласно отечественным литературным данным [10] оптимальная толщина ТСП суспензионного нанесения составляет  $20 \pm 5$  мкм. Шероховатость отпескоструенной металлической основы  $Rz = 1,6...3,2$  мкм, что с учетом соотношения (1) составит  $Ra = 0,3...0,6$  мкм.

Аналогичные толщины ТСП суспензионного нанесения приведены в методике фирмы Molykote. Согласно [11] рекомендована толщина 5...20 мкм при оптимальной шероховатости основы  $Ra = 0,5$  мкм (рис. 9).

Согласно инструкции [12], для применения ТСП со связующими фенольного типа, эпоксидными и силикатами Everlube 620C, Everlube 811, Everlube 812, Ecoalube 642, Tiolube 460 обработка основы выполняется до шероховатости поверхности по параметру среднеквадратического отклонения микронеровностей  $Rq = 32$  мкм, что соответствует  $Ra = 0,8$  мкм при оптимальной исходной толщине ТСП  $\delta = 7,62...12,7$  мкм, и согласуется с рекомендациями отечественной инструкции [10].

К числу широко используемых в настоящее время ТСП относятся покрытия, нанесенные магнетронным, радиочастотным и другими методами вакуумного напыления [2].

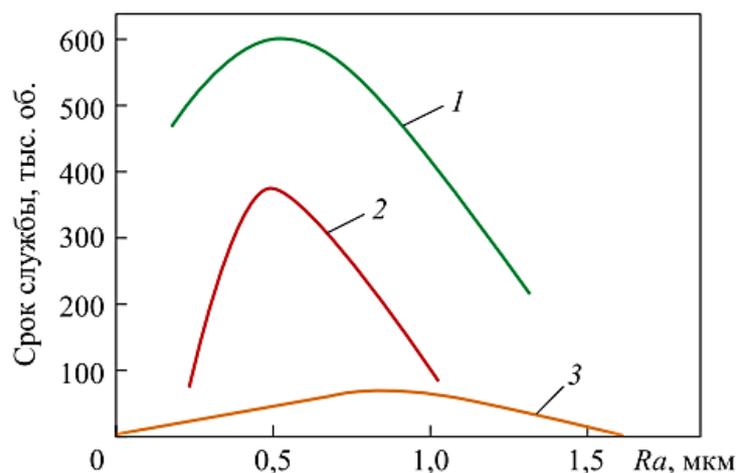


Рис. 9. Срок службы ТСП в зависимости от вида предварительной обработки и степени шероховатости основы [11]: 1 – пескоструйная обработка и фосфатирование; 2 – пескоструйная обработка; 3 – полированная поверхность

**Анализ микротопографии поверхностей трения ТСП MoS<sub>2</sub>, нанесенных магнетронным методом.** Согласно данным работы [2] толщина ТСП на основе MoS<sub>2</sub> магнетронного радиочастотного нанесения, обеспечивающая высокую износостойкость, составила  $1 \pm 0,2$  мкм при шероховатости поверхности ТСП  $Ra = 0,032$  мкм (причем для ТСП толщиной  $\delta = 0,2$  мкм ресурс покрытия существенно снижался). Шероховатость подложки  $Ra = 0,009$  мкм.

В работе Т. Spalvins [13] приводится динамика износа ТСП магнетронного нанесения (рис. 10).

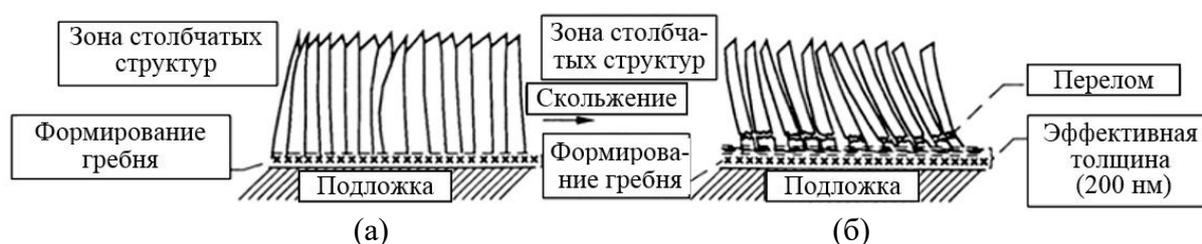


Рис. 10. Структура смазочной пленки ТСП магнетронного нанесения до и после трения скольжения [13]: морфологический рост напыленных пленок MoS<sub>2</sub> (а) и перелом при скольжении напыленной пленки MoS<sub>2</sub> (б)

Анализ динамики износа ТСП магнетронного нанесения (рис. 9), показывает, что во время приработки ТСП толщиной порядка  $\delta = 1$  мкм происходит разрушение верхнего слоя ТСП (около 80 %) и формирование смазочной пленки толщиной  $\delta = 0,2$  мкм, обеспечивающей практически весь ресурс покрытия.

В работе [5] исследовалось влияние шероховатости основы и вида материала на износостойкость и антифрикционные свойства ТСП MoS<sub>2</sub> магнетронного нанесения толщиной  $\delta = 1$  мкм в условиях вакуума (анализировалась шероховатость  $Ra = 0,04; 0,12; 0,25; 0,4$  мкм на титановой, стальной и керамической основах).

В работе Е.В. Roberts [5] были реализованы трибовакуумные испытания по схеме «диск – тройной индентор» на установке, схематически показанной на рис. 1.

Изменение износостойкости покрытий ТСП на различных подложках отражено на рис. 11. Анализ результатов исследований, представленных на рис. 11, показывает, что наибольшую износостойкость обнаруживает ТСП на керамической и металлической основах при оптимальной шероховатости подложки  $Ra = 0,2$  мкм.

Зависимость антифрикционных характеристик ТСП на металлической основе от ее шероховатости представлена на рис. 12. Анализ этой зависимости показывает, что с ростом шероховатости основы в рассмотренных границах коэффициент трения фрикционного сопряжения снижается.

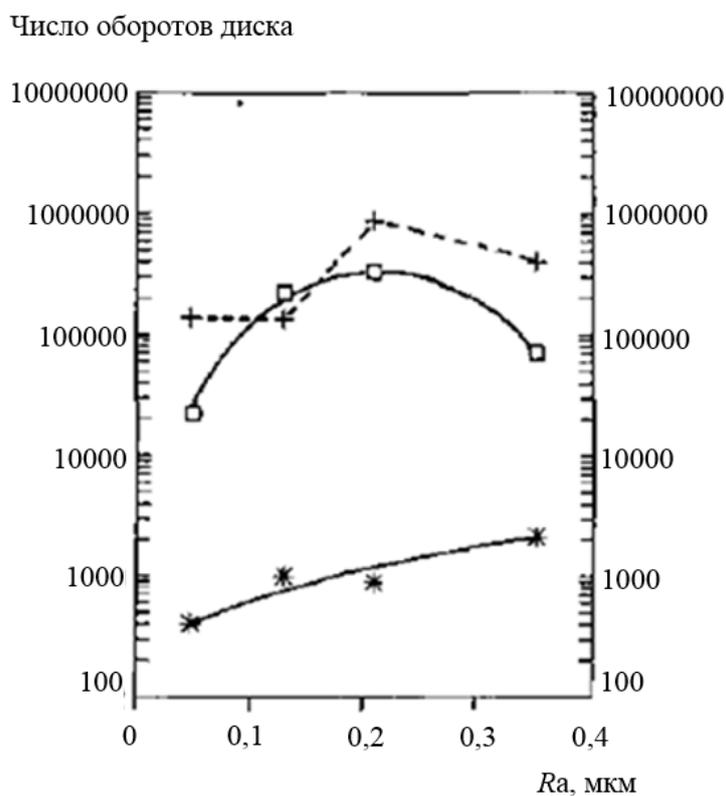


Рис. 11. Изменение износостойкости ТСП  $MoS_2$  магнетронного нанесения в зависимости от шероховатости поверхности основы для трех исследуемых материалов: + – нитрид кремния; □ – сталь 52100; \* – титановый сплав [5]

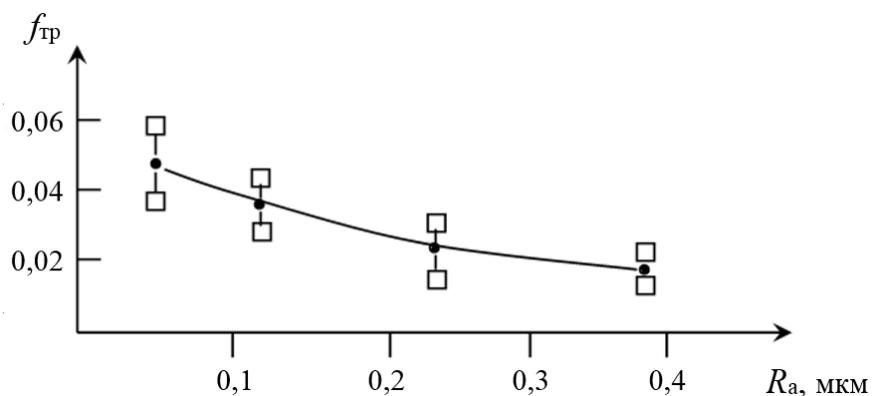


Рис. 12. Изменение коэффициента трения ТСП  $MoS_2$  магнетронного нанесения в зависимости от шероховатости для стальной подложки 52100 [5]

Таким образом, с учетом изменения износостойкости и антифрикционных характеристик для пар трения с ТСП магнетронного нанесения оптимальным следует признать шероховатость основы  $Ra = 0,2$  мкм, равной толщине приработанной пленки исследуемого покрытия (см. рис. 9). Учитывая заключение, сделанное ранее для суспензионных ТСП о возможности выхода наиболее высоких неровностей на поверхности трения, можно сделать аналогичный вывод и для ТСП магнетронного нанесения, где оптимальная толщина приработанной пленки ТСП соизмерима со средней арифметической шероховатостью подложки, а значения наибольшей высоты неровностей с учетом соотношения (1) могут составить

$$R_{\max} = 6 \cdot Ra = 1,2 \text{ мкм.} \quad (2)$$

Значения толщины ТСП различных методов нанесения и шероховатости основы представлены в таблице.

Значения толщин ТСП и шероховатости материала основы для различных методов нанесения

Тип ТСП	Толщина ТСП, мкм		Шероховатость основы $Ra$ , мкм
	После нанесения ТСП	После приработки	
Суспензионного нанесения (СН) по рекомендациям инструкции ВНИИ НП [10]	$20 \pm 5$	2...3 (в период задира 0,4...0,6)	0,3...0,6
СН по данным фирмы Molykote [11]	5...20	–	0,5
СН по рекомендациям инструкции [12]	7,62...12,7	–	–
Магнетронного напыления (МН) по данным К. Miyoshi [2] (в вакууме)	$1 \pm 0,2$	–	0,009
МН по данным Т. Spalvins [13]	1	0,2	–
МН по данным E.W. Roberts [5] (в вакууме)	1	0,2 (оптимальная)	–

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено:

- 1) оптимальная толщина ТСП суспензионного нанесения  $\delta$  составляет от  $20 \pm 5$  мкм (согласно отечественным литературным данным) до 7,62...12,7 мкм (согласно зарубежным источникам);
- 2) частицы  $MoS_2$ , хаотически закрепленные после напыления в связующем полимере, после приработки ориентируются своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения;
- 3) вне зависимости от исходной толщины ТСП суспензионного нанесения основная часть изношенного слоя (75...80 %) приходится на период приработки и

лишь 20...25 % – на установившийся режим трения (толщина ТСП указанного типа изменяется от 2...3 мкм после приработки до 0,4...0,6 мкм в период задира);

4) исходная толщина суспензионного ТСП (~20 мкм) уменьшается до 2...3 мкм, т.е. настолько, что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную пленку MoS<sub>2</sub>.

5) оптимальная шероховатость обработки основы перед суспензионным нанесением согласно инструкции ВНИИ НП Ra = 0,3...0,6 мкм (опескоструенная поверхность), по данным фирмы Molykote Ra = 0,5 мкм

6) оптимальная толщина ТСП магнетронного нанесения составляет 1 мкм;

7) оптимальная по износостойкости шероховатость обработки основы перед магнетронным нанесением Ra = 0,2 мкм;

8) с уменьшением шероховатости обработки основы перед магнетронным нанесением с Ra = 0,05 до 0,4 коэффициент трения сопряжения  $f_{тр}$  снижается с 0,05 до 0,02.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ и смазка). М.: ЭкоПресс, 2010. 604 с.

2. Miyoshi K.: Solid Lubrication. Fundamentals and Applications. Characterization of Solid Surfaces. NASA Glenn Research Center. Cleveland. Ohio. Marcel Dekker, inc. New York 1 Basel, 2001. 400 p.

3. Гриб В.В. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М.: Наука, 1968. 141 с.

4. Хопин П.Н. Оценка долговечности твердосмазочных покрытий на основе анализа топографии поверхностей трения // *Трение и износ*. 1995. Т. 16. № 4. С. 787–793.

5. Roberts E.W., Williams B.J., Ogilvy J.A. The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS<sub>2</sub> films // *Journal of physics D: Applied physics*. 1992. V. 25. № 1A. P. A65–A70.

6. Де Ге А.В.Д., Саломон Г., Заат Д.Х. Механизм разрушения пленки дисульфида молибдена при трении скольжения: избр. доклады на международной конференции по смазочным материалам. Вашингтон, 1964; пер. с англ. М.: Химия, 1967. С. 242–254.

7. Кармадонов А.Ф., Брудный А.И., Кирьянов А.М. Исследование износа и долговечности дисульфидмолибденовой пленки при граничном трении // *Твердые смазочные покрытия*. М.: Наука, 1977. С. 53–61.

8. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука. 1974. 112 с.

9. Хопин П.Н., Попов О.В., Комаров В.А. Экспериментальная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочным покрытием в зависимости от температурного фактора // *Трение и износ*. 1985. Т. 6. № 6. С. 1109–1116.

10. Сентюрихина Л.Н., Рубцова З.С. Инструкция по нанесению твердых смазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена, на поверхности трения. М.: Химия, 1967. 12 с.

11. Руководство по выбору смазочных материалов Molykote. URL: <https://atf.ru/upload/iblock/79a/79a889f77349f351ca15d878b5ebb57c.pdf> (дата обращения: 30.11.2020).

12. Process Specification for Dry-Film Lubricant Application. Daila Gonzalez. Lyndon B. Johnson Space Center. Structural Engineering Division. Houston, Texas. January 2013. 13 p.

13. Spalvins T. Plasma-assisted physical vapor deposition surface treatments for tribological control. National Aeronautics and Space Administration. Lewis Research Center. Cleveland, Ohio 44135-3191. NASA Technical Memorandum 103652. 1991. 15 p.

**Для цитирования:** Хопин П.Н., Гриб В.В. Микроанализ поверхностей трения твердосмазочных покрытий различных видов нанесения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 5–17.

## MICROANALYSIS OF THE FRICTION SURFACES OF SOLID LUBRICATING COATINGS OF VARIOUS TYPES OF APPLICATION

P.N. KHOPIN <sup>1</sup>, Dr. Sc., V.V. GRIB <sup>2</sup>, Dr. Sc.

<sup>1</sup> Moscow aviation institute (National research university), 4, Volokolamsk highway, 125993, Moscow, Russian Federation, e-mail: chopinp@mail.ru

<sup>2</sup> National university of oil and gas «Gubkin University», 65, building 1, Leninsky prospekt, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: grib-vladimir.g@ya.ru

As a result of the studies, it was found that the optimal thickness of the solid lubricant coating for suspension application is from  $20 \pm 5$  microns (according to domestic literature data) to 7,62...12,7 microns (according to the US instructions), for magnetron deposition – 1 micron. During friction, the initial thickness of the suspension coating ( $\sim 20 \mu\text{m}$ ) decreases so much ( $2...3 \mu\text{m}$ ) that contact of the highest microroughnesses occurs through the MoS<sub>2</sub> lubricating film, which is also observed for magnetron applied solid lubricant coatings. Optimal roughness of base processing before suspension deposition is  $R_a = 0,3...0,6 \mu\text{m}$ , for magnetron deposition –  $0,2 \mu\text{m}$ . With a decrease in the roughness of the base processing before magnetron deposition with  $R_a = 0,05...0,4$ , the friction coefficient of the interface decreases from  $f_f = 0,05$  to  $0,02$ .

*Keywords:* solid lubricating coatings, suspension and magnetron deposition, coating thickness, base roughness.

### REFERENCES

1. Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. Prikladnaya tribologiya (treniye, iznos i smazka) [Applied tribology (friction, wear and lubrication)]. Moscow: EkoPress, 2010. 604 p.

2. Miyoshi K. Solid Lubrication. Fundamentals and Applications. Characterization of Solid Surfaces. NASA Glenn Research Center. Cleveland. Ohio. Marcel Dekker, inc. New York l Basel. 2001. 400 p.

3. Grib V.V. Laboratornyye ispytaniya materialov na treniye i iznos [Laboratory tests of materials for friction and wear]. Moscow: Nauka. 1968. 141 p.

4. Khopin P.N. Evaluation of the durability of solid-lubricant coatings based on the analysis of the topography of friction surfaces. *Friction and wear*. 1995. V. 16. No. 4, pp. 787–793. (In Russian).

5. Roberts E.W., Williams B.J., Ogilvy J.A. The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS<sub>2</sub> films. *Journal of physics D: Applied physics*. 1992. V. 25. No. 1A, pp. A65–A70.

6. De Ge A.V., Salomon G., Zaat D.H. The mechanism of destruction of the molybdenum disulfide film during sliding friction. Selected reports at the international conference for lubricants. Washington. 1964. per. s angl. Moscow: Khimiya, 1967. pp. 242–254.

7. Karmadonov A.F., Brudnyy A.I., Kiryanov A.M. Study of wear and durability of disulfidmolybdenum film under boundary friction: Collection of articles *Solid lubricating coatings.*, Moscow: Nauka, 1977, pp. 53–61.

8. Kombalov B.C. Vliyaniye sherokhovatosti tvordykh tel na treniye i iznos [Influence of the roughness of solids on friction and wear]. Moscow: Nauka, 1974. 112 p.

9. Khopin P.N., Popov O.V., Komarov V.A. Experimental evaluation of the performance of friction pairs with a solid-lubricant coating depending on the temperature factor. *Friction and wear.* 1985. V. 6, No. 6, pp. 1109–1116. (In Russian).

10. Sentyurikhina L.N., Rubtsova Z.S. Instruksiya po naneseniyu tvordykh smazochnykh pokrytiy, sodержashchikh disulfid molibdena, na poverkhnosti treniya. [Instructions for applying solid lubricants containing molybdenum disulfide on the friction surface]. Moscow: Khimiya. 1967, 12 p.

11. Rukovodstvo po vyboru smazochnykh materialov Molykote [Guidelines for the selection of Molykote lubricants]. URL: <https://atf.ru/upload/iblock/79a/79a889f77349f351ca15d878b5ebb57c.pdf> (date accessed: 30.11.2020). (In Russian).

12. Process Specification for Dry-Film Lubricant Application. Daila Gonzalez. Lyndon B. Johnson Space Center. Structural Engineering Division. Houston, Texas. January 2013. 13 p.

13. Spalvins T. Plasma-assisted physical vapor deposition surface treatments for tribological control. National Aeronautics and Space Administration. Lewis Research Center. Cleveland, Ohio 44135-3191. NASA Technical Memorandum 103652. 1991. 15 p.

Поступила в редакцию/received: 13.11.2020; после рецензирования/revise: 05.12.2020;  
принята/accepted 15.12.2020

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ, аспирант,  
С.Р. ШЕХТМАН, д-р техн. наук

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р., 2021

Представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований триботехнических характеристик композиционных многослойных покрытий для режущего инструмента при лезвийной обработке фрезерованием. Установлено уменьшение коэффициента трения, увеличение периода стойкости режущего инструмента и снижение тепловой нагруженности зоны резания на фрезерных операциях при использовании износостойких покрытий.

*Ключевые слова:* композиционные многослойные покрытия, фрезерование, вторичные структуры, энтропия, трибосистема.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-18-27**

### ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие машиностроения сопровождается разработкой и внедрением в промышленность новых марок сталей и сплавов, обладающих уникальными физико-механическими свойствами. Детали из таких материалов в большинстве случаев подвергаются лезвийной обработке точением, фрезерованием, сверлением и т.д. При этом повышение эффективности механической обработки резанием является важнейшей задачей машиностроительного производства, где наиболее слабым звеном является режущий инструмент [1, 2], так как именно инструмент в значительной мере определяет эффективность производства в целом, качество обработанной поверхности детали, полноту использования технических возможностей современных мехатронных систем, оснащенных высокоскоростным оборудованием с дорогостоящим микропроцессорным управлением (ЧПУ и АдСУ), сроки их окупаемости и т.д. В связи с этим проблема совершенствования режущего инструмента является актуальной. Вместе с тем в настоящее время в машиностроении еще не нашли широкого применения инструментальные материалы и покрытия с регулируемой адаптацией поверхностей трения, которые с учетом условий резания (управляемой переменности элементов режима резания, СОТС и др.) позволяют повысить износостойкость инструмента за счет протекания неравновесных процессов при трении в процессе резания металлов [3–6]. Это связано с недостаточной изученностью вопросов по структурно-фазовой адаптации приповерхностных слоев на подвижном фрикционном контакте «инструмент – деталь», что затрудняет практическое использование данного явления для решения конкретных технологических задач.

Известно [6–9], что основные явления при трении концентрируются в тонком приповерхностном слое. Научный и практический интерес представляют термодинамические аспекты состояния указанного слоя и связь изнашивания с этим состоянием. Любая трибосистема представляет собой открытую неравновесную

термодинамическую систему и подчиняется принципу вторичной диссипативной гетерогенности, согласно которому в процессе трения протекают явления структурной приспособляемости (адаптации) контактирующих материалов, при этом все виды взаимодействия тел локализуются в тонкопленочном объекте – вторичных структурах (ВС). В соответствии с данным принципом вторичные структуры необходимы для рассеяния энергии при ее переходе из зоны трения в трущиеся тела, причем рассеяние энергии должно происходить с наименьшей скоростью прироста энтропии. Вторичные структуры выполняют защитные функции, ограничивая распространение взаимодействия внутри трущихся тел и снижая его интенсивность [9].

Разработка новых материалов защитных покрытий, способов и процессов их нанесения, архитектуры в направлении создания многослойных композиций, обладающих более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению с монослойными, отвечающих современным требованиям по защите поверхности режущего инструмента, работающих в условиях пластической деформации, повышенных температур, знакопеременных, усталостных и термоусталостных нагрузок, и определила цель данной работы – исследование эксплуатационных свойств композиционных многослойных покрытий для режущего инструмента при фрезеровании.

### ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Направленное изменение свойств покрытий путем варьирования их состава, структуры и строения позволяет существенно влиять на контактные характеристики процесса резания. Известно, что химический состав, физико-механические и теплофизические свойства износостойких покрытий (ИП) могут значительно отличаться от соответствующих параметров инструментального и обрабатываемого материалов, поэтому покрытие следует рассматривать как своеобразную «третью среду» [5]. Причем эта среда, с одной стороны, может заметно изменять поверхностные свойства инструментального материала, а с другой – влиять на процессы контактного взаимодействия, температуру и усилия резания, направленность тепловых потоков, термодинамическое и напряженное состояния режущей части инструмента.

Процесс трения на контактных площадках передней и задней поверхностей во многом определяется поверхностными свойствами пары трения «инструмент – деталь». Согласно молекулярно-механической теории внешнее трение имеет двойственную природу, обусловленную объемным деформированием материала и преодолением межатомных и межмолекулярных связей, возникающих между участками трущихся поверхностей [4]. Адгезионное взаимодействие, как установлено в работе [5], оказывает существенное влияние практически на все параметры резания металлов. В тяжелых условиях трения (при пластических деформациях на контакте) адгезионное взаимодействие приводит к схватыванию. Схватывание можно рассматривать как цепной процесс, начинающийся с образования активных центров и их взаимодействия и заканчивающийся формированием общих металлических связей контактирующих тел с дальнейшим их разрывом и рекомбинацией.

Наиболее простым и надежным способом оценки склонности инструментального и обрабатываемого материалов к схватыванию является определение таких триботехнических параметров, как прочность адгезионных связей на срез  $t_{nm}$  и адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения  $f_m = t_{nm}/P_m$  [4]. Нанесение покрытий на инструментальные материалы позволяет значительно

снизить силу трения. Особенно это характерно для наиболее термодинамически устойчивых покрытий в виде оксидов некоторых металлов, а также для покрытий, которые склонны к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Таким образом, даже при постоянном нормальном напряжении возрастает количество активных центров и увеличивается площадь фактического контакта. Кроме того, повышение температуры ускоряет разрушение поверхностных пленок и образование химически чистых, ювенильных поверхностей. Последнее способствует проявлению схватывания и увеличению сил трения.

Однако в результате дальнейшего повышения температуры происходит разупрочнение «узлов» схватывания и интенсивное окисление трущихся поверхностей, что зачастую приводит к снижению сил трения. Тепловые процессы при резании металлов служат своеобразным индикатором, отражающим характер протекания целого ряда явлений, определяющих работоспособность режущего инструмента и качество формируемых поверхностей обрабатываемых деталей [2]. С повышением температуры инициируются процессы макро- и микроразрушения контактных площадок инструмента [6–8]. При наличии на контактных площадках инструмента ИП снижаются силы резания и работа деформации [1, 2]. Это свидетельствует об уменьшении интенсивности основных источников тепла в зоне резания – деформационного и фрикционного по передней и задней поверхностям.

Износостойкие покрытия, теплофизические свойства которых отличаются от соответствующих характеристик инструментальной матрицы, могут также изменять или регулировать направление и интенсивность тепловых потоков: в сторону инструмента, детали и стружки, а также в окружающую среду. Очевидно, что в этом случае снижение интенсивности основных источников теплоты и изменение направления тепловых потоков приведет к изменению теплового состояния инструмента и температуры резания. Это возможно за счет формирования пленок вторичных структур (в виде рутила, а также оксидов и карбонитридов тугоплавких металлов) на режущем инструменте с покрытием, обладающих защитными и экранирующими свойствами [9].

## **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕРИАЛЫ**

Для оценки степени влияния указанных выше факторов на эффективность процесса резания при применении износостойких покрытий были выполнены работы по компьютерному моделированию теплофизических явлений, расчету температуры резания и распределение тепловых потоков с использованием пакета программ ANSYS, DEFORM. Температуру резания определяли методом естественной термопары [2], при этом регистрацию и запись осуществляли при помощи ртутного токосъемника, цифрового электронного вольтметра «Элемер» и ПЭВМ. Для оценки составляющих сил резания применялся комплект аппаратуры: универсальный трехкомпонентный динамометр УДМ-600 с усилителем 4АНЧ-22 и шлейфовой светолучевой осциллограф типа Н-117 для регистрации и записи сигналов.

Триботехнические характеристики ИП были определены с помощью адгезиомера особой конструкции [10]. На адгезиомере (рис. 1) между двумя

полированными образцами 1, изготовленными из обрабатываемого материала, был помещен вращающийся индентор с исследуемыми покрытиями 2. Для моделирования условий трения, аналогичных процессу резания, образцы и индентор нагревались электроконтактным способом в диапазоне температур от 150 до 1 050 °С. Для создания в зоне контакта пластической деформации, аналогичной процессу резания, образцы из обрабатываемого материала 1 сжимались с силой, равной 2 400 Н. При этом для оценки антифрикционных свойств слоя применялся адгезионный компонент коэффициента трения. Этот компонент, важный для анализа и прогнозирования интенсивности износа при трении металлов, определялся как отношение сопротивления сдвигу  $\tau_m$ , вызываемому адгезионным взаимодействием между материалами инструмента и обрабатываемой деталью, к нормальному напряжению  $P_m$ , возникающему на пластическом контакте при температурах испытания ( $\tau_m/P_m$ ). Модель установки включает в себя также диск 4 с тянущим тросиком 3, электроконтактные клеммы 5 с изоляторами 6.

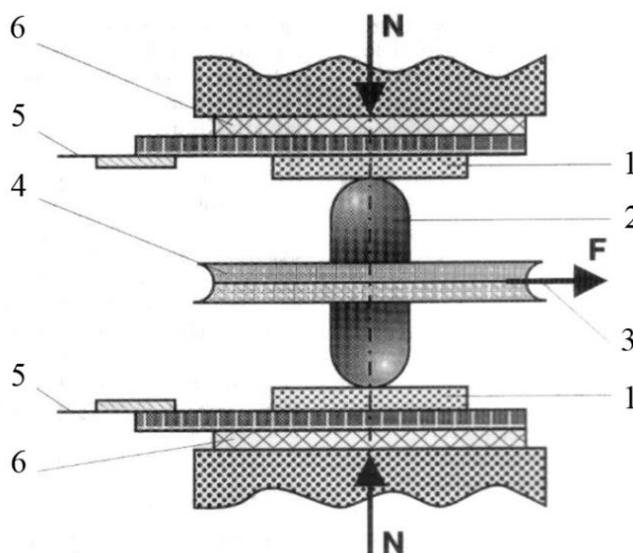


Рис. 1. Модель установки для исследования триботехнических свойств

Были проведены серии натуральных испытаний по определению износостойкости твердосплавных режущих инструментов групп ВК, ТК и ТТК с покрытиями ((TiCr)N, (TiAl)N, (AlTi)N, (TiAlCr)N, (AlTiCr)N), (TiAlCrSiY)N с различным содержанием каждого из элементов покрытия толщиной до 15 мкм при фрезеровании. Фрезерование сталей и сплавов 40Х, 12Х18Н10Т, ЭИ-654, ЭИ-698ВД осуществлялось на вертикально-фрезерном станке НЕСКЕРТ концевыми фрезами с наружным диаметром  $d = 12$  мм, числом зубьев  $z = 4$  и резцовыми фрезами ( $d = 90$  мм,  $z = 1$ ) со сменными четырехгранными твердосплавными пластинами. Исследования проводили при различных режимах фрезерования (частота вращения вала шпинделя  $n = 500 \dots 900$  об/мин; скорость подачи  $S = 50 \dots 100$  мм/мин; глубина резания  $t = 1 \dots 3$  мм; ширина резания  $b = 4 \dots 10$  мм).

Синтез мультислойных покрытий осуществляется на модернизированной промышленной установке ННВ 6.6-И1 с магнитно-дуговой фильтрацией, электро-дуговыми испарителями катода в условиях плазменного ассистирования, с использованием несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда, генери-

руемого плазменным источником «ПИНК». Одновременная генерация частиц распыляемого материала за счет тока дуги с катодным пятном и генерация ионов инертного газа плазменного источника «ПИНК» позволяет повысить концентрацию заряженных частиц, что приводит к ускорению протекания процессов адсорбции, хемосорбции и ионного перемешивания. Проведение процесса в условиях ионной бомбардировки интенсифицирует процессы, наблюдаемые при осаждении многослойных покрытий, способствует формированию мелкозернистой структуры, наноразмерных зерен и слоев, а также образованию сложных соединений за счет:

- энергии, поставляемой в конденсируемое покрытие, и превращения кинетической энергии бомбардирующих ионов в тепловую для локальных объемов;
- увеличения количества и плотности центров зародышеобразования;
- повышения степени ионизации конденсируемого потока для снижения температуры синтеза покрытия и сдерживания роста размеров зерен.

Наблюдаются также поверхностные эффекты, которые заключаются, в частности, в аморфизации растущей пленки; стимулировании диффузионных процессов на границе раздела «покрытие – подложка», повышении адгезионной связи.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты триботехнических испытаний инденторов, изготовленных из инструментального материала Т15К6 с различными покрытиями (рис. 2), показывают, что по мере повышения температуры фрикционные параметры контакта «инструмент – деталь» изменяются немонотонно.

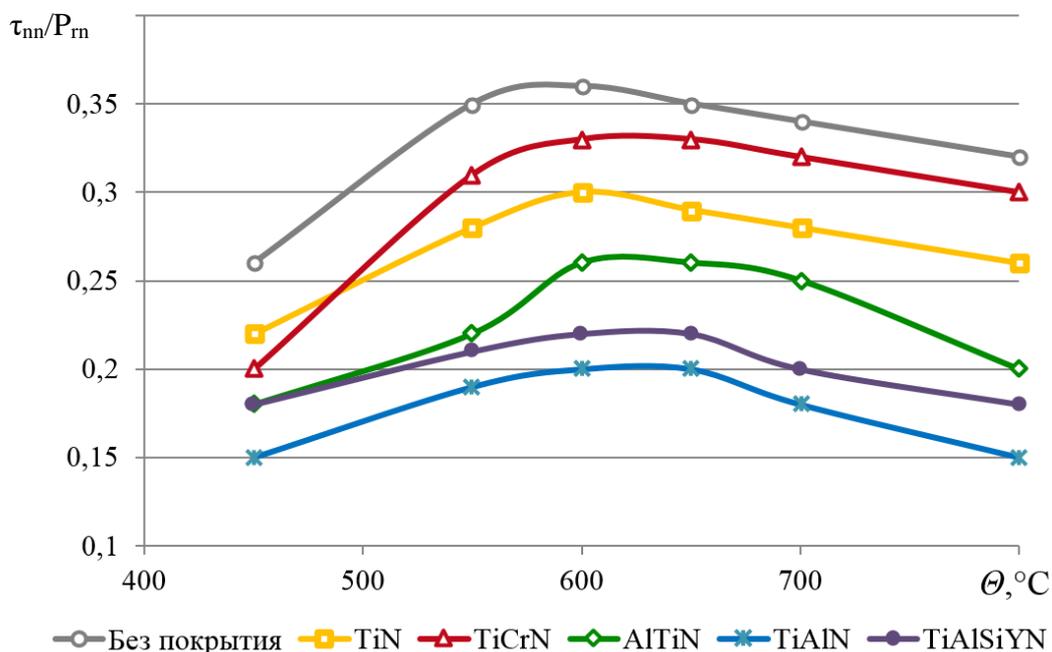


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от температуры в зоне контакта «сталь 12Х18Н10Т – Т15К6 с различными покрытиями»

В диапазоне температур 550...650 °С увеличение коэффициента трения контакта связано с интенсификацией адгезионного взаимодействия на контактных поверхностях. Кривые для всех исследуемых покрытий материалов подобны друг

другу. Однако если при температурах до 450...500 °С величины фрикционных параметров практически одинаковы для всех исследуемых материалов (покрытий), за исключением материалов без покрытия, то при более высоких температурах разница между ними начинает увеличиваться. При температурах около 600...700 °С схватывание (адгезия) на фрикционной контактной поверхности максимальное. При этом фрикционные параметры у инструментальных материалов с износостойкими покрытиями значительно ниже, чем у обычного твердого сплава. Как уже отмечалось в работе [9], данное явление, несомненно, связано с окисляемостью карбида титана и образованием кислородосодержащих соединений на поверхности. Различие фрикционных параметров у исследуемых материалов максимально при температурах, приближающихся к температурам работы инструмента при обработке резанием (700...750 °С).

На наш взгляд, это предопределяет высокие эксплуатационные свойства концевых фрез. Наибольшие значения периода стойкости инструмента ( $T$ ) для условий чистовой и получистовой обработки (при величине износа по задней поверхности инструмента  $h_3^{kp} = 0,3$  мм) соответствуют композиционным многослойным наноструктурным покрытиям типа (AlTi)N, (TiAl)N и (TiAlCrSiY)N (рис. 3). При этом обеспечивается улучшение значения периода стойкости в 2,5...3 раза по сравнению с использованием инструмента без покрытия.

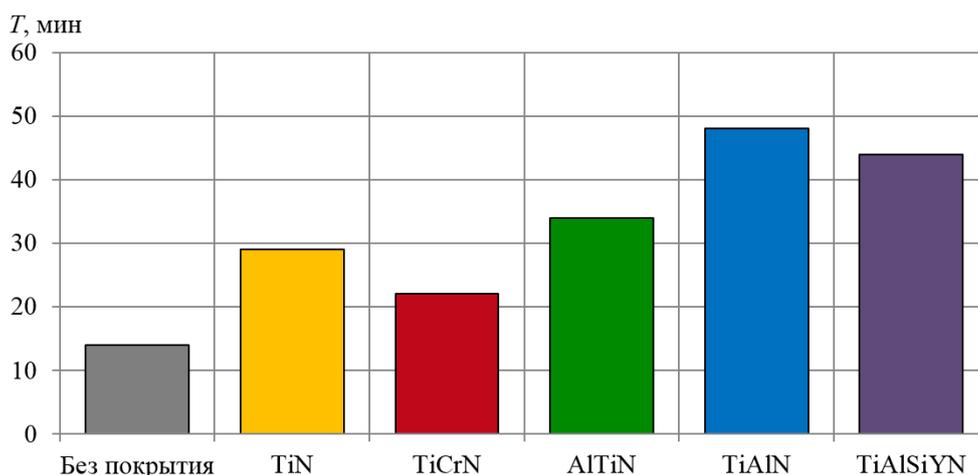


Рис. 3. Зависимость периода стойкости инструмента от типа покрытия при фрезеровании стали 12X18H10T фрезой T15K6 ( $d = 12$  мм,  $z = 4$ ,  $n = 650$  об/мин,  $S_m = 50$  мм/мин,  $b = 3$  мм,  $t = 6$  мм,  $h_3^{kp} = 0,3$  мм)

Экспериментальные исследования температуры резания при фрезеровании (рис. 4) показали, что применение композиционных износостойких покрытий оказывает существенное влияние на тепловую нагруженность зоны резания и зависит от типа покрытий. При использовании износостойких покрытий обеспечивается снижение температуры в зоне контакта до 25 %. Результаты температурных исследований были также использованы для формирования базы данных для моделирования теплофизических явлений.

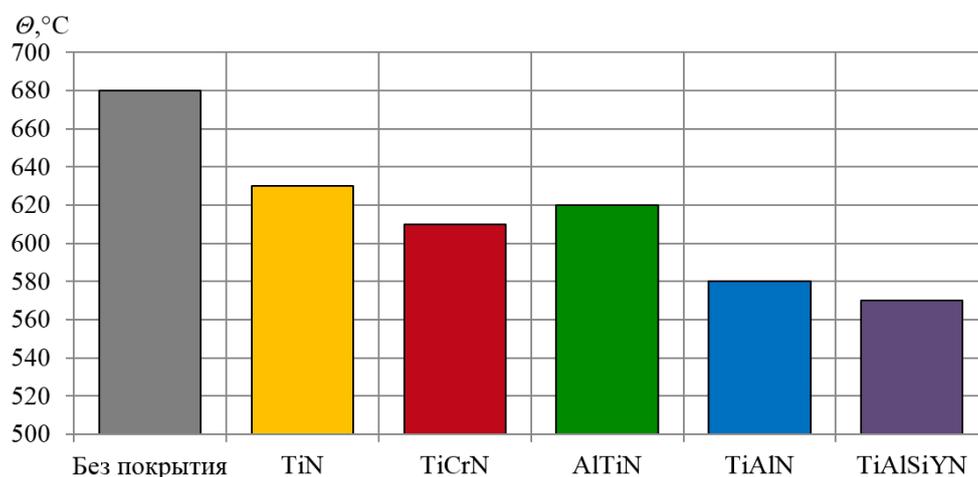


Рис. 4. Зависимость температуры резания от типа покрытия при фрезеровании стали 12Х18Н10Т фрезой Т15К6 ( $d = 12$  мм,  $z = 4$ ,  $n = 650$  об/мин,  $S_m = 50$  мм/мин,  $b = 3$  мм,  $t = 6$  мм,  $h_3^{kp} = 0,3$  мм)

Можно предположить следующий физический механизм этих процессов. В зоне контакта «инструмент – деталь» появляются градиенты температуры и напряжения, локализованные в слоях ниже поверхности. При пластической деформации высокой степени и температурах, достигающих  $550$  °С, инициируются различные процессы, которые изменяют химические и фазовые составы композиционных износостойких покрытий в этих микрообъемах. К ним относятся поглощение кислорода, разложение карбидов и нитридов, которые являются неустойчивыми при такой температуре, хемосорбция кислорода, диффузия освобождаемых С и N из инструмента в стружку. Тонкие пленки представляют собой простые и сложные кислородосодержащие фазы на основе титана и алюминия. Они возникают в процессе резания в тонких приповерхностных слоях инструмента. Отдельные стадии таких процессов исследованы в работе [11].

Способность покрытий образовывать защитные поверхностные пленки во время трения является важным фактором на пути повышения стойкости инструмента. Согласно [9], эта способность улучшается для покрытий с нанокристаллической структурой. Нанокристалличность покрытия помогает формировать защитный слой из оксида алюминия [9] на поверхности вследствие ускоренной диффузии алюминия во время окисления. Покрытие с мелкой зернистой структурой имеет большую площадь границ зерен. Внешняя диффузия алюминия и внутренняя диффузия кислорода усиливаются. Это способствует образованию защитных алюминиевых оксидных пленок, что значительно улучшает износостойкость инструмента (см. рис. 3).

Данные, приведенные в работах [7, 9], показывают, что на поверхности во время резания образуются два типа защитных кислородосодержащих пленок на основе алюминия и титана: аморфноподобные и кристаллические. Эти пленки обладают высокой пластичностью и улучшенной смазывающей способностью. Кроме того, кристаллические пленки оксида алюминия улучшают поведение износа, так как они имеют низкую теплопроводность, что препятствует интенсивной теплоотдаче во время резания. Значительная часть тепла, как подтверждается данными температурных экспериментов, остается в стружке (см. рис. 4). В то же время оксид алюминия как химически устойчивый материал препятствует интенсивному взаимодействию на

поверхности «деталь – инструмент» в процессе резания и снижает сцепляемость обрабатываемого материала с поверхностью режущего инструмента. Для того чтобы улучшить износостойкость и приспособляемость этих покрытий, создать условия для образования обоих типов защитных пленок из оксидов алюминия и титана (кристаллической трибокерамической и аморфноподобной), необходимо обеспечить высокоскоростную обработку.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований триботехнических характеристик композиционных многослойных покрытий для режущего инструмента при фрезеровании установлено, что наиболее благоприятным по коэффициенту трения (см. рис. 2), износостойкости (см. рис. 3) и тепловой нагруженности зоны резания (см. рис. 4) являются покрытия TiAlN и TiAlSiYN. Пленки, которые образуются на поверхности режущего инструмента в результате процесса адаптации, имеют аморфно-кристаллическую структуру [7, 9]. Сложная структура защитных пленок, образующихся при трении и высоких температурах резания, обеспечивает большую износостойкость и соответственно период стойкости фрез с покрытиями.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
3. Бершадский Л.И. Самоорганизация и надежность трибосистем. Киев: Знание, 1981. 35 с.
4. Польцер Г., Эбиленг В., Фирковский А. Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры и самоорганизация // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 1. С. 12–18.
5. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
6. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Boki Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting // *Wear*. 1997. V. 206. №. 1-2. P. 214–220.
7. Fox-Rabinovich G.S., Weatherly G.C., Dodonov A.I., Kovalev A.I., Shuster L.S., Veldhuis S.C., Dosbaeva G.K., Wainstein D.L., Migranov M.S. Nanocrystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications // *Surface and Coatings Technology*. 2004. V. 177–178. P. 800–811.
8. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S. Progress in high temperature nanomechanical testing of coatings for optimising their performance in high speed machining // *Surface and Coatings Technology*. 2014. V. 255. P. 102–111.
9. Fox-Rabinovich G.S., Beake B.D., Endrino J.L., Veldhuis S.C., Parkinson R., Shuster L.S., Migranov M.S. Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2006. V. 200. №. 20–21. P. 5738–5742.

10. Патент РФ 34249. *Прибор для исследования адгезионного взаимодействия* / Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш.; Заявл. 24.06.2003. Опубл. 27.11.2003. Бюл. № 33.

11. Vereschaka A.A., Migranov M.S. Study of wear resistance of sintered powder tool materials // *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd*, 2014. V. 871. P. 159–163.

**Для цитирования:** Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р. Триботехнические свойства композиционных покрытий для концевых фрез // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (7). С. 18–27.

## **TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF COMPOSITE COATINGS FOR END MILLING CUTS**

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., A.M. MIGRANOV, Postgraduate  
S.R. SHEKHTMAN, Dr. Sc.

Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx st.,  
450008, Ufa, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

The results of theoretical and experimental studies of the tribotechnical characteristics of composite multilayer coatings for cutting tools during milling are presented. A decrease in the friction coefficient, an increase in the service life of the cutting tool and a decrease in the thermal loading of the cutting zone during milling operations with the use of wear-resistant coatings are established.

*Keywords:* composite multilayer coatings, milling, secondary structures, entropy, tribosystem.

### **REFERENCES**

1. Vereshchaka A.S. Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokrytiami [Performance of cutting tools with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. 336 p.
2. Makarov A.D. Optimizatsiya protsessov rezaniya [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976. 278 p.
3. Bershadskiy L.I. Samoorganizatsiya i nadezhnost tribosistem [Self-organization and reliability of tribosystems]. Kiev: Znaniye, 1981. 35 p.
4. Pol'tser G., Ebileng V., Firkovskiy A. External friction of rigid bodies, dissipative structures and self-organization. *Treniye i iznos*. 1988. V.9, No.1, pp.12–18. (In Russian).
5. Shuster L.SH. Adgezionnoye vzaimodeystviye tverdykh metallicheskih tel [Adhesive interaction of solid metal bodies]. Ufa: Gilem, 1999. 199 p.
6. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiyy Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting. *Wear*. 1997. V. 206. No. 1–2, pp. 214–220.

7. Fox-Rabinovich G.S., Weatherly G.C., Dodonov A.I., Kovalev A.I., Shuster L.S., Veldhuis S.C., Dosbaeva G.K., Wainstein D.L., Migranov M.S. Nanocrystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications. *Surface and Coatings Technology*. 2004. V. 177–178, pp. 800–811.
8. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S. Progress in high temperature nanomechanical testing of coatings for optimising their performance in high speed machining. *Surface and Coatings Technology*. 2014. V. 255, pp. 102–111.
9. Fox-Rabinovich G.S., Beake B.D., Endrino J.L., Veldhuis S.C., Parkinson R., Shuster L.S., Migranov M.S. Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2006. V. 200. No. 20–21, pp. 5738–5742.
10. Patent RF 34249 utility model *Pribor dlya issledovaniya adgezionnogo vzaimodeystviya* [Device for the study of adhesive interaction]. Shuster L.Sh., Migranov M.Sh. Declared 24.06.2003, Published 27.11.2003, Bulletin No. 33.
11. Vereschaka A.A., Migranov M.S. Study of wear resistance of sintered powder tool materials //Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd, 2014. V. 871, pp. 159–163.

Поступила в редакцию/received: 29.10.2020; после рецензирования/revised: 23.12.2020;  
принята/accepted 28.12.2020

## ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПОСЛЕ ИОННОГО СМЕШИВАНИЯ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ, аспирант

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., 2021

В работе представлены результаты исследования предлагаемого пути повышения износостойкости «дуплексных» покрытий, наносимых на режущие инструменты, за счет предварительного диффузионного насыщения поверхности инструмента азотом (известного как ионное азотирование) с последующим физическим осаждением твердого покрытия (Ti, Cr)N. Предлагаемое покрытие наносилось на инструмент из быстрорежущей стали, но перед этим на азотированную поверхность имплантировался слой с примесью ионов, а затем осаждалось твердое покрытие. В качестве дополнительного, переходного слоя использовали металл: Ti, Zr, W или Al в комбинации с тремя неметаллами: N, C, и O. На стадии процесса «триплекс»-обработки указанные ионы были имплантированы в поверхность подложки для создания модифицированного слоя. Для оценки влияния этих модифицированных слоев на период стойкости инструмента были проведены серии натуральных экспериментов при условиях лезвийной обработки резанием. Наилучшие результаты были достигнуты при «триплекс»-обработке с ионной имплантацией титана.

*Ключевые слова:* износостойкость, дуплексные покрытия, твердое покрытие, триботехнические характеристики, модифицированный слой, «триплекс» обработка.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-28-39**

### ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–4], что металлорежущие инструменты, изготовленные из быстрорежущих сталей при лезвийной обработке резанием, в большинстве случаев подвергаются интенсивному износу (абразивному, адгезионному, диффузионному, окислительному и механическому), в отличие от твердосплавного инструмента. Для снижения интенсивности износа и увеличения периода стойкости быстрорежущего инструмента, а также с целью повышения эффективности металлообрабатывающего производства используют различные композиционные многослойные покрытия. Вследствие схватывания и образования нароста при взаимодействии инструмента с заготовкой происходит износ покрытия, что ведет к интенсификации процесса истирания и сопровождается быстрым возрастанием интенсивности износа самого инструмента [1, 5, 6]. Вместе с тем пути повышения эксплуатационных параметров покрытий на основе изменения объемных характеристик используемых материалов (высокие физико-механические свойства, низкая теплопроводность и т.д.) в большей степени исчерпаны. В этой связи актуально создание на поверхности износостойких покрытий (в тонких слоях) свойств, позволяющих повысить твердость, красностойкость, смазывающий эффект для продления стадии нормального трения и износа [7–10].

При разработке высокоэффективных покрытий для производства необходимо обеспечить рациональное сочетание их объемных и поверхностных свойств. Этого можно достигнуть, создавая на поверхности подложки инструмента в многослойном покрытии дополнительный искусственный подслоя путем тройной обработки, включая ионное смешивание [11–15]. В целом такое износостойкое покрытие должно характеризоваться высокой прочностью и твердостью при повышенных температурно-силовых условиях обработки, обладать инертностью и физико-химическую устойчивостью, трещиностойкостью при значительных динамических нагрузках и защитными и антифрикционными свойствами.

Целью работы являются теоретико-экспериментальные исследования контактных процессов при лезвийной обработке резанием режущим инструментом с «триплексным» покрытием после дополнительного улучшения ионной смесью.

### МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ

В настоящей работе «триплекс»-обработка выполнялась в три этапа. Методом тлеющего разряда азотировалась подложка инструментального материала. До нанесения твердого покрытия поверхность инструмента была модифицирована ионной смесью, и на модифицированный слой наносилось износостойкое покрытие (Ti, Cr)N методом физического осаждения (ФОП). В качестве подложки использовался инструмент из быстрорежущей стали P6M5 (0,8...0,88 % C; 5,0...5,5 % W; 5,0...5,5 % Mo; 3,8...4,2 % Cr; 1,7...2,1 % V; остальное – железо). В специальном устройстве с механической накачивающей системой, содержащей источники нагрева в виде тлеющего разряда и постоянных нагревательных элементов NSV 6/10-11, было произведено ионное азотирование подложки из инструментального материала. Обработка поверхности велась в смеси газов 25 % N<sub>2</sub> + 75 % H<sub>2</sub> (разложившийся аммиак) при температуре 500 °С и следующих технологических параметрах: давление газа 266 Па, время азотирования 0,5 ч, напряжение смещения 600 В, плотность тока тлеющего разряда 3 А×м<sup>-2</sup>.

На установке ННВ 6.6-II с механической и диффузионной накачивающей системой с помощью стандартной катодной дуги в процессе физического осаждения было получено твердое покрытие путем использования одного хромового и двух титановых катодов. Для обеспечения равномерности нанесения покрытия осуществлялось вращение образца в камере при соблюдении расстояния между катодом и образцом не более 200 мм. Технологические режимы нанесения твердого покрытия обеспечивались следующими значениями: температура осаждения 500 °С, плотность тока подложки около 15 А×м<sup>-2</sup>, напряжение смещения подложки 200 В, ток дугового разряда 100 А, давление реактивного газа (азота) 3×10<sup>-1</sup> Па.

Перед осаждением твердого покрытия осуществлялась модификация ионной смесью из пяти комбинаций различных элементов на высокоэнергетической ионной установке (ионном имплантаторе), оборудованной турбомолекулярной накачивающей системой с энергией ~ 40 кэВ при комнатной температуре. Были предварительно выбраны нитриды, карбиды и оксиды следующих металлов: Ti + N, W + N, Zr + N, W + C и Al + O. Именно эти комбинации обеспечивают высокие триботехнические свойства при создании тонких слоев с высокой износостойкостью. Для обеспечения эффективности модификации перед ионным миксингом пяти пар металлов и неметаллов было выполнено обязательное травление поверхности инструментов ионами аргона. При модификации использовались небольшие дозы до 8×10<sup>17</sup> ионов/см<sup>2</sup>. Расстояние между образцами и используемыми пластинами составляло около 10 мм. Плотность тока в этом случае составляла 50 мА/см<sup>2</sup>.

Результаты натуральных износостойкостных экспериментов представлены в таблице в виде относительного периода стойкости инструмента при резании как без применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), так и с СОТС. По результатам сравнения времени резания, необходимого для достижения определенного критического значения износа на инструментах с «триплексными» и «дуплексными» покрытиями, была подтверждена эффективность ионной модификации. Для обеспечения достоверности результатов проводили по восемь испытаний при лезвийной обработке резанием по каждой комбинации поверхностной модификации.

Значения относительного периода стойкости инструмента с триплексным покрытием

Элементы смешивания	Относительный период стойкости	
	без СОТС	с СОТС
AlO	3,0	–
TiN	4,0	2,5
ZrN	0,53	–
WN	0,4	–
WC	1,33	–

Триботехнические характеристики модифицированных триплексных покрытий исследовались на адгезионной установке, позволяющей моделировать контактные процессы, аналогичные процессам лезвийной обработки резанием, представленным в работе [3]. Вращающийся индентор из материала режущего инструмента после триплексной обработки устанавливается между двумя полированными образцами из обрабатываемого материала. Для обеспечения идентичности условиям механической обработки резанием поверхности образцов нагревали электроконтактным способом в диапазоне температур 150...500 °С с созданием пластического напряжения в области контакта путем приложения необходимой нагрузки.

Были проведены серии испытаний на нанотрибометре МТИ-3М с компьютерным управлением. Выполнялось нановдавливание поверхности модифицированного слоя для азотированного ионами образца из быстрорежущей стали и образца с дополнительной ионной смесью. Работа упруго-пластической деформации и микротвердость покрытий определялись с помощью данных по перемещению и нагрузке.

Исследование структурно-фазового состава твердого, дуплексного и триплексного покрытий, фазовый и химический составы модифицированных поверхностей, а также зоны износа и контакта режущего инструмента были исследованы посредством оже-электронной спектроскопии (ОЭС), вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и рентгеновской дифракции (XRD). Проведен анализ расширенной тонкой структуры электронных спектров потери энергии (EELFAS). Сканирующая спектроскопия (ОЭС) использовалась для анализа состава поверхности фаски износа на косом срезе поверхности режущего инструмента на различных стадиях износа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты натуральных экспериментальных исследований, представленные в таблице, показывают, что лучшая износостойкость после «триплексной» поверхностной обработки достигнута в ионно-модифицированном слое, содержащем Ti и N. Зависимости износа по задней поверхности от времени резания для режущего инструмента с «триплексным» покрытием представлены на рис. 1. Они показывают

влияние ионного смешивания на период стойкости режущего инструмента в исследуемых условиях резания. Рабочая температура находилась в пределах 600 °С. При использовании СОТС температура снижалась на 100 °С [2] с соответствующим увеличением периода стойкости инструмента.

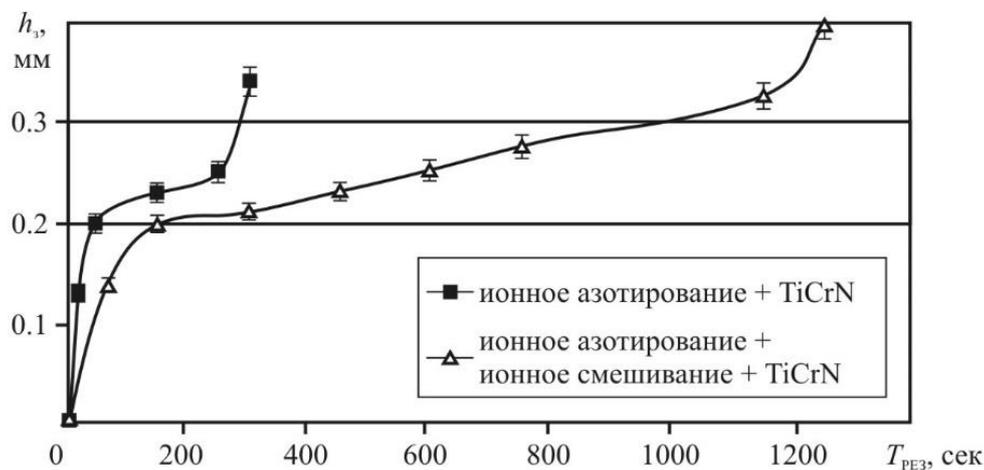


Рис. 1. Зависимость периода стойкости от износа инструмента  $h_3$

На рис. 2 и 3 представлены фазовый и химический составы модифицированного слоя по результатам ЭОС и ВИМС. Основные параметры ионного смешивания приведены на рис. 3а, где толщина имплантированного слоя определялась по линии элементного распределения данных Оже-спектра и составила около 1 мкм.

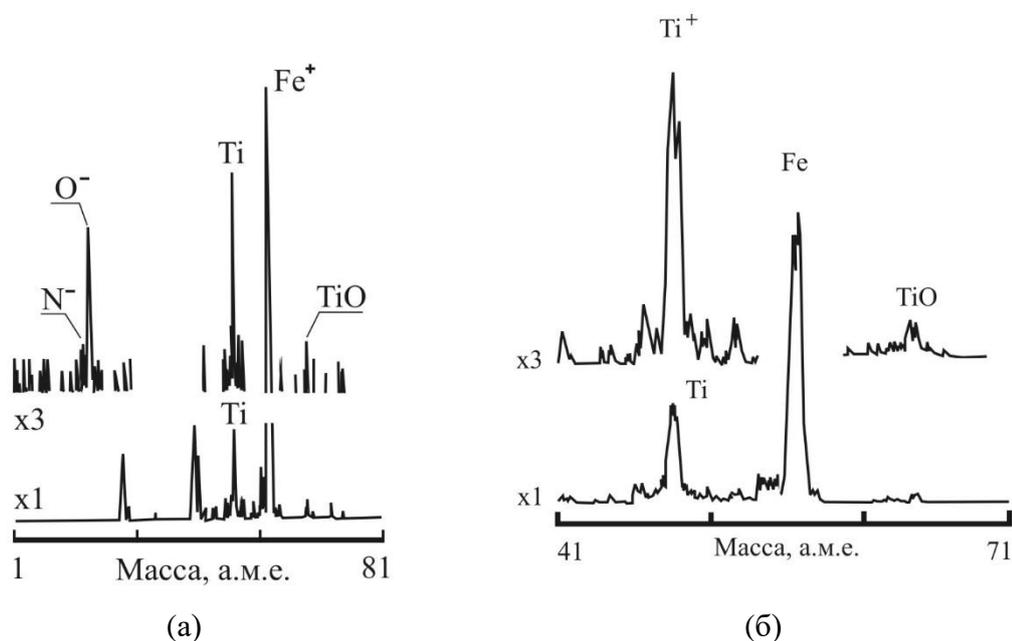


Рис. 2. Спектры ВИМС резца из быстрорежущей стали с «триплексным» покрытием при резании: спектры положительных ионов до работы (а) и после резания в течение 600 с (б)

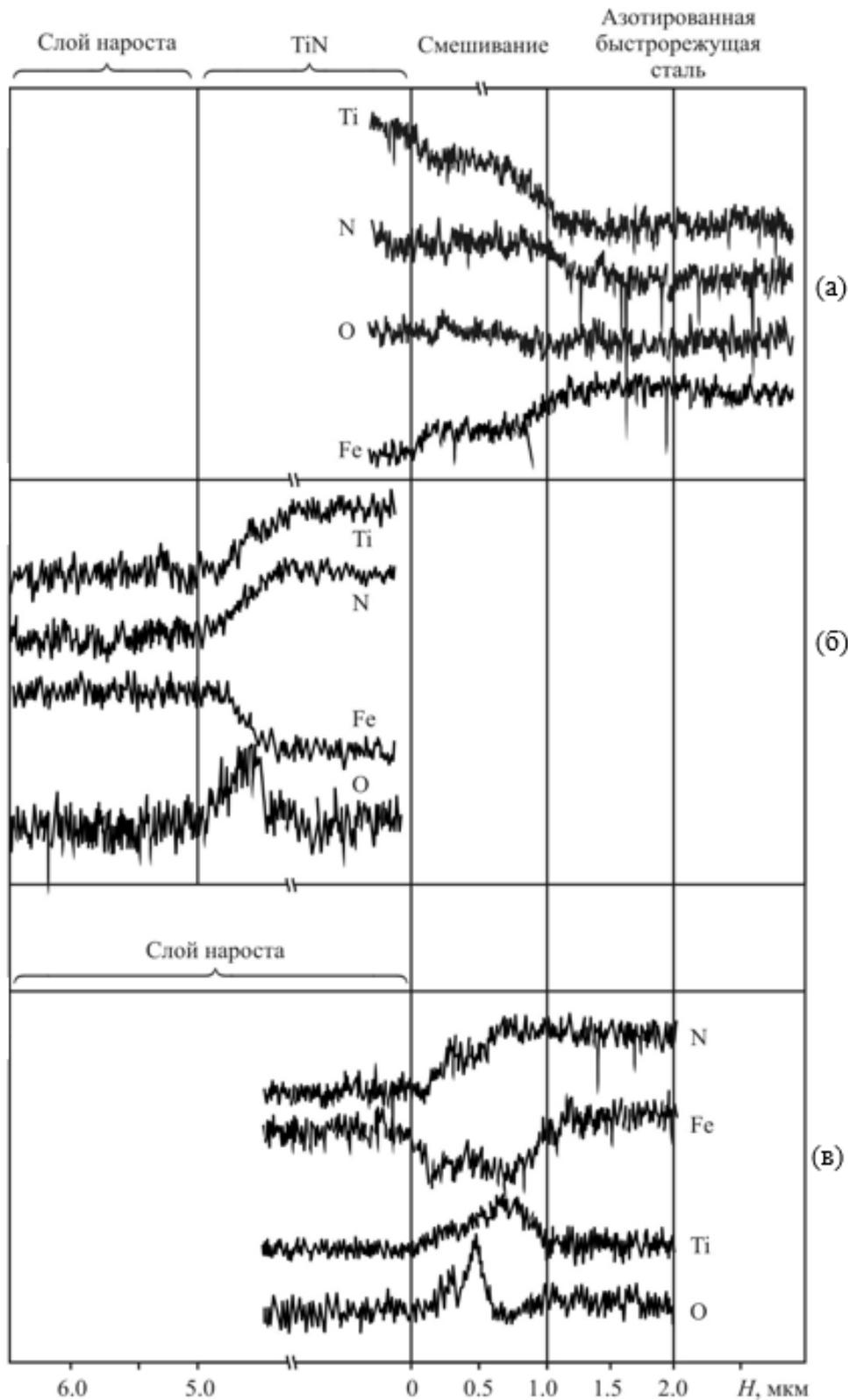


Рис. 3. Линейное распределение элементов по поверхности режущего инструмента и пленки. Оже-спектры: после ионного смешивания азотированной поверхности быстрорежущей стали до эксплуатации (а); поверхность слоя покрытия TiCrN после резания в течение 200 с (б); поверхность кратера износа после резания в течение 600 с (в)

Данные показывают, что твердый раствор азота в титане – это ионно-модифицированный слой (см. рис. 3а). Выявлено (см. рис. 2(а) и 3(а)) значительное количество кислорода на поверхности модифицированного слоя.

На рис. 4 представлены результаты исследования атомной структуры ионно-модифицированного слоя до ФОП-обработки после преобразования Фурье для данных, полученных в результате анализа методом EELFAS поверхности, ионно-модифицированной титаном и азотом. Преобразование Фурье содержит усредненную информацию о структуре ионно-модифицированного слоя после математической обработки электронного спектра. Для больших межатомных расстояний степень упорядоченности в кристаллической решетке мала, что доказывает наличие аморфных переходов в слое [13–15].

На рис. 5 показаны кривые зависимости смещения от нагрузки для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования и в случае ионного азотирования с ионно-смешанным слоем.

Исследование микротвердости, а также работы, связанной с упругой и пластической деформацией слоя, образованного при ионном смешивании, было выполнено с помощью метода нановдавливания.

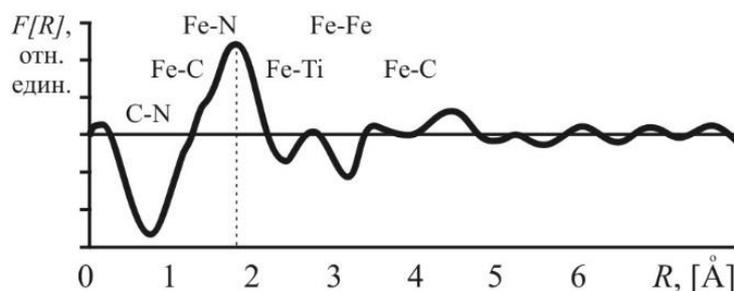


Рис. 4. Данные EELFS пиков обратно рассеянных электронов с поверхности ионно-смешанного слоя после преобразования Фурье

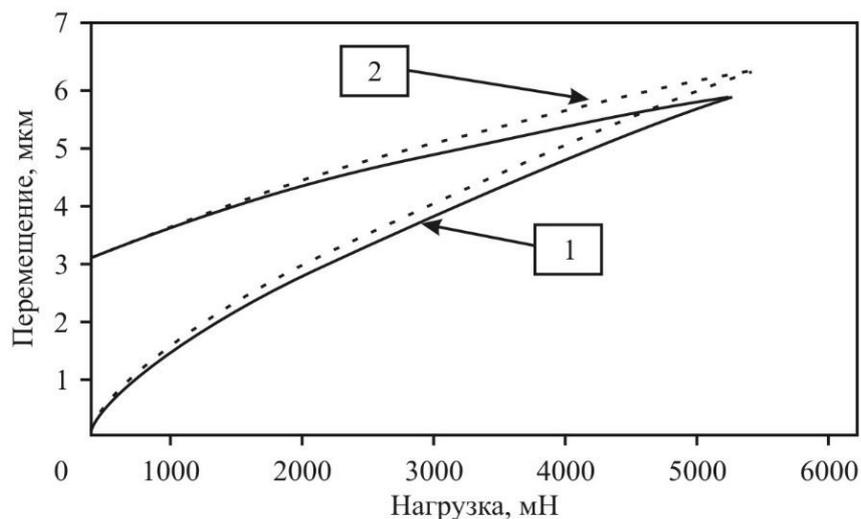
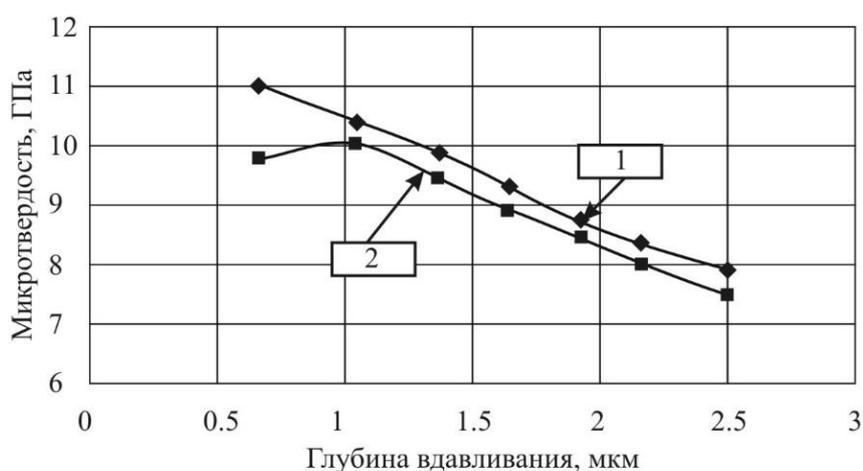
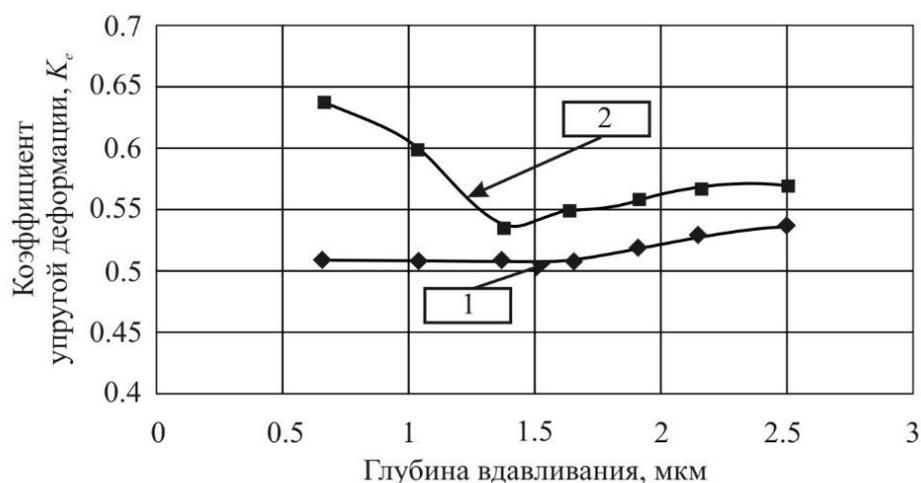


Рис. 5. Влияние нагрузки на перемещение образцов из быстрорежущей стали: 1 – после ионного азотирования; 2 – после ионного азотирования + ионное смешивание

Данные по микротвердости и коэффициенту  $K_e$  как отношению работы упругой деформации к полной работе индентации в зависимости от глубины вдавливания для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования и для ионного азотирования с ионно-смешанным поверхностным слоем представлены на рис. 6. Микротвердость слоя толщиной 1 мкм, модифицированного смесью ионов, имеет значение 9,8 ГПа, что ниже значения микротвердости для слоя, азотированного ионами, составляющего 11 ГПа. Однако имеется незначительное различие в микротвердости обоих образцов для больших глубин индентации (рис. 6а). На рис. 6б представлена зависимость коэффициента  $K_e$  от глубины индентации для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования с ионно-смешанным слоем и без него. Значение этого параметра существенно выше (до 0,64) на поверхности ионно-модифицированного слоя, с более низкой микротвердостью по сравнению со слоем после ионного азотирования более (0,5).



(а)



(б)

Рис. 6. Влияние глубины вдавливания на микротвердость (а) и коэффициент упругой деформации (б) для образцов из быстрорежущей стали: 1 – после ионного азотирования; 2 – после ионного азотирования + ионное смешивание

Ионное смешивание также снижает коэффициент трения (рис. 7). При этом для низких температур различие было более значительным, но и для реальных температур резания эта разница существенна.

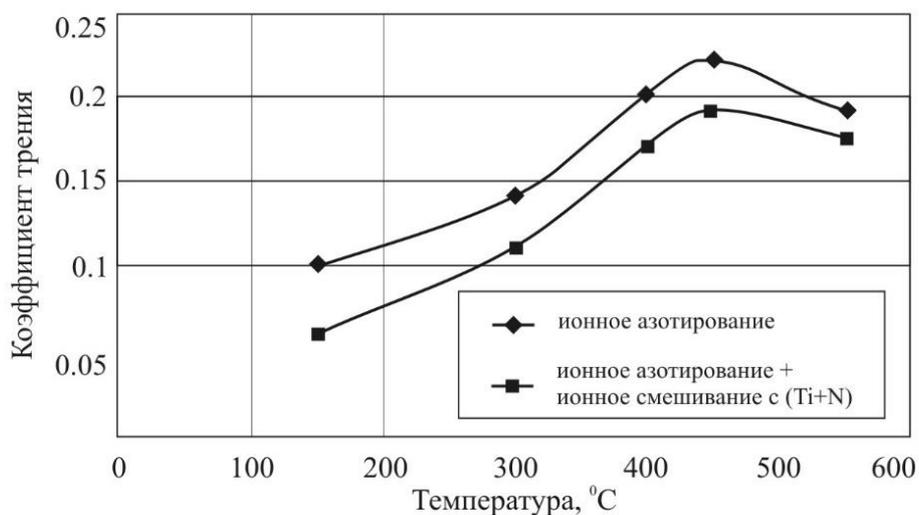


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от температуры для образцов с ионным азотированием и ионным азотированием + ионное смешивание

Ионное смешивание – это один из основных процессов, используемых для получения необходимых размеров и кристаллографической ориентации зерна в процессе формирования пленок [4, 12–15]. Процесс смешивания основан на добавлении нескольких элементов (в нашем случае Ti и N) в основу. Метастабильная фаза, которая в рассматриваемом случае с наибольшей вероятностью является твердым раствором азота в титане (см. рис. 3а), образуется на поверхности ионно-модифицированной подложки из быстрорежущей стали. Минимальный нагрев подложки при ионном смешивании необходим для образования поверхностного слоя с нанокристаллической структурой и, как в данном случае, с аморфноподобной структурой [9]. При ионном смешивании нагреваются формирующиеся пленки или поверхностные слои на атомном уровне, поэтому это явление называется нагревом на атомном уровне (НАУ) [8]. Такой нагрев вызван конденсацией напыленных атомов и последующим очень быстрым охлаждением на атомном уровне. Можно предположить, что образование аморфноподобных структур на поверхности подложки – результат процесса НАУ при жестких неравновесных условиях ионного смешивания.

Очень важно, что ионная модификация ведет к улучшению свойств модифицированного слоя поверхности. Аморфноподобная структура поверхностного слоя влияет на снижение коэффициента трения, что предотвращает интенсивное изнашивание инструмента. Этот слой, типичный для аморфноподобных структур при резании [9], имеет улучшенную способность накопления энергии упругой деформации (см. рис. 6), что снижает вероятность образования трещин. Улучшение данных параметров предотвращает интенсивное повреждение поверхности при переходе от нормальной стадии износа к катастрофической, однако это не является исчерпывающим объяснением причин существенного увеличения периода стойкости инструмента в результате ионного смешивания.

Данный вопрос необходимо рассмотреть с позиций трибологии и синергетики. Известно, что тонкие защитные пленки формируются на поверхности в результате

процесса «самоорганизации» при трении [5]. Детальное изучение таких трибопленок приведено в источниках [4, 8]. Защитные пленки перенасыщены твердыми растворами кислорода, который поступает из окружающей среды. Аморфноподобная структура может быть сформирована также в результате реакции с материалом инструмента. Эти типы Ti-O пленок образуются в верхних слоях поверхности исследуемого покрытия TiCrN, полученного методом ФОП (см. рис. 3(б)).

Начальная аморфноподобная структура поверхности, обнаруженная после ионного смешивания (см. рис. 4), похожа на структуру пленок, образованных на поверхности при трении. Быстрое образование защитных пленок наиболее вероятно при взаимодействии твердого покрытия с ионно-смешанным слоем при резании. Ионное смешивание улучшает процесс, который естественно протекает в трибосистеме в ходе самоорганизации и завершается формированием устойчивых защитных пленок. На конечной стадии процесса износа слоя, содержащего твердое ФОП-покрытие, т.е. приблизительно на 250-й отметке пути резания для «дуплексных» покрытий (см. рис. 1), кислород из окружающей среды проникает через многочисленные поры и достигает поверхности ионно-модифицированной подложки. Так как этот слой имеет очень высокую плотность точечных дефектов, реакция с кислородом происходит очень быстро (см. рис. 3(в)). Таким образом, когда твердое покрытие полностью изношено, защитные трибопленки уже содержатся в поверхностных слоях. Эти пленки задерживают переход к катастрофической стадии износа инструмента с тем, чтобы трибосистема снова могла вернуться к стабильному состоянию износа. (Результаты стабилизации скорости износа и продления эффективного периода стойкости (срока службы) инструмента показаны на рис. 1). Благодаря этим эффектам, период стойкости режущих инструментов из быстрорежущей стали, изготовленных по технологии «триплексного» покрытия, увеличился в 4 раза.

С точки зрения самоорганизации можно рассматривать как естественные процессы при трении, так и искусственные процессы, происходящие вследствие ионного смешивания. Поэтому управление искусственными процессами ионного смешивания, которые поддерживают эволюцию естественных процессов, имеющих место при трении, уменьшает скорость износа. Это типичное управление процессом трения с положительной обратной связью, которая значительно увеличивает период стойкости (срок службы) инструмента [4, 8, 12–15].

## ВЫВОДЫ

1. Многослойные покрытия, полученные после предварительного азотирования подложки инструментального материала с последующей ионной модификацией на высокоэнергетической установке и нанесением твердого покрытия, позволяют увеличить период стойкости инструмента в 3–4 раза.
2. Наилучшими триботехническими характеристиками и износостойкостью обладает «триплексное» покрытие с подложкой, содержащей ионную смесь (Ti + N).
3. Увеличение периода стойкости инструмента достигнуто при образовании ионно-модифицированным слоем аморфноподобной структуры, имеющей более низкий коэффициент трения, улучшенную способность накопления энергии упругой деформации, что предотвращает глубокое повреждение поверхности.
4. В процессе резания содержащий кислород трибопленки интенсивно развиваются на поверхности ионно-модифицированного слоя, защищая режущий инструмент от износа, что позволяет продлить устойчивую нормальную стадию износа и значительно увеличить период стойкости инструмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Интенсификация процесса механообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
3. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 99 с.
4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiya Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting // *Wear*. 1997. V. 206. № 1–2, pp. 214–220.
5. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 326 с.
6. Vereschaka A.A., Miganov M.S. Study of wear resistance of sintered powder tool materials // *Advanced Materials Research*. – *Trans Tech Publications Ltd*, 2014. V. 871, P. 159–163.
7. Vereschaka A., Miganov M., Vereschaka A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. № 20. С. 9282–9286.
8. Barsoum M.W., Yoo H.I., Polushina I.K., Rud V.Y., Rud Y.V., El-Raghy T. Electrical conductivity, thermopower, and hall effect of  $Ti_3AlC_2$ ,  $Ti_4AlN_3$  and  $Ti_3SiC_2$  // *Physical Review B*. 2000. V. 62. № 15. P. 10194–10198.
9. Cui X., Zhao B., Jiao F., Zheng J. Chip formation and its effects on cutting force, tool temperature, tool stress, and cutting edge wear in high-and ultra-high-speed milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 83. № 1–4. P. 55–65.
10. Saglam H., Yaldiz S., Unsacar F. The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature // *Materials and Design*. 2007. V. 28. № 1. P. 101–111
11. Özel T., Hsu T.-K., Zeren E. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. V. 25. № 3–4. P. 262–269.
12. George M., Coupeau C., Colin J., Grilhe J. Mechanical behaviour of metallic thin films on polymeric substrates and the effect of ion beam assistance on crack propagation // *Acta Materialia*. 2005. V. 53. № 2. P. 411–417.
13. Marx V.M., Toth F., Wiesinger A., Berger J., Kirchlechner C., Cordill M.J., Fischer F.D., Rammerstorfer F.G., Dehm G. The influence of a brittle Cr interlayer on the deformation behavior of thin Cu films on flexible substrates: Experiment and mode // *Acta Materialia*. 2015. V. 89. P. 278–289.
14. Lee H.Y., Han J.G., Baeg S.H., Yang S.H. Structure and properties of WC-CrAlN superlattice films by cathodic arc ion plating process // *Thin solid films*. 2002. V. 420. P. 414–420.
15. Park J.-K., Baik Y.-J. The crystalline structure, hardness and thermal stability of AlN/CrN superlattice coating prepared by D.C. magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 200. № 5–6. P. 1519–1523.

**Для цитирования:** Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Износостойкие покрытия для режущего инструмента после ионного смешивания // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 28–39.

## **WEAR-RESISTANT COATINGS FOR CUTTING TOOLS AFTER IONIC MIXING**

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., A.M. MIGRANOV, Postgraduate

Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx st.,  
450008, Ufa, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

The paper presents the results of a study of the proposed way to increase the wear resistance of “duplex” coatings applied to cutting tools, which are due to preliminary diffusion saturation of the tool surface with nitrogen (known as ion nitriding) followed by physical deposition of a hard coating (Ti, Cr) N. The proposed coating was applied to a high-speed steel tool, but before that a layer with an impurity of ions was implanted on the nitrided surface, and then a hard coating was deposited. As an additional, transition layer, a metal was used: Ti, Zr, W and Al in combination with three non-metals N, C, and O. At the stage of the triplex-processing process, these ions were implanted into the surface of the substrate, creating a modified layer. To assess the effect of these modified layers on the tool life, a series of field experiments were carried out under the conditions of blade cutting. The best results were achieved with "triplex" treatment with titanium ion implantation.

*Keywords:* wear resistance, duplex coatings, hard coating, tribotechnical characteristics, modified layer, "triplex" treatment.

### **REFERENCES**

1. Vereshchaka A.S. Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokrytiyami [Performance of cutting tools with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. 336 p.
2. Migrantov M.Sh., Shuster L.Sh. Intensifikatsiya protsessa mekhanooobrabotki na osnove ispolzovaniya efekta samoorganizatsii pri trenii [Intensification of the machining process based on the use of the effect of self-organization during friction]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005. 202 p.
3. Shuster L.Sh. Adgezionnoye vzaimodeystviye tverdykh metallicheskih tel [Adhesive interaction of solid metal bodies]. Ufa: Gilem, 1999. 99 p.
4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiyy Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting. *Wear*. 1997. V. 206. No. 1–2, pp. 214–220.
5. Krioni N.K., Migrantov M.Sh. Pokrytiya i smazki dlya vysokotemperaturnykh tribosopryazheniy. [Coatings and greases for high temperature tribo conjugation]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2016. 326 p.
6. Vereschaka A.A., Migrantov M.Sh. Study of wear resistance of sintered powder tool materials. *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd*, 2014. V. 871, pp. 159–163.

7. Vereschaka A., Migranov M., Vereschaka A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. No. 20, pp. 9282–9286.
8. Barsoum M.W., Yoo H.I., Polushina I.K., Rud V.Y., Rud Y.V., El-Raghy T. Electrical conductivity, thermopower, and hall effect of  $Ti_3AlC_2$ ,  $Ti_4AlN_3$  and  $Ti_3SiC_2$  *Physical Review B*. 2000. V. 62. No. 15, pp. 10194–10198.
9. Cui X., Zhao B., Jiao F., Zheng J. Chip formation and its effects on cutting force, tool temperature, tool stress, and cutting edge wear in high-and ultra-high-speed milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 83. No. 1–4, pp. 55–65.
10. Saglam H., Yaldiz S., Unsacar F. The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature. *Materials and Design*. 2007. V. 28. No. 1, pp. 101–111.
11. Özel T., Hsu T.-K., Zeren E. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. V. 25. No. 3–4, pp. 262–269.
12. George M.; Coupeau C.; Colin J.; Grilhe J. Mechanical behaviour of metallic thin films on polymeric substrates and the effect of ion beam assistance on crack propagation. *Acta Materialia*. 2005. V. 53. No. 2, pp. 411–417.
13. Marx V.M., Toth F., Wiesinger A., Berger J., Kirchlechner C., Cordill M.J., Fischer F.D., Rammerstorfer F.G., Dehm G. The influence of a brittle Cr interlayer on the deformation behavior of thin Cu films on flexible substrates: Experiment and mode. *Acta Materialia*. 2015, V. 89, pp. 278–289.
14. Lee H.Y., Han J.G., Baeg S.H., Yang S.H. Structure and properties of WC-CrAlN superlattice films by cathodic arc ion plating process. *Thin solid films*. 2002. V. 420, pp. 414–420.
15. Park J.-K., Baik Y.-J. The crystalline structure, hardness and thermal stability of AlN/CrN superlattice coating prepared by D.C. magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 200. No. 5–6, pp. 1519–1523.

Поступила в редакцию/received: 29.10.2020; после рецензирования/ revised: 2.12.2020;  
принята/accepted 15.12.2020

# ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.23.05

## КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОЛИЧЕСТВА ГРУЗА НА КОНВЕЙЕРЕ

В.П. ДЬЯЧЕНКО, канд. техн. наук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, e-mail: viach.dyachenko@yandex.ru

© Дьяченко В.П., 2021

Получены аналитические зависимости корреляционной функции и спектральной плотности интегральной нагрузки на ленте конвейера в условиях случайного грузопотока, который специфичен для горных предприятий. Математически процесс поступления груза на конвейер считается марковским экспоненциально коррелированным случайным процессом. Вероятностные параметры искомой нагрузки на конвейер определяются для двух моделей случайного грузопотока: классической модели и предложенной в более ранних работах автора. Полученные в данной статье аналитические зависимости могут быть применены для моделирования системы регулирования скорости ленточного конвейера в зависимости от случайных колебаний входного грузопотока, а также для определения вероятностных характеристик случайных колебаний нагрузки на привод и максимального натяжения ленты конвейера, количества метана, выделяемого транспортируемым углем в горных выработках.

*Ключевые слова:* ленточный конвейер, расчет натяжения ленты, грузопоток, нагрузка на привод, марковский случайный процесс, вероятностные характеристики.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-40-47**

### ВВЕДЕНИЕ

Вероятностные характеристики загрузки привода ленточного конвейера, регулирования скорости ленточного конвейера в зависимости от колебаний величины входного грузопотока, максимального (необходимого для прочностного расчета) натяжения конвейерной ленты и многих других параметров при случайных колебаниях грузопотока определяются флуктуациями загрузки конвейера, т.е. текущего значения количества груза, лежащего на его ленте [1]. Это количество является текущим значением интеграла входного грузопотока, определяемым за период движения груза по конвейеру, т.е. «скользящей» суммой грузопотока. Этим обусловлена актуальность темы, затронутой в данной статье.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В 60-х годах 20-го столетия началось активное использование методов теории вероятностей и математической статистики при исследовании технологических процессов в горном деле, в том числе при описании грузопотоков, поступающих на ленточные конвейеры. Итоги этого этапа исследований фактически подведены в работе [2].

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (9), 2021*

Представление входного потока груза на ленточный конвейер в виде случайного во времени процесса является в настоящее время общепринятым [3]. При этом величина грузопотока  $\alpha(t)$  считается произведением непрерывного случайного процесса двух составляющих: непрерывной составляющей и потока импульсов единичной высоты, который учитывает интервалы поступления и отсутствия груза:

$$\alpha(t) = \dot{\alpha}(t) \varphi(t). \quad (1)$$

Непрерывная составляющая  $\dot{\alpha}(t)$  считается гауссовским марковским процессом, который характеризуется нормальным законом распределения амплитуды и экспоненциальной корреляционной функцией, а дискретная составляющая  $\varphi(t)$  – простым пуассоновским процессом (законы вероятностного распределения длительности интервалов поступления и отсутствия грузопотока являются экспоненциальными). Исходя из этого весь процесс также является гауссовским марковским и экспоненциально коррелированным процессом с постоянной интенсивностью.

Автором настоящей статьи выполнен критический анализ принятого метода описания случайных грузопотоков на горных предприятиях, результаты которого используются при обосновании эксплуатационных и конструктивных параметров ленточных конвейеров [4]. При этом доказано, что существующее представление случайных грузопотоков как нормально распределенных и имеющих постоянную интенсивность колебаний соответствует устаревшим горным технологиям и механизированным комплексам и противоречит физическому механизму формирования их величины, а также не отвечает действительному характеру работы современных выемочных машин. Предложена уточненная система вероятностных параметров для описания и прогнозирования величины грузопотоков.

Кратко перечислим некоторые основные ее отличия:

грузопоток является последовательностью бесконечно узких прямоугольных импульсов высотой  $\alpha_i$  каждый и длительностью, имеющей экспоненциальное распределение;

интенсивность обобщенного экспоненциального распределения длительности импульса на уровне  $\alpha_i$  функционально связана со значением уровня:  $v = f(\alpha)$ , при этом  $\alpha$  не является постоянной для всех уровней грузопотока величиной;

рассмотренные процессы, описывающие случайные грузопотоки, также являются марковскими с некоторым финальным распределением  $p(\alpha)$ , не обязательно нормальным;

эти процессы имеют, кроме  $p(\alpha)$ , дополнительный вероятностный параметр  $q(\alpha) = v(\alpha) \cdot p(\alpha) / v_{cp}$  – плотность вероятности распределения уровней (состояний) грузопотока, где  $v_{cp}$  – средняя интенсивность переходов с одного уровня на другой;

необходимо экспериментально измерять любые два из трех упомянутых выше распределений:  $q(\alpha)$ ,  $v(\alpha) / v_{cp}$  и  $p(\alpha)$ .

Заметим, что для удобства математических выкладок проще использовать вместо величины  $v(\alpha)$  обратную ей величину  $T(\alpha) = 1/v(\alpha)$  – среднее время пребывания процесса на уровне  $\alpha$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вначале используем классический случай описания случайного грузопотока, при котором принято, что интенсивность  $v(\alpha)$  не зависит от текущего уровня грузопотока  $\alpha$ , т.е. когда  $v = const$  (в дальнейшем нумерация формул не производится, так как они приводятся в прямой логической последовательности).

Корреляционная функция загруженности конвейера  $Q$  определялась в работе [5], где было выполнено вычисление только дисперсии этой величины, т.е. значения  $K_Q(\tau)$  при  $\tau = 0$ , то корреляционная функция найдена лишь для интервала  $0 \leq \tau \leq T_k$ , где  $T_k$  – время движения груза по конвейеру, т.е. время загрузки конвейера.

В действительности, как показано ниже, выражение для корреляционной функции  $K_Q(\tau)$  при  $|\tau| > T_k$  имеет не такой вид, как при  $|\tau| < T_k$ . Количество груза, лежащего на конвейере, составляет

$$Q = \int_0^{T_k} \alpha(t) dt$$

и является стационарным случайным процессом.

Как общепринято, корреляционную функцию грузопотока рассчитываем как

$$K_\alpha(\tau) = D_\alpha \cdot e^{-v|\tau|},$$

где  $D_\alpha$  – дисперсия уровня грузопотока:

$$D_\alpha = \int_0^\infty (\alpha - M_\alpha)^2 \cdot \exp(-v|\tau|) p(\alpha) d\alpha = \int_0^\infty (\alpha - M_\alpha)^2 p(\alpha) d\alpha, \text{ при } \tau = 0;$$

$M_\alpha$  – математическое ожидание его величины:

$$M_\alpha = \int_0^\infty \alpha p(\alpha) d\alpha.$$

Основываясь на работе [6], принимаем, что корреляционная функция количества груза  $Q$ , как интеграла от грузопотока  $\alpha(t)$ , определяется формулой

$$K_Q(\tau) = 2 \int_0^{T_k} (\tau - \theta) \cdot K_\alpha(\theta - \tau) d\theta = 2 \int_0^{T_k} (\tau - \theta) \cdot D_\alpha \cdot \exp(-v \cdot |\theta - \tau|) d\theta.$$

Если  $T_k \geq \tau$ , т.е. при  $0 \leq \tau \leq T_k$ , знак модуля в показателе экспоненты не имеет значения. При этом согласно работе [1] значения корреляционной функции и дисперсии  $Q$  составляют:

$$K_Q(\tau) = D_\alpha \left\{ \frac{2(T_k - \tau)}{v} + \frac{1}{v^2} \cdot [e^{-v(T_k - \tau)} + e^{-v(T_k + \tau)} - 2e^{-v\tau}] \right\}$$

$$D_Q = K_Q(0) = D_\alpha \left( \frac{2T_k}{v} - \frac{2}{\alpha^2} + \frac{2e^{-vT_k}}{v^2} \right)$$

При  $\tau = T_k$  получим:

$$K_Q(T_k) = \frac{D_\alpha}{v^2} [1 + e^{-2vT_k} - 2e^{-vT_k}] = \frac{D_\alpha}{v^2} (1 - e^{-vT_k}).$$

Если  $\tau \geq T_k$ , выражение для корреляционной функции принимает вид

$$K_Q(\tau) = D_\alpha \cdot \frac{1}{v^2} [e^{-v(\tau-T_k)} + e^{-v(\tau+T_k)} - 2e^{-v\tau}].$$

При  $\tau = T_k$  оно совпадает с полученным выше, совпадают и первые производные по  $\tau$  обоих этих выражений, равные при  $\tau = T_k$ :

$$\frac{d}{d\tau} K_Q(\tau) = \frac{-D_\alpha}{v} (1 - e^{-vT_k})^2 < 0.$$

Вторые производные по  $\tau$  обоих этих выражений также совпадают при  $\tau = T_k$  и равны при этом:

$$\frac{d^2}{d\tau^2} K_Q(\tau) = D_\alpha (1 - e^{-vT_k})^2 > 0.$$

Отсюда следует, что при  $\tau = T_k$  кривая корреляционной функции  $K_Q(\tau)$  является вогнутой. При  $\tau = 0$  первая производная  $K_Q(\tau)$  равна нулю.

Поэтому кривая  $K_Q(\tau)$  имеет общий вид, показанный на рис. 1. Точка перегиба кривой А определяется координатой  $\tau_A$ , которую можно найти из равенства

$$e^{v\tau} = \sqrt{2e^{vT_k}} - 1.$$

Среднее время корреляции  $\tau_{к.ср}$  процесса  $Q(t)$  находится интегрированием нормированной корреляционной функции на отрезках сдвига времени  $0 \leq \tau \leq T_k$  и  $T_k < \tau \leq \infty$ :

$$\tau_{к.ср} = \frac{T_k}{2}.$$

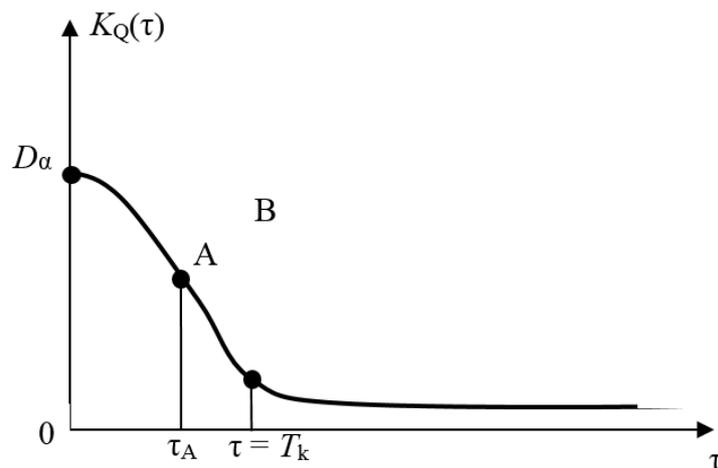


Рис. 1. Форма и параметры корреляционной функции случайного количества груза на ленте конвейера

Общая для произвольного значения  $\tau$  формула для корреляционной функции  $K_Q(\tau)$  приобретает вид

$$K_Q(\tau) = D_\alpha \frac{1}{v^2} (e^{-v|\tau-T_k|} + e^{-vT_k} - 2e^{-v|\tau|}) + D_\alpha \frac{2}{v} I(T_k - \tau),$$

где  $I(T_k - \tau)$  – единичная ступенчатая функция Хевисайда, которая, по определению, равна нулю при  $T_k < \tau$  и единице при  $T_k > \tau$ .

Спектральная плотность случайного процесса загруженности конвейера  $Q(t)$  определяется произведением:

$$S_Q(\omega) = S_\alpha(\omega) \cdot |\Phi(j\omega)|^2,$$

где

$$S_\alpha(\omega) = \frac{\sigma_\alpha^2}{\pi} \cdot \frac{v}{\omega^2 + v^2};$$

$\Phi(j\omega)$  – преобразование Фурье от переходной функции условного блока, выполняющего операцию интегрирования по времени (здесь  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица).

Как известно, передаточная функция блока интегрирования рассчитывается как

$$W(p) = \frac{1}{p} (1 - e^{-T_k p}).$$

Подставляя в это выражение  $p = j\omega$ , получаем искомую функцию  $\Phi(j\omega)$  и ее квадрат:

$$\Phi(j\omega) = \frac{1}{j\omega} (1 - e^{-j\omega T_k});$$

$$|\Phi(j\omega)|^2 = \frac{1}{j\omega} (1 - e^{-j\omega T_k}) \cdot \frac{1}{-j\omega} (1 - e^{-j\omega T_k}) = \frac{2}{\omega^2} (\operatorname{ch} j\omega T_k) = \frac{2}{\omega^2} (1 - \cos \omega T_k).$$

Следовательно, спектральная плотность случайного количества груза на ленте конвейера

$$S_Q(\omega) = \frac{2}{\pi} \sigma_\alpha^2 \frac{v}{\omega^2 (\omega^2 + v^2)} \cdot (1 - \cos \omega T_k).$$

Форма и параметры этой функции показаны на рис. 2. Спектральная плотность случайного количества груза на ленте конвейера является периодической функцией частоты  $\omega$  с периодом  $\frac{2\pi}{T_k}$ .

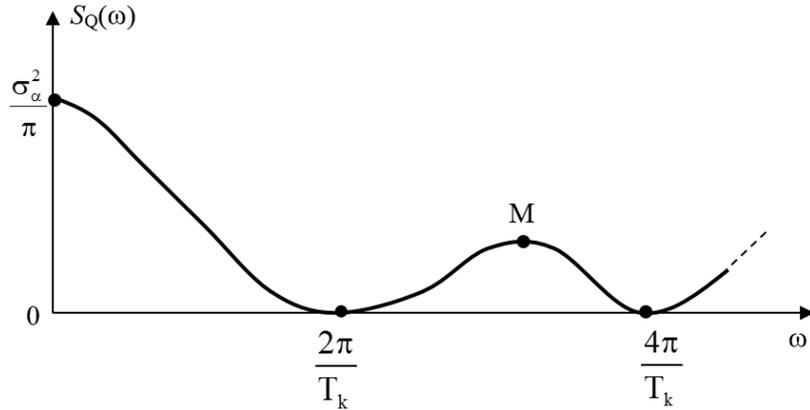


Рис. 2. Форма и параметры спектральной плотности случайного количества груза на ленте конвейера

Обобщим теперь полученные зависимости на случай предложенной автором уточненной модели случайного грузопотока. Все предыдущие преобразования производились по переменной, характеризующей сдвиг по времени  $\tau$ , и не касались переменного уровня грузопотока  $\alpha$ . Поэтому для случая, когда  $v(\alpha)$  изменяется в зависимости от уровня грузопотока  $\alpha$ , проводя аналогию с выполненными выше математическими выкладками, можно получить, что корреляционная функция и спектральная плотность количества груза на конвейере соответственно равны:

$$K_Q(\tau) = \int_0^{\infty} (\alpha - M_\alpha)^2 \cdot \left[ \frac{1}{v^2} (e^{-v|\tau-T_k|} + e^{-vT_k} - 2e^{-v|\tau|}) + \frac{2}{v} I(T_k - \tau) \right] p(\alpha) d\alpha;$$

$$S_Q(\omega) = \int_0^{\infty} (\alpha - M_\alpha)^2 \cdot \frac{2}{\pi} \frac{v}{\omega^2(\omega^2 + v^2)} \cdot (1 - \cos \omega T_k) p(\alpha) d\alpha.$$

Вероятностное распределение количества груза на конвейере можно рассматривать как распределение суммы большого числа малых одинаково распределенных величин. В этом случае согласно работе [6] оно практически совпадает с нормальным распределением, имеющим математическое ожидание  $M_Q = M_\alpha T_k$ , и прямо пропорциональное времени  $T_k$ , с дисперсией, которая определена нами выше.

Приведенные здесь зависимости могут быть использованы для анализа способов регулирования скорости ленточных конвейеров в зависимости от колебаний поступающего случайного грузопотока с целью повышения энергоэффективности горного предприятия, для определения вероятностных параметров нагрузки на привод конвейера и максимального натяжения конвейерной ленты, а также для решения других задач.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. График спектральной плотности случайных колебаний нагрузки на конвейере носит периодический характер, что может вызывать вынужденные колебания и даже автоколебания в приводе конвейера, и является предметом дальнейших исследований.

2. Результаты настоящей работы полезны для использования при анализе способов регулирования скорости ленточных конвейеров в зависимости от колебаний поступающего случайного грузопотока с целью повышения энергоэффективности горного предприятия, для определения вероятностных параметров нагрузки на привод конвейера и максимального натяжения конвейерной ленты, а также для решения других задач (например, для разработки систем регулирования загрузки автоматизированных бункеров конвейерных систем).

3. Приведенные выше вероятностные параметры загрузки конвейера достаточно просто обобщаются для предложенного ранее автором метода уточненного описания интенсивности случайного грузопотока, поступающего на ленточные конвейеры, эксплуатируемые на горных предприятиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Галкин В.И., Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П., Запенин И.В., Шешко Е.Е. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. М.: Горная книга, 2011. 545 с.

2. Мерцалов Р.В. Исследования подземных грузопотоков и установление способов повышения эффективности использования шахтных конвейеров: дис. ... канд. техн. наук. М., 1968. 167 с.

3. Дмитриев В. Г., Вержанский А.П. Основы теории ленточных конвейеров. М.: Горное машиностроение, 2017. 592 с.

4. Дьяченко В.П. Методы описания величины случайного грузопотока ленточных конвейеров горных предприятий на основе ее эмпирических распределений // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. № 3. С. 287–289.

5. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г., Лобачева А.К. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточного конвейера. М.: Моск. горный ин-т, 1974. 45 с.

6. Вентцель Е.С. Курс теории случайных процессов. М.: Наука, 1996. 400 с.

7. Pevzner L., Dmitrieva V. System of automatic load stabilization of mining belt-conveyors // *Proceedings of the 14th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, MPES 2005 and the 5th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries, CAMI 2005*. 2005. P. 1050–1058.

**Для цитирования:** Дьяченко В.П. Корреляционная функция и спектральная плотность случайных колебаний количества груза на конвейере // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 40–47.

#### CORRELATION FUNCTION AND SPECTRAL DENSITY OF RANDOM FLUCTUATIONS IN THE AMOUNT OF CARGO ON THE CONVEYOR

V.P. DYACHENKO, Cand. Sc.

National research technological university "MISIS", 4, Leninsky Prospekt,  
119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: viach.dyachenko@yandex.ru

The article presents analytical dependences of the correlation function and the spectral density of the integral load on the conveyor belt in the conditions of random cargo flow, which is specific to mining enterprises. Mathematically, the process of cargo entering the conveyor is considered to be a Markov exponentially correlated random process. The probabilistic parameters of the desired load on the conveyor are determined

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (9), 2021*

for two models of random cargo flow: the classical model and the one proposed in earlier works of the author of this article. The analytical dependences obtained in this work can be applied to model the speed control system of a belt conveyor depending on random fluctuations in the input cargo flow, as well as to determine the probabilistic characteristics of random fluctuations in the load on the drive and the maximum tension of the conveyor belt, the amount of methane released by transported coal in mine workings.

*Keywords:* belt conveyor, calculation of the tension of the belt, the traffic, the load on the actuator, Markov random process probabilistic characteristics.

## REFERENCES

1. Galkin V.I., Dmitriev V.G., Dyachenko V.P., Tsapenin I.V., Sheshko E.E. *Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornyx predpriyatiy* [Contemporary theory of the belt conveyors of mining enterprises]. Moscow: Gornaya kniga, 2011, 545 p.
2. Mertsalov R.V. Study of underground freight traffics and finding ways to improve the efficiency to use of mining conveyors, Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 1968. 167 p. (In Russian).
3. Dmitriev V.G., Verzhanskiy A.P. *Osnovy teorii lentochnykh konveyerov* [Grounds of the belt conveyor theory]. Moscow: Gornoe mashinostroenie. 2017. 592 p.
4. Dyachenko V.P. Methods of describing of the random freight traffic value of the band conveyors of mining enterprises on the basis of its empirical distributions. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2007, No. 3, pp. 287–289. (In Russian).
5. Shakhmeyster L.G., Dmitriev V.G., Lobacheva A.K. *Dinamika gruzopotokov i regulirovanie skorosti lentochnogo konveyera* [Dynamics of cargo flows and regulating of the speed of a belt conveyor]. Moscow: Mosk. gornyy in-t, 1974. 45 p.
6. Ventzel E.S. *Kurs teorii sluchaynykh prozessov* [Course in the theory of random processes]. Moscow: Nauka, 1996, 400 p.
7. Pevzner L., Dmitrieva V. System of automatic load stabilization of mining belt-conveyors. *Proceedings of the 14th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, MPES 2005 and the 5th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries, CAMI 2005*. 2005, pp. 1050–1058.

Поступила в редакцию/received: 23.10.2020; после рецензирования/ revised: 23.12.2020;  
принята/accepted 28.12.2020

## ВЕРОЯТНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ И ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ДИСКОВОГО РАСПИЛОВОЧНОГО СТАНКА

А.А. ПЕЦЫК, аспирант, М.В. СЕКРЕТОВ, канд. техн. наук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, e-mail: alextir97@gmail.com

© Пецык А.А., Секретов М.В., 2021

В работе рассмотрены вопросы надежности камнераспиловочных станков на примере алмазного дискового станка. С помощью проведенных вероятностных прочностных расчетов были найдены основные оптимальные геометрические параметры зубчато-реечной передачи дискового станка: модуль, диаметр, ширина. Установлено, что возникающие рабочие напряжения очень чувствительны к изменению перечисленных параметров. На основе полученных расчетных данных были построены графики зависимостей, показывающие значимость и необходимость применения вероятностных расчетов с целью определения степени влияния параметров зубчато-реечной передачи дискового станка на изгибную усталость.

*Ключевые слова:* камнераспиловочный станок, вероятностное распределение, случайная величина, зубчато-реечная передача.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-48-55**

### ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация дисковых станков сопряжена с крайне сложными условиями. Несмотря на то что при эксплуатации механической трансмиссии используется жесткое закрепление, значительная часть нагрузки, в связи с неоднородностью материала, приходится на трансмиссию. Одним из наиболее часто отказывающихся и находящихся под наибольшими нагрузками узлом является привод горизонтальной подачи.

Привод горизонтальной подачи включает в себя зубчато-реечный механизм. Для выяснения причин отказов привода следует провести соответствующие расчеты на прочность и выносливость зубчато-реечного механизма [1]. Для того чтобы повысить надежность и эффективность эксплуатации, необходимо путем анализа определить оптимальные геометрические и соответствующие условиям высокоабразивной среды эксплуатации прочностные параметры камнераспиловочного станка Giga 3500.

Отказы зубчатых передач в приводе горизонтальной подачи дискового станка происходят из-за повышенных нагрузок, оказываемых действующим напряжением. Поэтому проводится проверочный расчет зубчато-реечной передачи дискового станка на контактную выносливость активных поверхностей, на изгибную выносливость, на контактную прочность при действии максимальной нагрузки и на изгибную прочность при действии максимальной нагрузки.

В связи с возможным нарушением технологического процесса изготовления деталей, недостаточно высоким качеством сборки и случайным характером действия максимальных нагрузок в элементе, в процессе эксплуатации дискового станка рабочее напряжение превышает допустимое [2]. Поэтому значения нагрузки и прочности можно рассматривать как случайные величины с точки зрения теории вероятности и математической статистики.

Цель работы – обеспечить повышение эффективности эксплуатации и безотказную работу дисковых камнераспиловочных станков с помощью расчета

оптимальных прочностных и геометрических параметров горизонтальной подачи дискового станка Giga 3500.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Необходимые расчеты были проведены на основе информационных данных работы [3]. В исследовании использовались технические характеристики и параметры камнераспиловочных однодисковых станков с большим диаметром исполнительного органа, а именно – алмазных однодисковых станков Giga 3500. При проведении расчетов в качестве нагрузки выбиралось расчетное действующее напряжение, в качестве прочности – допускаемое. Для выполнения условия безотказной работы зубчато-реечной передачи необходимо, чтобы величины показателей нагрузки и прочности элемента имели значительные отклонения (среднее квадратическое отклонение), но нагрузка и прочность элемента незначительно отличались друг от друга.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения расчетов случайных величин  $R$  (прочности элемента),  $Q$  (нагрузки на элементе при прочностных расчетах, наибольшей нагрузки) и  $g$  (вероятности случайной величины) нужно знать закон распределения  $Q$  и  $R$ . Наиболее часто нагрузка и прочность подчиняются нормальным законам распределения [4]. Плотность распределения случайной величины (СВ) нагрузки и прочности при нормальном законе рассчитываются по формулам

$$\zeta(Q) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(Q-m_Q)^2}{2\sigma_Q^2}},$$

$$\zeta(\sigma_{FP}) = \frac{1}{\sigma_{\sigma_{FP}} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\sigma_{FP}-m_{\sigma_{FP}})^2}{2\sigma_{\sigma_{FP}}^2}},$$

где  $\sigma_Q$  – расчетное напряжение изгиба;  $\sigma_{\sigma_{FP}}$  – допускаемое напряжение изгиба;  $m_{\sigma_{FP}}$  – математическое ожидание.

Композиция нормальных законов также будет нормальным законом с плотностью вероятности

$$\xi(g) = \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(g-m_g)^2}{2\sigma_g^2}}.$$

Поскольку закон распределения нагрузки  $Q$  не зависит от закона распределения прочности  $R$ , то  $m_g = m_R - m_Q$  и  $\sigma^2 = \sigma_R^2 + \sigma_Q^2$ , где  $m_R$ ,  $m_Q$  – математическое ожидание случайных величин соответственно прочности  $R$  и нагрузки  $Q$ ;  $\sigma_R$  и  $\sigma_Q$  – среднее квадратическое отклонение прочности  $R$  и нагрузки  $Q$ :

$$\xi(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \cdot e^{-\frac{[g-(m_R-m_Q)]^2}{2(\sigma_R^2 + \sigma_Q^2)}}.$$

Вероятность безотказной работы элемента при условии  $R > Q$

$$P(R > \xi(g)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\sigma_{\sigma_{FP}}^2 + \sigma_{\sigma_F}^2}} \cdot e^{-\frac{[g - (m_{\sigma_{FP}} - m_{\sigma_F})]^2}{2(\sigma_{\sigma_{FP}}^2 + \sigma_{\sigma_F}^2)}}.$$

Расчетное напряжение изгиба, МПа, для переходной поверхности зуба

$$\sigma_F = Y_F Y_\varepsilon Y_\beta \frac{w_{Ft}}{m},$$

где  $w_{Ft}$  – удельная расчетная окружная сила, Н/мм;  $Y_F$ ,  $Y_\varepsilon$ ,  $Y_\beta$ , – коэффициенты, учитывающие форму зуба, перекрытие и наклон зуба соответственно;  $m$  – модуль зацепления, мм. Для  $w_{Ft}$  и  $\sigma_F$  определим максимальные и минимальные значения, Н/мм:

$$w \frac{2000 \cdot 503 \cdot 1,0 \cdot 1,55 \cdot 1,008}{60 \cdot 120} \quad Ftmin',$$

$$\sigma \frac{218}{6} \quad \text{МПа},$$

$$w \frac{2000 \cdot 935 \cdot 1,0 \cdot 2,15 \cdot 1,008}{60 \cdot 120} \quad Ftmax \quad \text{Н/мм},$$

$$\sigma \frac{563}{6} \quad \text{МПа}.$$

Таким образом,  $m_{\sigma_F} = 257$  МПа (математическое ожидание),  $\sigma_{\sigma_F} \approx 39,4$  МПа (среднее квадратическое отклонение) и  $\Delta\sigma_F = 118$  МПа (предельное отклонение).

Для определения допустимых напряжений (изгибных), МПа, используем формулу

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{F \lim b}^0}{S_F} Y_S Y_R K_{\alpha F} K_{Fg} K_{Fd} K_{FC} K_{FL},$$

где  $K_{Fg}$ ,  $K_{FC}$ ,  $K_{Fd}$  – коэффициенты, учитывающие соответственно шлифовку переходных поверхностей, влияние упрочнения (деформационного) и влияние приложения нагрузки с двух сторон;  $K_{FL}$  – коэффициент долговечности;  $\sigma_{F \lim b}^0$  – показатель степени предельной выносливости при изгибе, выражается МПа и соответствует количеству циклов переходов напряжений.

Значительно могут изменяться следующие значения:  $\sigma_{F \lim b}^0$  – на величину  $\pm 10\%$ , т.е.  $\sigma_{F \lim b}^0 \approx 855 \dots 1045$  МПа;  $K_{Fg} = 0,60 \dots 0,75$ ;  $K_{Fd} = 1,0 \dots 1,1$ ;  $S_F = 1,55 \dots 1,95$ ;  $Y_S = 0,93 \dots 0,95$ ;  $Y_R = 1,0 \dots 1,1$ . Минимальные и максимальные значения  $\sigma_{FP}$ , МПа, будут равны

$$\sigma \frac{855}{1,95_{FPmin}},$$

$$\sigma \frac{1045}{1,55_{FPmax}};$$

$m_{\sigma_{FP}} = 413$  МПа,  $\Delta\sigma_{FP} = 168$  МПа,  $\sigma_{\sigma_{FP}} \approx 56$  МПа. График плотности распределения СВ  $g = \sigma_{FP} - \sigma_F$  представлен на рис. 1.

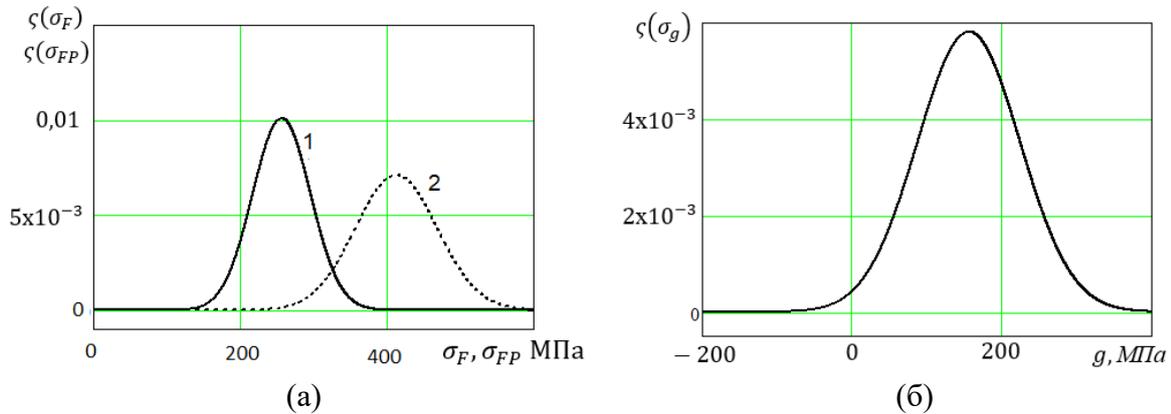


Рис. 1. Плотности распределения СВ при расчете зубчато-реечной передачи на изгибную усталость:  $\sigma_F$  – кривая 1;  $\sigma_{FP}$  – кривая 2 (а);  $g = \sigma_{FP} - \sigma_F$  (б)

Показатель  $P(\sigma_{FP} > \sigma_F) = 98,8\%$  определяет вероятность безотказной работы с учетом изгибной усталости зубьев данного узла. Получается, что в партии деталей, состоящей из 1 тыс. шт., 12 зубчатых передач не смогут обеспечить безотказную работу на время всего срока эксплуатации данного узла.

Расчеты на контактную и изгибную прочность очень важны при проектировании или ремонте зубьев зубчато-реечной передачи [5]. Для нашего расчета самым актуальным является вероятностный расчет зубьев на изгибную прочность зубчато-реечной передачи. Проверочный расчет осуществляется по формуле

$$\sigma_{FM} = \sigma_F \frac{T_{1FM}}{T_{1F}} \leq \sigma_{FPM},$$

где  $\sigma_F$ ,  $T_{1F}$ ,  $\sigma_{FM}$ ,  $T_{1FM}$ ,  $\sigma_{FPM}$  – расчетные напряжения и нагрузки. Нагрузка при расчете изгибной прочности, максимальная из всех нагрузок, которые действуют за срок службы детали (узла). Исходя из расчета на изгибную выносливость

$$\sigma \frac{1725}{935_{FMmin}},$$

$$\sigma \frac{1725}{503_{FMmax}},$$

при этом математическое ожидание  $m_{\sigma_{FM}} = 770,5$  МПа, предельное отклонение  $\Delta\sigma_{FM} = 515$  МПа,  $\sigma_{\sigma_{FM}} \approx 172$  МПа.

Допускаемые изгибные напряжения можно определить по формуле

$$\sigma_{FPM} = \frac{\sigma_{Flim} M K_{FMg} K_{FMd}}{S'_{FM}} Y_S Y_{RM} K_{x_F},$$

где  $K_{FMd}$ ,  $S'_{FM}$ ,  $Y_S$ ,  $K_{FMg}$  – коэффициенты, которые учитывают соответственно влияние упрочнения деформацией на переходной поверхности, безопасности, переходные процессы напряжений, чувствительность материала к концентраторам напряжений,

влияние шлифовки переходных поверхностей зуба;  $\sigma_{F\lim M}$  – предельное напряжение, которое не вызывает остаточные деформации или хрупкий излом зубьев.

В данном расчете возможно значительное изменение показателя предельного напряжения на величину  $\pm 10\%$ . Следовательно,  $\sigma_{F\lim M} \approx 2\,385 \dots 2\,915$  МПа;  $S'_{FM} = 1,75 \dots 2,20$ ;  $Y_S = 0,93 \dots 0,95$ ;  $K_{FMg} = 1,0 \dots 1,1$ ;  $K_{FMd} = 0,95 \dots 1,00$ .

Максимальные и минимальные значения  $\sigma_{FPM}$ , МПа, рассчитываются по формулам

$$\sigma_{FPMmin} = \frac{2385 \cdot 1,0 \cdot 0,95}{2,2},$$

$$\sigma_{FPMmax} = \frac{2915 \cdot 1,1 \cdot 1,0}{1,75},$$

при этом  $m_{\sigma_{FP}} = 1\,349$  МПа,  $\Delta\sigma_{FP} = 391,4$  МПа, среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{\sigma_{HP}} \approx 130,5$  МПа.

Графики плотности распределения СВ  $\sigma_{FM}$  и  $\sigma_{FPM}$ , а также СВ  $g = \sigma_{FPM} - \sigma_{FM}$  представлены на рис. 2.

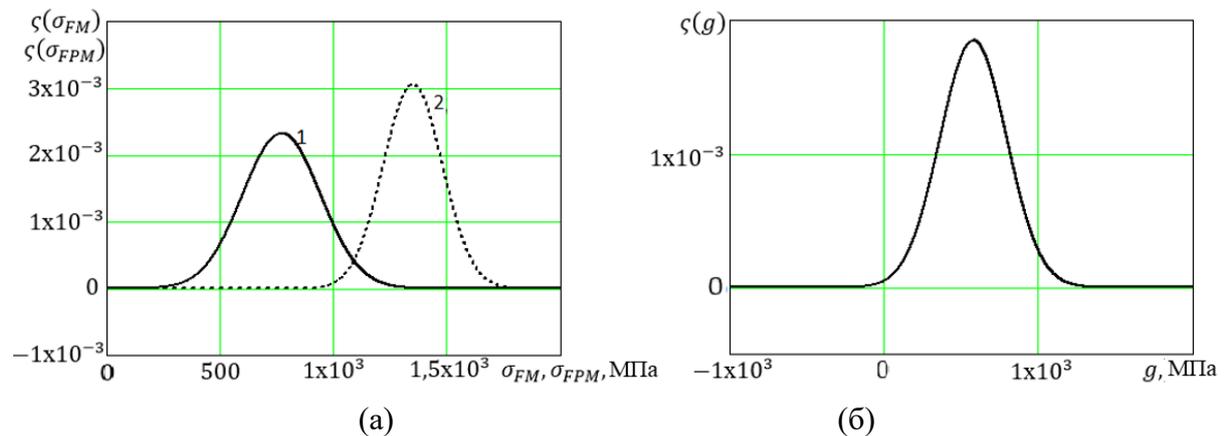


Рис. 2. Плотности распределения СВ при расчете зубчато-реечной передачи на изгибную прочность:  $\sigma_{FM}$  (кривая 1) и  $\sigma_{FPM}$  (кривая 2) при выпуклой траектории движения пильной рамы для прямых зубьев (а);  $g = \sigma_{FPM} - \sigma_{FM}$  (б)

Согласно критерию максимальных изгибных напряжений, из партии в 1 тыс. шт. в приводе горизонтальной подачи дискового станка Giga 3500 у 4 зубчатых колес будет наблюдаться отказ от действия максимальных нагрузок, т.е. вероятность безотказной работы зубчато-реечной передачи  $P(\sigma_{FPM} > \sigma_{FM})$  по данному критерию составит 99,6 %.

Чтобы определить зависимость вероятности  $P(m)$  безотказной работы при изгибной усталости от модуля по критерию усталости зубчато-реечной передачи горизонтальной подачи дискового станка Giga 3500, необходимо применить значение модуля зубьев  $m$  в качестве переменной в формуле расчета напряжений изгиба на переходной поверхности зуба передачи с прямым профилем [6]. У станка Giga 3500 применяются зубья  $m = 6$  мм (рис. 3а). Чтобы узнать зависимость вероятности работы при изгибной усталости  $P(b_w)$  от модуля, необходимо ширину зубчатой передачи  $b_w$  принять за переменную величину. У станка Giga 3500 ширина зубчатой передачи составляет 60 мм (рис. 3б).

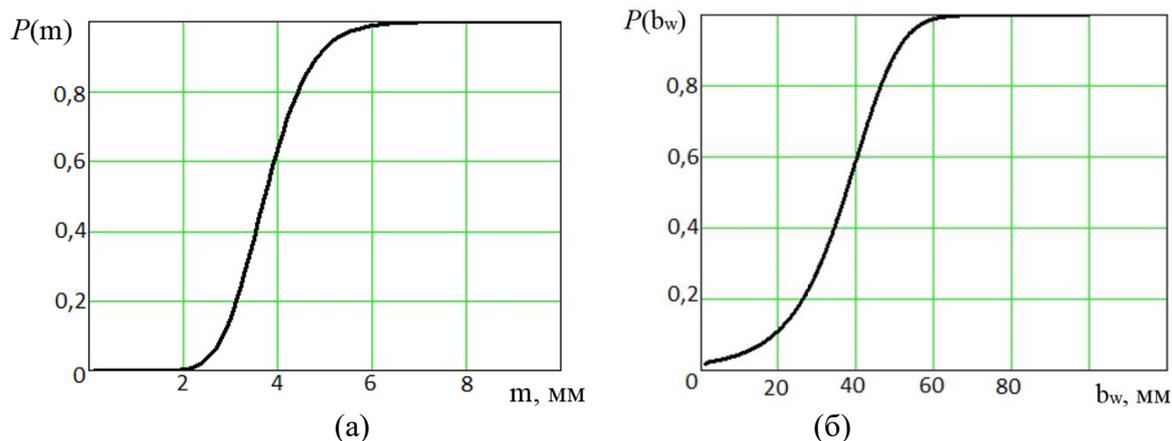


Рис. 3. График зависимости вероятности безотказной работы на изгибную усталость зубьев зубчато-реечной передачи станка Giga 3500: от модуля  $P(m)$  (а) и от ширины зубчатой передачи  $P(b_w)$  (б)

Если в качестве переменной величины взять начальный диаметр шестерни  $d_1$ , то можно определить зависимость вероятности безотказной работы при изгибной усталости от модуля  $P(d_1)$  [5]. У станка Giga 3500 применяются зубья с  $d_1 = 120$  мм (рис. 4а).

Чтобы определить зависимость вероятности безотказной работы  $P(m)$  от модуля при максимальной нагрузке дискового станка Giga 3500 по критерию прочности, необходимо в формуле расчета напряжений изгиба на переходной поверхности зуба передачи с прямым профилем применить в качестве переменной величины модуль зубьев  $m = 6$  мм. График данной зависимости представлен на рис. 4б.

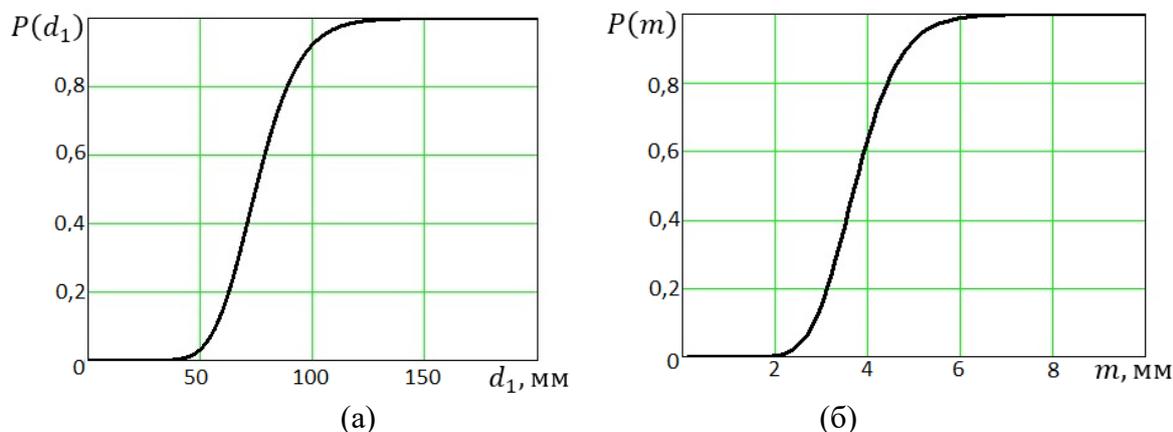


Рис. 4. График зависимости вероятности безотказной работы на изгибную усталость зубьев зубчато-реечной передачи станка Giga 3500: от начального диаметра шестерни  $P(d_1)$  (а) и от модуля  $P(m)$  (б)

Согласно проведенным расчетам прочности зубчато-реечной передачи, можно сделать вывод о надежном функционировании рабочих звеньев привода горизонтальной подачи, однако данные расчеты не отражают в полной мере причину частых отказов зубчато-реечной передачи. Поэтому для того чтобы сформировать более целостное представление о причинах частых поломок, следует проводить вероятностно-прочностные расчеты деталей [8].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фактором, снижающим надежность однодисковых станков Giga 3500, является высокоабразивная агрессивная среда, характеризующаяся наличием большого количества используемой воды и продуктов распила. Из-за больших нагрузок в элементах передаточных звеньев возникают сильные напряжения, приводящие к частым отказам деталей и узлов [9]. Прочностные расчеты зубьев зубчато-реечной передачи привода горизонтальной подачи алмазного диска (по критерию усталости и максимальной нагрузки) показали, что поломки могут происходить вследствие возникновения больших изгибных напряжений. Разработанные вероятностные расчеты позволяют определить оптимальные для безотказной работы деталей и узлов прочностные и геометрические параметры зубчато-реечных передач однодискового камнераспиловочного станка с большим диаметром исполнительного органа в условиях высокоабразивной среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гетопанов В.Н., Жура В.П., Секретов М.В. Определение безотказности элементов горных машин при произвольных законах распределения их прочности и действующей нагрузки // *Горная техника на пороге XXI века*. М.: МГГУ, 1996, С. 289–295.
2. Секретов М.В. Способ ударного распиливания горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. Вып. 9. С. 81–89.
3. Секретов М.В., Губанов С.Г. Экспериментальное исследование нагрузок в приводе вертикальной подачи пыльной рамы штрипсового станка // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. Вып. 1. С. 154–161.
4. Gerike V.L., Klishin V.I., Gerike P.B. A new index of rock-breaking tool efficiency // *Journal of Mining Science*. 2016. V. 52. № 3. P. 481–486.
5. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. Современные технологические схемы добычи блочного высокопрочного камня // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. Вып. 3. С. 5–11.
6. Синельников О.Б. Добыча природного облицовочного камня. М.: РАСХН, 2005. 245 с.
7. Сычев Ю.И., Берлин Ю.Я., Шалаев И.Я. Оборудование для распиловки камня. Л.: Стройиздат, 1983. 288 с.
8. Gabov V.V., Zadkov D.A. Mathematical model of simple spalling formation during coal cutting with extracting machine // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1015. № 5. P. 052007.
9. Смирнов А.Г., Бакка Н.Т., Биржишкис И.С., Кузьменко А.Х., Сачков Л.С., Грачев В.Д., Дягтеренко Н.В., Зубко В.Ф. Добыча и обработка природного камня. М.: Недра, 1990. 445 с.

**Для цитирования:** Пецык А.А., Секретов М.В. Вероятностное распределение нагрузки и прочности деталей дискового распиловочного станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 1 (9). С. 48–55.

## PROBABLE DISTRIBUTION OF LOAD AND STRENGTH OF PARTS FOR DISC SAWING MACHINE

A.A. PETSZYK, Postgraduate, M.V. SECRETOV, Cand. Sc.

National research technological university "MISIS", 4, Leninsky Prospekt,  
119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: alextir97@gmail.com

The paper considers the issues of reliability of stone sawing machines using the example of a diamond disk machine. With the help of the probabilistic strength calculations carried out in the work, the main optimal geometric parameters of the gear-rack drive of the disk machine were found: modulus, diameter, width - and it was determined that the resulting operating stresses are very sensitive to changes in the listed geometric parameters. On the basis of the calculated data, graphs of dependencies were built, showing the significance and necessity of using probabilistic calculations, in order to determine the degree of influence of the parameters of the rack and pinion transmission of the disk machine on bending fatigue.

*Keywords:* stone sawing machine, probability distribution, random variables, rack and pinion transmission.

### REFERENCES

1. Getopanov V.N., Zhura V.P., Secrets M.V. Determination of the reliability of the elements of mining machines under arbitrary laws of distribution of their strength and operating load. *Mining Engineering on the Threshold of the XXI Century*. Moscow: MGGU. 1996, pp. 289–295. (In Russian).
2. Secretov M.V. Method of impact sawing of rocks. *Mining information and analytical bulletin*. 2018. Is. 9, pp. 81–89. (In Russian).
3. Secretov M.V., Gubanov S.G. Experimental study of loads in the vertical feed drive of the saw frame of a strip machine. *Mining information and analytical bulletin*. 2019. Is. 1, pp. 154–161. (In Russian).
4. Gerike B.L., Klishin V.I., Gerike P.B. A new index of rock-breaking tool efficiency. *Journal of Mining Science*, 2016, V. 52, No. 3, pp. 481–486.
5. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. Modern technological schemes for the extraction of high-strength block stone. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2015. Is. 3, pp. 5–11. (In Russian).
6. Sinelnikov O.B. *Dobycha prirodnogo oblitsovochnogo kamnya* [Extraction of natural facing stone]. Moscow: RASKHN, 2005. 245 p.
7. Sychev Yu.I., Berlin Yu.Ya., Shalaev I.Ya. *Oborudovaniye dlya raspilovki kamnya* [Equipment for cutting stone]. Leningrad: Stroyizdat, 1983. 288 p.
8. Gabov V.V., Zadkov D.A. Mathematical model of simple spalling formation during coal cutting with extracting machine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, V. 1015, Is. 5, pp. 052007.
9. Smirnov A.G., Bakka N.T., Birzhishkis I.S., Kuzmenko A.Kh., Sachkov L.S., Grachev V.D., Dyagterenko N.V., Zubko V.F. *Dobycha i obrabotka prirodnogo kamnya* [Extraction and processing of natural stone]. Moscow: Nedra, 1990. 445 p.

Поступила в редакцию/received: 14.10.2020; после рецензирования/revised: 23.12.2020;  
принята/accepted 28.12.2020

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

Н.Д. ХАРИТОНОВ, аспирант, С.Г. ГУБАНОВ, канд. техн. наук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
119991, Москва, Ленинский пр-т, 4, e-mail: cool-kolya@mail.ru

© Харитонов Н.Д., Губанов С.Г., 2021

Рассмотрен вопрос нахождения оптимального угла проникновения ковша в породу в гидравлическом экскаваторе. Исследование проведено с использованием технологии 3D-моделирования и симуляции с помощью программного обеспечения Autodesk Inventor. Для выполнения расчетов была создана модель рабочего органа экскаватора. Итоговым результатом исследования стали графические данные, на которых показано изменение угла проникновения ковша в зависимости от углов отклонения рабочей стрелы, что позволяет сделать вывод о рациональном угле отклонения, при котором возможно уменьшить рабочий цикл экскаватора. Учитывая человеческий фактор и неполную автономность рабочего цикла экскаватора, данное исследование в большей степени применимо к автоматизированной выемке грунтов.

*Ключевые слова:* гидравлический экскаватор, моделирование, расчет и симуляция.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-56-63**

### ВВЕДЕНИЕ

Экскаваторы являются одними из наиболее широко используемых выемочно-погрузочных машин. В перечень работ, в которых участвуют экскаваторы, входят выемочные работы, добыча полезных ископаемых, рытье траншей, ям, фундаментов, погрузочно-разгрузочные работы, генеральная планировка, ландшафтный дизайн, удаление кустарника с помощью гидравлического оборудования, лесохозяйственные работы, снос и многие другие.

Гидравлические экскаваторы – оборудование, традиционно используемое на выработках и выемках полезного грунта, а также строительных площадках в течение большого периода времени. Основные задачи, выполняемые при помощи экскаватора, сводятся к выемке грунта и землеройным работам. Манипулятор, рабочий инструмент экскаватора, состоит из стрелы, гидравлического оборудования и ковша. Управление оборудованием осуществляется с помощью гидравлического привода, в то время как основной двигатель, обычно дизельный, подает питание на каждый из приводов.

Процесс рытья экскаватора можно разделить на три независимые операции: проникновение в почву, отделение и вторичное отделение, причем на каждом этапе определяется сопротивляемость почв и грунтов. Движение копания и сила, с которой производится давление, определяются на разных этапах процесса выемки [1].

Гидравлический экскаватор существенно отличается от канатных экскаваторов, прежде всего, он ограничен линейным уровнем срабатывания гидравлических цилиндров. Верхний рычаг экскаватора – его стрела помогает при перемещении материала, однако их перемещение не зависит друг от друга. С использованием новых технологий и систем моделирования можно получить реалистичную модель взаимодействия и нагрузок на рабочую систему экскаватора. При этом, используя полученные

результаты, можно определить оптимальную траекторию перемещения, а также вычислить рабочие параметры стрелы экскаватора.

Целью данной статьи является рассмотрение модели стрелы экскаватора, проведение и проверка ассимиляционных нагрузок, а также определение на основе полученных данных параметров вхождения ковша, как рабочего органа экскаватора, в грунты.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В схему строения гидравлического экскаватора входят приводная база и связанная с ней стрела, которая имеет насадку для земляных работ. Оператор экскаватора находится в небольшой кабине на платформе, откуда осуществляет управление платформой и рабочей стрелой. Гидравлическая система, как основная часть данного оборудования, необходима для приведения в действие рабочего органа экскаватора, а также для контроля ковша. В управлении экскаватора можно выделить следующие основные элементы [2]:

1. Управление движимой платформой. Система экскаватора использует дизельный двигатель, который производит большую рабочую мощность и при этом не зависит от тяжелых условий окружающей среды, таких как запыление. Двигатель приводит в движение систему перемещения экскаватора, в то время как гидравлическая система питает стрелу. Оператор управляет системой данной машины из кабины посредством системы педалей.

2. Управление стрелой экскаватора. Прямолинейный стержень экскаватора крепится к нижней части рамы, имеет несколько гидравлических поршней и состоит из двух движущихся частей и ковша для погрузки. Каждая секция подключена к другой части с помощью системы шарниров и поршней. Данная система необходима для выдвигания и расширения секции стрелы. Работает данная система так: первый поршень при выдвигании расширяет секцию, второй используется для увеличения площади охвата, тогда как последний поршень, присоединенный к ковшу, осуществляет перемещение ковша для упрощения выемки.

3. Вид движения экскаватора. Для перемещения машина имеет систему, схожую с танковой: две гусеницы помогают при перемещении назад и вперед, а также при повороте экскаватора относительно своей оси. Некоторые модели имеют поворотную платформу для вращения рабочей части.

При всех преимуществах экскаваторы ограничены углом наклона и направлением стрелы [3]. Из-за этого прилагаемая ими сила не используется на 100%. На управляемость и эффективность рабочих органов влияют многие факторы. Для улучшения параметров гидравлического экскаватора и успешного проведения анализа была создана точная модель, содержащая все описанные выше элементы перемещения. Для этого использовали программный набор Autodesk, в частности программу Inventor. Данная программа доступна для обучающихся в образовательных учреждениях и позволяет создавать объемные модели, а также проводить инженерную диагностику и симуляцию.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатом проделанной работы стала модель стрелы с ковшом и гидроцилиндрами (рис. 1). Для облегчения моделирования и проверки полученных результатов модель была разделена на три основных части – по три степени движения на всю стрелу. На рисунке рабочие зоны стрелы выделены красными линиями.

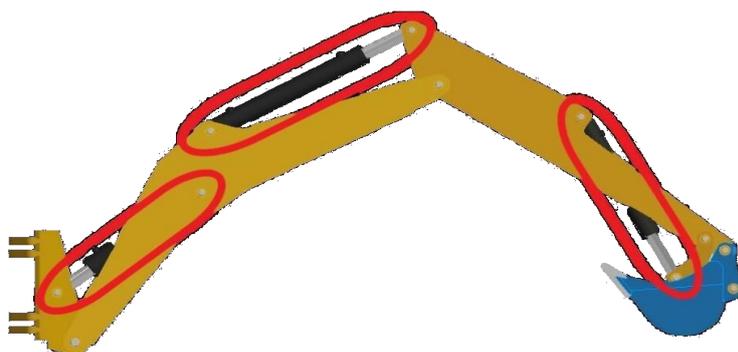


Рис. 1. Пространственная модель с выделенными рабочими зонами стрелы экскаватора

Упрощенная модель соединений в экскаваторе со всеми элементами показана на рис. 2. Введем обозначения:

точка 1 – соединение относительно первой и второй части стрелы – первый цилиндр. Принимая данную точку за начало отсчета, можно рассчитать направление для всех остальных элементов;

точка 2 – верхнее соединение относительно гидроцилиндра и середина всей системы;

точка 3 – соединение между основным выдвижным гидроцилиндром и двумя частями стрелы;

точка 4 – соединение ковша с центральной частью системы и конец стрелы.

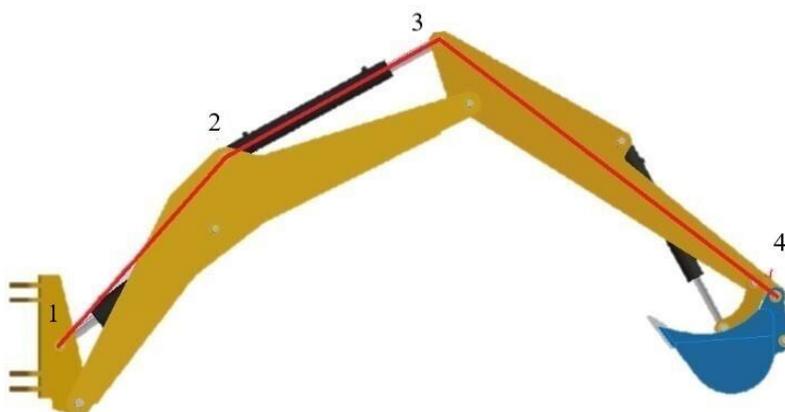


Рис. 2. Разметка упрощенной модели стрелы экскаватора

**Расчет упрощенной модели.** Для решения поставленных задач необходимо найти координаты каждой точки стрелы экскаватора.

Координаты точки 1 – (0:0), так как она принимается за начало координат. Отсчитывая систему от основной точки, получим координаты точки 2:

$$\begin{aligned} L_1 \cdot \cos \alpha_1 &= x_2 \\ L_1 \cdot \sin \alpha_1 &= y_2, \end{aligned}$$

где  $L_1$  – длина стрелы от точки 1 до точки 2,  $\alpha_1$  – угол отклонения прямой 1-2 от стрелы 1-2.

Координаты точки 3 равны:

$$\begin{aligned}x_2 + L_2 \cdot \sin \alpha_2 &= x_3 \\y_2 + L_2 \cdot \cos \alpha_2 &= y_3,\end{aligned}$$

где  $L_2$  – длина стрелы от точки 2 до точки 3,  $\alpha_2$  – угол отклонения прямой 2-3 от стрелы 2-3.

$$\alpha_2 = 180 - \alpha_1.$$

Учитывая данное соотношение, получаем:

$$\begin{aligned}x_2 + L_2 \cdot \sin(180 - \alpha_1) &= x_3, \\y_2 + L_2 \cdot \cos(180 - \alpha_1) &= y_3.\end{aligned}$$

Координаты точки 4 определяются относительно остальных координат, но для данного исследования их можно не находить. С помощью программного обеспечения Autodesk Inventor создадим и просчитаем модель рабочего органа экскаватора со всеми возможными степенями свободы (рис. 3). Данная модель доказывает, что выбранная методика вычисления является верной и покрывает все доступные степени свободы.

Используя программное обеспечение Autodesk Inventor, а именно систему поиска степеней свободы, можно обнаружить около 15 степеней свободы, которые нам необходимо проверить и отсортировать [4–5]. Проверая степени свободы, мы отсортировываем те, что зависят от дополнительных зацеплений. Обобщая и сокращая некоторые из степеней свободы, приходим к упрощенному варианту. На рис. 3 отображена упрощенная система для исследования зависимостей перемещения стрелы от углов поворота каждого элемента.

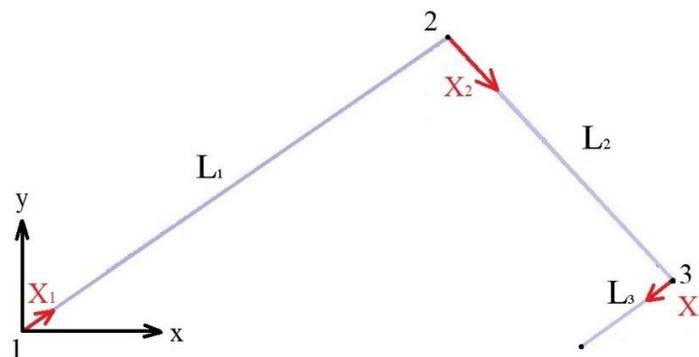


Рис. 3. Схема упрощенной модели стрелы экскаватора

Используя данные, полученные с помощью программы Inventor, можно выполнить симуляцию для проверки каждой точки на выявление погрешностей и поиска необходимых результатов.

Для запуска общей системы исследования установим ограничения в каждой точке:

- точка 1 – ограничение по углу в  $50^\circ$ ;
- точка 2 – ограничение по углу в  $60^\circ$ ;
- точка 3 – ограничение по углу в  $60^\circ$ .

Для расчета основных параметров были проведены проверки каждого соединения с  $0^\circ$  до конечной точки с шагом в  $30^\circ$  [4].

В качестве рассматриваемых параметров возьмем радиус оборота рабочей платформы относительно оси и угол соединения. Радиус оборота необходим для расчета оптимального времени для завершения цикла погрузки и выгрузки. Угол соединения – угол между точками 3 и 4 – необходим для расчета угла проникновения ковша в породу.

Глубина проникновения ковша – это расстояние от уровня стоянки экскаватора до зубьев ковша при копании ниже уровня стоянки. Стоянка находится ниже точки 1, расположенной на рис. 2. Глубина проникновения ковша –  $H_k$ . Угол проникновения  $\alpha_{пр}$  отображает угол между ковшом и породой и определяет усилие, которое ковш совершит на породу (рис. 4).

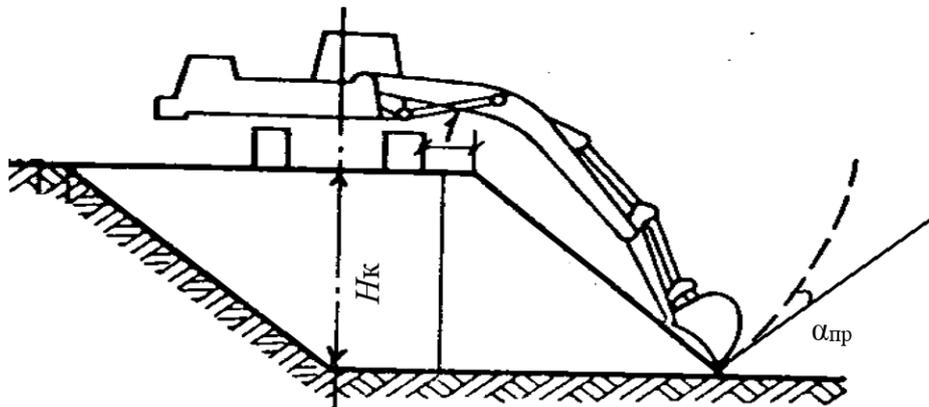


Рис. 4. Схема работы экскаватора

На основе схемы на рис. 4 проведем анализ рабочей системы. Изменяя углы поворота всех систем, находим взаимосвязи для обработки линейных параметров. На рис. 5(а), (б) представлена графическая взаимосвязь между углом отклонения каждого элемента и общим радиусом стрелы.

С помощью специальной программы при изучении необходимых степеней свободы и использовании нагрузки на данные элементы получено, что при определенных углах поворота и углах выдвижения оператор может экономить время для выполнения выемочных работ [5]. Из-за измененных углов поворота меняется и коэффициент проникновения, показывающий эффективность вхождения в породу. По графику на рис. 5(а) перемещения компонента стрелы 1-2 можно определить, какой угол поворота удобнее для перемещения между местом выемки и загружаемым средством [6]. На рис. 5(б), (в) показана зависимость между коэффициентом поворота ковша и проникновением в породу.

Исходя из анализа полученных данных, можно оптимизировать выемку грунтов, если угол входа ковша будет равен углу внутреннего трения грунтовой среды. Угол внутреннего трения – это угол, образованный свободной поверхностью рыхлой горной массы или иного сыпучего вещества с горизонтальной плоскостью. Предположив, что уровень земли всегда принимается равным нулю, можно рассчитать оптимальные линейные параметры для стрелы экскаватора, а также эффективный угол проникновения ковша в грунт. Из этого следует, что умножением угла входа или проникновения рабочего органа на эффективную проникающую способность грунта можно получить коэффициент проникновения для всех случаев длины стрелы и положения соединений.

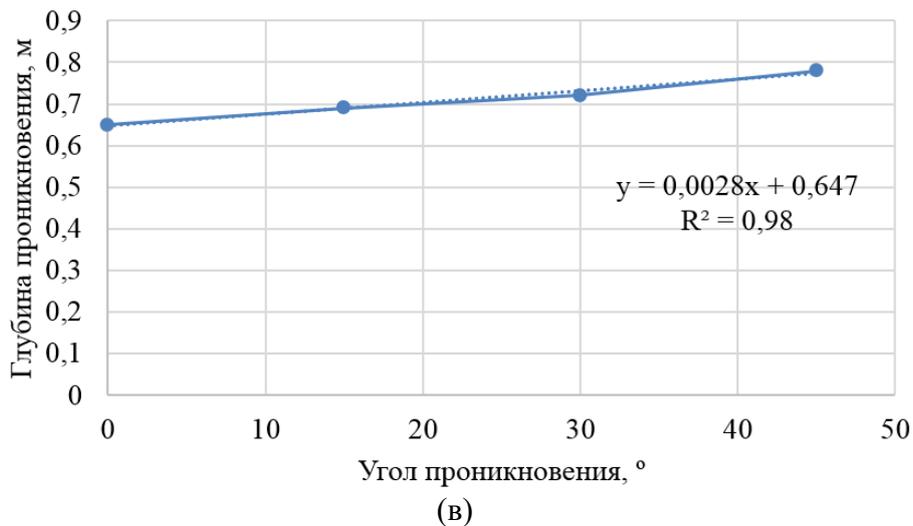
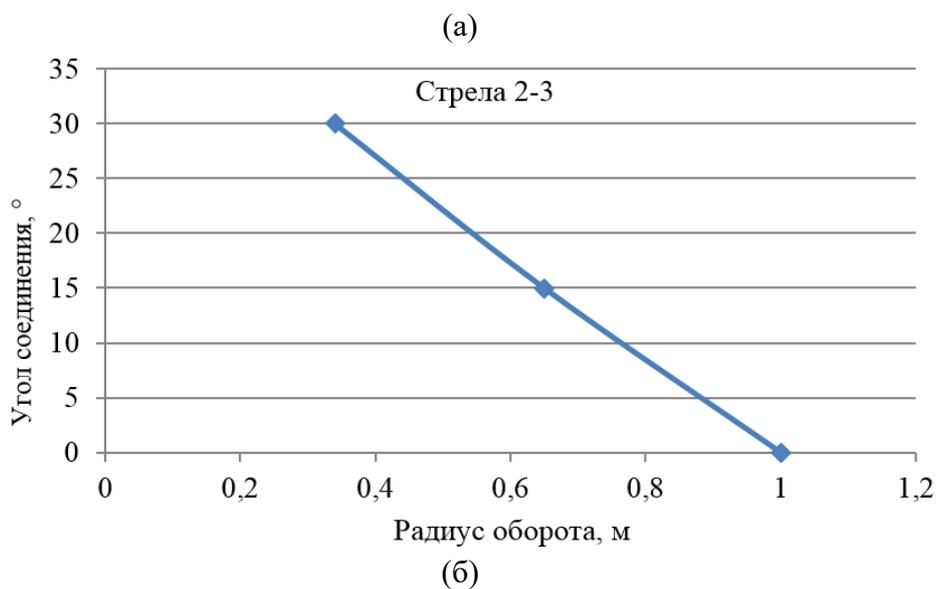


Рис. 5. Результаты теоретических исследований: зависимость угла соединения узлов стрелы от радиуса оборота от выемки (а), зависимости угла поворота стрелы от угла проникновения в породе (б) и (в)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при различных углах наклона стрелы существенно меняется глубина проникновения ковша в грунт. Однако из-за ограничений по виду, составу почвы, а также из-за нестабильных условий окружающей среды результаты исследований могут меняться. По результатам проведенных работ оптимальное положение ковша наблюдается только при положении стрелы параллельно земле, чего не может быть по условиям конструкции. Однако возможна разработка дополнительных моделей и проведение исследований с возможностью изменять как начальное положение машины, так и виды ковша и почв.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акинфиев А.А. Создание системы управления операцией копания для одноковшового гидравлического экскаватора с целью повышения эффективности его работы: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1983. 273 с.
2. Chacko V., Yu H., Cang S., Vladareanu L. State of the art in excavators // *Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. IEEE*, 2014. P. 481–488.
3. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines // *Automation in Construction*. 2016. V. 68. P. 212–222.
4. Gustafsson J. Orientation estimation of a rigid multi body system using accelerometers, gyroscopes and the geometry. Gothenburg: Department of Signal and Systems, Chalmers University of Technology, Master's Thesis EX035. 2014. 79 p.
5. Park B. Development of a virtual reality excavator simulator: A mathematical model of excavator digging and a calculation methodology: Doctoral dissertation. Virginia Tech, 2002.
6. Patel B.P., Prajapati J.M. A review on kinematics of hydraulic excavator's backhoe attachment // *International journal of engineering science and technology*. 2011. V. 3. № 3. P. 1990–1997.
7. Patel B. P., Prajapati J. M. Kinematics of mini hydraulic backhoe excavator – part II // *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*. 2013. V. 1. № 4. P. 261–282.

**Для цитирования:** Харитонов Н.Д, Губанов С.Г. Оптимизация гидравлического экскаватора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 56–63.

## OPTIMIZING A HYDRAULIC EXCAVATOR

N.D. KHARITONOV, Postgraduate, S.G. GUBANOV, Cand. Sc.

National research technological university "MISIS", 4, Leninsky Prospekt,  
119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: cool-kolya@mail.ru

The paper considers the issue of finding the optimal angle of penetration of the bucket into the rock in a hydraulic excavator. The study was carried out using 3D modeling and simulation technology using Autodesk Inventor software. For this, a model of the working body of the excavator was created, on which the calculations were made. The final result of the study was graphical dependencies, which show the change in the angle of penetration of the bucket from the angles of deflection of

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (9), 2021*

the working boom, which allows us to conclude about a rational angle of deflection at which it is possible to reduce the working cycle of the excavator. Given the human factor and the incomplete autonomy of the excavator's working cycle, this study is more applicable to automated excavation, which the modern engineering community is striving for.

*Keywords:* hydraulic excavator, modeling, calculation and simulation.

#### REFERENCES

1. Akinfiyev A.A. Creation of a control system for the digging operation for a single-bucket hydraulic excavator in order to increase its efficiency. Diss....cand. tech. sciences. Moscow, 1983. 273 p. (In Russian).
2. Chacko V., Yu H., Cang S., Vladareanu L. State of the art in excavators. *Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. IEEE*, 2014, pp. 481–488.
3. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*. 2016. V. 68, pp. 212–222.
4. Gustafsson J. Orientation estimation of a rigid multi body system using accelerometers, gyroscopes and the geometry. Gothenburg: Department of Signal and Systems, Chalmers University of Technology, Master's Thesis EX035. 2014. 79 p.
5. Park B. Development of a virtual reality excavator simulator: A mathematical model of excavator digging and a calculation methodology: Doctoral dissertation. Virginia Tech, 2002.
6. Patel B.P., Prajapati J.M. A review on kinematics of hydraulic excavator's backhoe attachment. *International journal of engineering science and technology*. 2011. V. 3. No. 3, pp. 1990–1997.
7. Patel B. P., Prajapati J. M. Kinematics of mini hydraulic backhoe excavator – part II. *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*. 2013. V. 1. No. 4, pp. 261–282.

Поступила в редакцию/received: 25.10.2020; после рецензирования/revised: 23.12.2020;  
принята/accepted 28.12.2020

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.032.26

## АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ГИПЕРПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Г.А. ЗУБКОВ, научный сотрудник

Главный испытательный космический центр Министерства обороны Российской Федерации им. Г.С. Титова, 143090, Краснознаменск, Московская область, ул. Октябрьская, д. 3, e-mail: GeorgyZubkov@mail.ru

© Зубков Г.А., 2021

Статья посвящена разработке алгоритма оптимизации гиперпараметров многослойного перцептрона для обучения алгоритма прямого распространения, который решает задачу прогнозирования технического состояния космического аппарата. Актуальность прогнозирования состояния космических аппаратов обусловлена возрастающим уровнем сложности задач, выполняемых сектором анализа центра управления полетом. Предложенный алгоритм включает в себя определение эмпирического распределения значений гиперпараметров со случайным поиском значений из этого распределения, а также проведение дальнейшего поиска значений гиперпараметров модели на сетке. Данный алгоритм позволил существенно сократить время нахождения оптимальных гиперпараметров по сравнению с остальными методами поиска гиперпараметров. Качественная оценка производилась путем сравнения итогового времени нахождения гиперпараметров с использованием алгоритма и применением иных методов.

*Ключевые слова:* нейронная сеть, многослойный перцептрон, гиперпараметры, оптимизация, космический аппарат, машинное обучение, поиск на сетке.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-64-70**

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из решаемых задач в проектировании нейронных сетей является настройка и оптимизация гиперпараметров модели. Гиперпараметры, т.е. параметры, устанавливаемые перед обучением нейронной сети, не изменяются в течение всего процесса обучения перцептрона.

В различных прикладных пакетах программ гиперпараметры, количество которых может варьироваться от 10 до 50, условно разделены на две категории. К первой относятся гиперпараметры, влияющие на время работы алгоритма и потребление памяти вычислительной машины, ко второй – влияющие на качество получаемой модели и на ее способность максимально точно прогнозировать конечный результат при предъявлении новых примеров. Тем самым возникает противоречие между улучшением одной из категорий параметров и ухудшением другой.

Целью данной работы является разработка алгоритма, позволяющего минимизировать ошибку обобщения модели при ограниченных ресурсах памяти ЭВМ и времени обучения модели.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время существует несколько универсальных методов поиска оптимальных гиперпараметров персептрона: ручная настройка и автоматический поиск, включающий в себя случайный поиск и поиск значений гиперпараметров на сетке значений. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки [1].

Для эффективного ручного поиска следует понимать связи между гиперпараметрами, скоростью обучения, расходом вычислительных ресурсов и ошибкой обучения, следовательно, необходимо понимание фундаментальных основ функционирования нейронных сетей.

Основной задачей обучения многослойного персептрона является минимизация функции ошибки прогнозирования. График обобщения ошибки, как правило, принимает вид U-образной кривой, на одном конце которой значение гиперпараметров соответствует низкой емкости алгоритма и высокой ошибке обобщения, а на другом – высокой емкости алгоритма и высокому значению ошибки обобщения. Данные явления носят названия недообучения и переобучения алгоритма соответственно (рис. 1) [2].

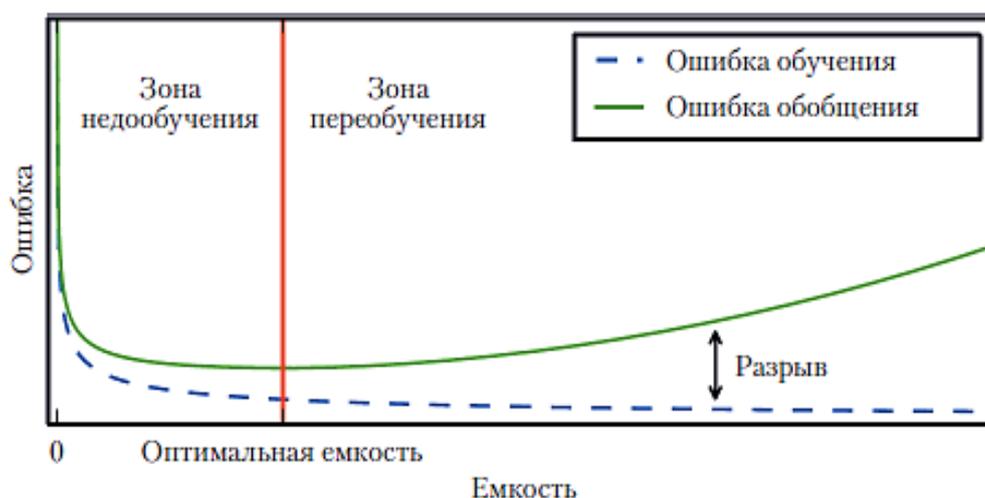


Рис. 1. Зависимость ошибки обучения от эффективной емкости модели [1]

Не все гиперпараметры принимают значения, лежащие на U-образной кривой, часть из них являются бинарными или дискретными, которым соответствует всего несколько точек на U-образной кривой (например, параметры активации, различные переключатели, число блоков в слое и т.д.) [3].

В результате проведенных исследований было установлено, что одним из важнейших гиперпараметров является скорость обучения персептрона, которая оптимальна при максимальной емкости модели. Если скорость обучения слишком велика, то метод градиентного спуска увеличит ошибку обобщения алгоритма; если же скорость обучения слишком мала, то при обучении алгоритм может «застрять» и обучение не будет завершено. Скорость обучения имеет вид U-образной кривой, изображенной на рис. 2 [4].

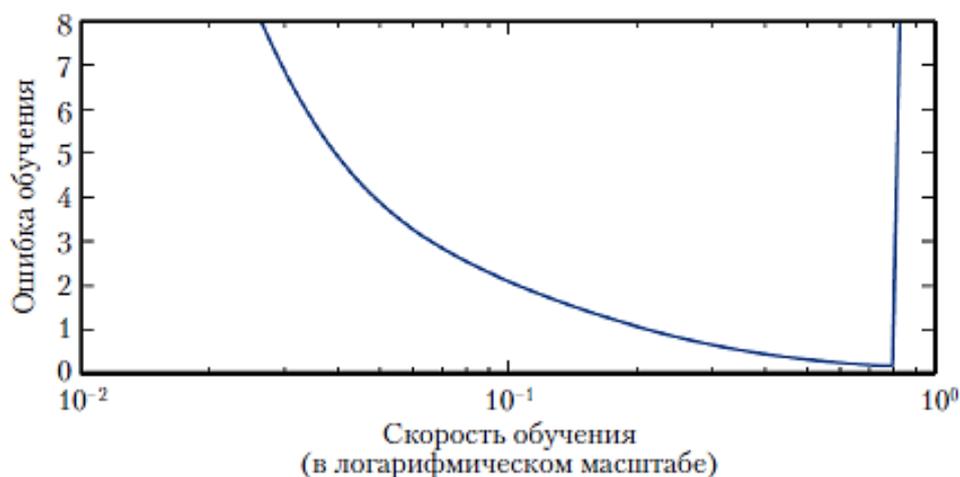


Рис. 2. Зависимость ошибки обучения от скорости обучения [4]

Необходимо помнить, что увеличение или уменьшение определенных параметров ведет к усложнению модели. Эффективная емкость модели ограничена тремя факторами: репрезентативной емкостью модели, способностью к минимизации функции стоимости алгоритма обучения, а также регуляризацией модели. Например, чем больше число слоев модели и число скрытых блоков в каждом слое, тем выше репрезентативная емкость. Однако она не сможет обучиться всем этим функциям, если алгоритм обучения не способен установить, что некоторые функции хорошо минимизируют стоимость, или если регуляризирующие члены, например снижение весов, запрещают использование некоторых функций [5].

В процессе ручной настройки гиперпараметров были обнаружены следующие зависимости:

- увеличение числа скрытых блоков и слоев ведет к увеличению времени работы алгоритма и вычислительных мощностей;

- оптимальная скорость обучения влечет за собой неизбежное увеличение репрезентативной емкости модели;

- увеличение ширины ядра модели слоев приводит к увеличению памяти для хранения параметров и увеличению времени работы алгоритма;

- кодировка категориальных переменных *one-hot*-кодированием ведет к увеличению репрезентативной емкости модели;

- снижение коэффициентов весов приводит к увеличению репрезентативной емкости модели [6, 7].

Основная рекомендация для ручного поиска связана с необходимостью отслеживания зависимости ошибки обучения и тестирования алгоритма при настройке гиперпараметров. Этого трудоемкого и длительного процесса можно избежать, применяя автоматический поиск гиперпараметров.

Одной из характерных особенностей случайного поиска является отсутствие конкретных значений гиперпараметров, что способствует изучению широких диапазонов значений гиперпараметров без расходования вычислительных ресурсов. Исследование применения случайного поиска показало, что случайный поиск экспоненциально эффективнее поиска на сетке, если присутствуют гиперпараметры, которые не оказывают существенного влияния на качество итоговой модели. Процедуру случайного поиска необходимо проводить несколько раз для уточнения значений, найденных на предыдущих шагах [8].

Если количество изменяемых гиперпараметров модели меньше десяти, часто применяют процедуру поиска значений гиперпараметров на сетке. В данном случае разработчик выбирает конечное множество потенциальных значений гиперпараметров. Как и в процедуре случайного поиска гиперпараметров, лучшими значениями считаются те, при которых значение ошибки обучения персептрона на контрольном наборе данных было минимальным [9].

Одна из важнейших задач в поиске на сетке – правильное определение потенциального множества значений гиперпараметров. Как правило, при поиске на сетке значения выбираются примерно в логарифмическом масштабе. Например, скорость обучения выбирается из множества  $\{0,1; 0,01; 0,001; 0,0001\}$ , число скрытых блоков – в слое  $\{20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000\}$  и так для остальных гиперпараметров. Если же наилучшим значением является экстремум данного массива, то следует задавать иной диапазон для нахождения лучшего значения гиперпараметра [10].

Существенной проблемой процедуры поиска значений гиперпараметров на сетке является экспоненциальный рост вычислительной стоимости при добавлении новых гиперпараметров. Если существует  $m$  гиперпараметров, принимающих значение  $n$ , то количество экспериментальных сеансов обучения растет как  $O(n^m)$ . Решением данной проблемы является распараллеливание процессов между серверами, графическими ядрами, а также применение облачных серверов, таких как *Google Colaboratory*.

Рассматриваемый алгоритм состоит из многократного случайного поиска и поиска на сетке значений гиперпараметров. Выполнение данных условий в конечном счете позволит улучшить качество обучения нейронной сети прямого распространения за приемлемое время и ресурсы ЭВМ. Особенностью разработанного алгоритма является сочетание положительных качеств как случайного поиска гиперпараметров, так и поиска на сетке. Предлагаемый алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Задаем маргинальное распределение отдельных гиперпараметров. Для категориальных и бинарных параметров задается распределение Бернулли, для остальных гиперпараметров – логнормальное распределение. Распределение гиперпараметра, характеризующего количество скрытых блоков в каждом слое, приведено ниже:

$$\log\_number\_of\_hidden\_units \sim u(\log(50), \log(2000)), \quad (1)$$

где  $u(\log(50), \log(2000))$  – выборка из равномерного распределения в интервале  $[50, 2000]$ .

2. Проводим процедуру случайного поиска.
3. Повторяем шаг 2 от 500 до 1 000 раз для проверки предположения и формирования значений, используемых для поиска на сетке.
4. Учитывая ограничения на увеличение репрезентативной емкости модели, формируем вектор из значений гиперпараметров для дальнейшего обучения многослойного персептрона на сетке значений параметров.
5. Проводим процедуру поиска значений гиперпараметров на сетке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение данного алгоритма позволило существенно сократить временные затраты при поиске оптимального значения гиперпараметров модели на основе многослойного персептрона прямого распространения по сравнению с другими методами (таблица).

### Результаты применения различных методов поиска гиперпараметров

Метод поиска	Время поиска гиперпараметров, мин, для повышения точности модели с 67 до 81 %
Ручной поиск значений	63
Случайный поиск	22
Поиск на сетке значений	26
Поиск при помощи алгоритма	11

Результатом проведенного исследования является разработка алгоритма оптимизации гиперпараметров для обучения многослойного персептрона (рис. 3).

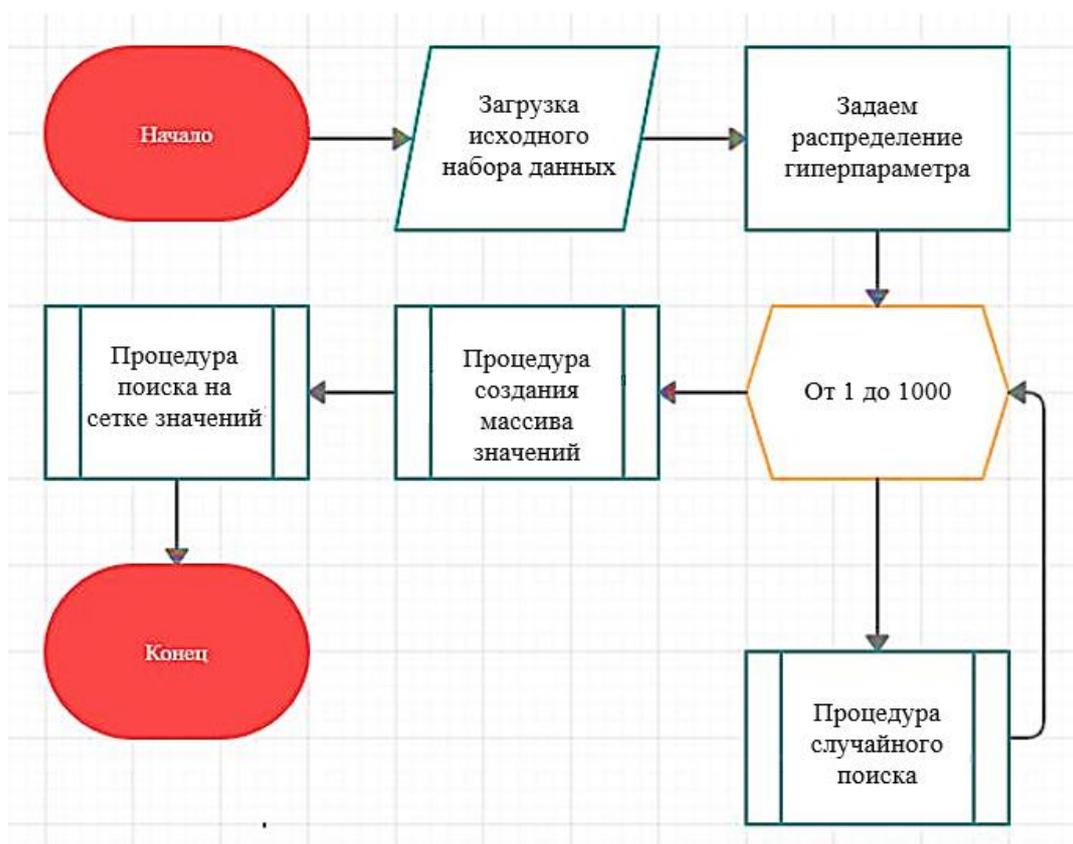


Рис. 3. Алгоритм оптимизации гиперпараметров многослойного персептрона

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяя данный алгоритм для оптимизации гиперпараметров многослойного персептрона, удалось ускорить получение гиперпараметров для получения заданной точности прогнозирования технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов. Полученные результаты должны быть учтены при разработке математической модели интеллектуальной системы анализа телеметрической информации. Данная интеллектуальная система может быть положена в основу разрабатываемого аппаратно-программного комплекса, который позволит в полной мере оптимизировать

процесс анализа статистической информации в секторе анализа центра управления полетом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с.
2. Беркинблит М.Б. Нейронные сети. М.: Моск. институт развития образоват. систем, 1993. 95 с.
3. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект. М.: Академия, 2005. 176 с.
4. Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization // *The Journal of Machine Learning Research*. 2012. V. 13. № 1. P. 281–305.
5. Bergstra J.S., Bardenet R., Bengio Y., Kégl B. Algorithms for hyper-parameter optimization // *Advances in neural information processing systems*. 2011. P. 2546–2554.
6. Staudte R.G., Sheather S.J. Robust estimation and testing. New York: Wiley, 1990.
7. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики: перцептроны и теория механизмов мозга. М.: Мир, 1965. 480 с.
8. Раднаев Ч.Б. Оптимизация гиперпараметров сверточной нейронной сети. // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2017. С. 81–82.
9. Флах П. Машинное обучение. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.
10. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Институт математики, 1999. 268 с.

**Для цитирования:** Зубков Г.А. Алгоритм оптимизации гиперпараметров многослойного перцептрона для решения задачи прогнозирования технического состояния космического аппарата // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 64–70.

#### **ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE HYPERPARAMETERS OF A MULTILAYER PERSEPTRON FOR SOLVING THE PROBLEM OF PREDICTING THE TECHNICAL STATE OF A SPACE VEHICLE**

G.A. ZUBKOV, Researcher

Main test space center of the Ministry of Defense of the Russian Federation  
named after G.S. Titov, 143090, Krasnoznamensk, Moscow region,  
Oktyabrskaya st. 3, e-mail: GeorgyZubkov@mail.ru

The article is devoted to the development of an algorithm for optimizing the hyperparameters of a multilayer perceptron for training the feedforward algorithm, which solves the problem of predicting the technical state of a spacecraft. The relevance of predicting the state of spacecraft is due to the increasing level of complexity of the tasks performed by the analysis sector of the mission control center. The proposed algorithm includes the determination of the empirical distribution of hyperparameter values with a random search for values from this distribution, as well as further search for the values of the model hyperparameters on the grid. The use of this algorithm made it possible to significantly reduce the time for finding the optimal hyperparameters in comparison with

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (9), 2021*

other methods of searching for hyperparameters. A qualitative assessment was made by comparing the total time of finding the hyperparameters using the algorithm and using other methods.

*Keywords:* neural network, multilayer perceptron, hyperparameters, optimization, spacecraft, machine learning, grid search.

#### REFERENCES

1. Goodfellow J., Benjio I., Courville A. Glubokoye obucheniye [Deep learning] / per. s angl. A.A. Slinkina. Moscow: DMK Press, 2018. 652 p.
2. Berkinblit M.B. Neyronnyye seti [Neural networks]. Moscow: Mosk. institut razvitiya obrazovat. sistem, 1993. 95 p.
3. Yasnitsky L.N. Vvedeniye v iskusstvennyy intellekt. [Introduction to artificial intelligence]. Moscow: Akademiya, 2005. 176 p.
4. Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization. *The Journal of Machine Learning Research*. 2012. V. 13. No. 1, pp. 281–305.
5. Bergstra J.S., Bardenet R., Bengio Y., Kégl B. Algorithms for hyper-parameter optimization. *Advances in neural information processing systems*. 2011, pp. 2546–2554.
6. Staudte R.G., Sheather S.J. Robust estimation and testing. New York: Wiley. 1990.
7. Rozenblatt F. Printsipy neyrodinamiki: pertseptrony i teoriya mekhanizmov mozga [Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms]. Moscow: Mir, 1965. 480 p.
8. Radnayeв Ch.B. Optimization of hyperparameters of a convolutional neural network. *Youth and modern information technologies: collection of works of the XV International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientist*. Tomsk: izd-vo TPU, 2017, pp. 81–82. (In Russian).
9. Flakh P. Mashinnoye obucheniye [Machine learning]. Moscow: DMK Press, 2015. 400 p.
10. Zagoruyko N.G. Prikladnyye metody analiza dannykh i znaniy [Applied methods of data and knowledge analysis]. Novosibirsk: Izd-vo instituta matematiki, 1999. 268 p.

Поступила в редакцию/received: 9.10.2020; после рецензирования/revised: 30.10.2020;  
принята/accepted 27.11.2020

## ОСОБЕННОСТИ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ MICROMINE

Т.Б. ЯКОНОВСКАЯ, канд. экон. наук, А.И. ЖИГУЛЬСКАЯ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: tby81@yandex.ru

© Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., 2021

Одной из важнейших задач, имеющих первостепенное значение для проектирования торфодобывающего предприятия, является построение информационной модели торфяного массива. В статье представлен результат моделирования торфяного месторождения в горной геоинформационной среде (ГИС) Micromine с использованием системных подходов к обработке геологической информации различных торфяных школ. В результате моделирования по данным детальной разведки было получено три варианта геологической модели торфяного месторождения «Ольчское». В заключении приведены следующие основные выводы: в настоящее время для горных предприятий разработан широкий спектр пакетов прикладных программ; системные принципы, заложенные в программное обеспечение одинаковы, но адаптация горных геоинформационных систем для целей конкретного добывающего предприятия требует больших затрат времени; в зависимости от заложенных теоретических и системных принципов при информационном описании торфяного месторождения созданные 3d-модели будут существенно отличаться.

*Ключевые слова:* геоинформационные системы, моделирование месторождений, 3d-модель, научные торфяные школы, Micromine.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-71-85**

### ВВЕДЕНИЕ

В «Прогнозе долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года» в качестве одного из трендов инновационного развития экономики значится внедрение информационных технологий во все сферы национального хозяйства, в том числе и в добывающую отрасль, которая является движущей силой и фундаментом долгосрочной экономической устойчивости. В связи с этим при проектировании экономически эффективного, рационального и устойчивого развития добывающего сектора экономики все чаще используются многофункциональные и проблемно-ориентированные горные геоинформационные системы (ГИС), которые позволяют ускорить процесс принятия инженерно-экономических и организационно-управленческих решений. Для проектирования различных производственных процессов на предприятиях добывающей отрасли при эксплуатации месторождений используется весьма разнообразное программное обеспечение. Однако, несмотря на большой спектр ГИС, в качестве главного их недостатка следует отметить высокую стоимость. К тому же использование таких систем применительно к определенным условиям конкретных добывающих предприятий требует их существенной доработки. Как правило, дорогостоящими являются многофункциональные и активно используемые ГИС, которые вступили в стадию поддержки разработанного набора функций. Такие ГИС интегрированы в различные бизнес-процессы добывающих предприятий. В сегменте относительно дешевого программного обеспечения

ГИС выполняют ограниченный набор функций и не всегда отвечают требованиям конкретного добывающего предприятия [1–5].

Геоинформационный подход позволяет использовать большой объем различной исходной информации, создавая условия для принятия экономически эффективных и технически целесообразных инженерных и управленческих решений. При этом снижается трудоемкость и повышается скорость подготовки данных для разработки информационных систем, что является условием для их практического применения. Поэтому при проектировании предприятия по добыче торфа первостепенное значение приобретают ГИС, которые позволяют разработать геологическую 3d-модель торфяного месторождения. Такая модель должна адекватно отражать главные качественные характеристики торфяной залежи, промышленные запасы, категории сырья и ассортимент торфяной продукции. Модель позволяет управлять запасами на стадиях жизненного цикла месторождения (поиск, разведка, разработка), а также организует информационно-геологическое обеспечение разработки месторождения на этапах его промышленного освоения.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БАЗА ИССЛЕДОВАНИЯ**

В практике проектирования торфодобывающих предприятий используется совокупность пакетов прикладных программ для широкого спектра горно-производственных и организационно-управленческих процессов: геологического исследования, горного планирования, маркшейдерии, технико-экономического обоснования и др. При автоматизации проектирования торфодобывающего производства объектами геоматематического моделирования являются:

- торфяной массив, представляющий собой совокупность горизонталей поверхности, линий зондировочной сети, отметки уровня грунтовых вод, в пределах которых условно выделены контуры типов торфяной залежи;

- рельеф и абрис участка местности, в границах которого располагаются горный отвод и торфяной карьер;

- каналы осушительной и противопожарной сети;

- сеть технологических площадок, выработанные торфяные участки;

- отвалы древесных отходов, насыпи, отстойник, водохранилище и прочие техногенные образования, различные сооружения;

- транспортные коммуникации;

- зоны воздействия на окружающую среду;

- зоны ограничения, за пределами которых возникают различного рода нарушения лицензии на право разработки и т.д.

Источниками первичной исходной информации для геомоделирования объектов торфодобывающих производств служат геологические, топографические и гипсометрические планы, вертикальные и горизонтальные стратиграфические сечения, данные опробования геологоразведки, аэрофотосъемки. Этот блок инженерно-геологической информации следует правильно интерпретировать, что не всегда возможно адекватно описать математическим языком. Проще всего преобразовать в геоматематическую модель геологические планы и профили, однако следует учитывать их достоверность и точность [1, 5].

Геологические модели в ГИС должны удовлетворять следующим требованиям:

- высокая детальность;

- возможность выполнения технико-экономических расчетов;

- планирование экскавации всей торфяной залежи экономически целесообразным и эффективным способом;

- расчет величины прибыли, ренты и других финансовых параметров.

Рынок программного обеспечения для добывающего сектора представлен как отечественными, так и иностранными разработками. Наиболее распространенными ГИС являются K-Mine, Micromine, Surpac. Анализ характеристик этих систем показывает, что они не имеют существенных различий и разработаны для нужд нефтяных, рудных, угольных добывающих предприятий, которые, как правило, имеют свободные финансовые ресурсы для приобретения и эксплуатации такого программного обеспечения. Основопологающим различием рассматриваемых ГИС является набор их функциональных возможностей, которые особенно важны при моделировании пластовых месторождений, разрабатываемых открытым способом. От качества разработанной модели месторождения будут зависеть точность и оперативность инженерных, производственных и экономических решений тактического и стратегического характера. Ввиду этого, как самая надежная ГИС, Micromine по своему функциональному наполнению больше подходит для моделирования торфяных залежей. Кроме того, использование этого программного обеспечения дает возможность записывать скрипты как классы Python, с поддержкой наследования и улучшением качества и эксплуатации скрипта. Важно, что ГИС Micromine полностью совместима с Windows 7, 8, 10 [6].

### **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Для моделирования торфяного месторождения авторы использовали персональный компьютер с процессором Intel Core i5, ОС Windows, ГИС Micromine и данные детальной разведки торфяного месторождения. Исходная геологическая информация о торфяной залежи определяет требования к точности математической модели, выбор ее вида и сложности [7–9]. Алгоритм процесса разработки моделей геологической интерпретации данных торфяного массива представлен на рис. 1.

Процесс выбора модели торфяной залежи обоснован качеством исходной информации из первоисточников: картографией, геологическими исследованиями, стратиграфией и гипсометрией, геофизикой торфозалежи, послойным опробованием в точках зондирования. Эти первичные данные представляют собой достоверную информацию, однако математическое моделирование на их основе требует интерпретации геологических закономерностей, что в свою очередь является сложной математической задачей, так как точность значений, вычисленных по разработанной модели торфяного массива, должна быть идентична точности исходных данных. Специфика геоматематического моделирования торфяного месторождения обусловлена сложностью и неоднородностью его геологической структуры и условий образования. В то же время добычные процессы при отработке месторождения характеризуются изменчивостью во времени и пространстве, при этом сами качественные характеристики торфа также неоднородны как по глубине, так и по протяженности фронта торфодобычных работ. Данная особенность отражает сложность создания единого информационного массива для торфяного производства, которое имеет сложную структуру с иерархическими уровнями.

Однако если информацию различного вида представить в форме единичных показателей, привязанных в форме точек к координатам пространства и времени, то появляется возможность создать единый информационный массив [10–12]. Точка – это базовый элемент информационной системы в 3d-координатах, которая обладает набором качественных (геологических) характеристик торфа и координаты места расположения. Вектор показывает направление и дальность перемещения точки. Скорость перемещения точки и время характеризуют срок и длительность перемещения точки. Моделирование торфяных залежей основано на цифровом представлении граничащих друг с другом поверхностей между слоями торфа различного

типа, слоями погребенной древесины и подстилающим слоем минеральных пород. Базой геоматематических моделей является точечно-цифровая информация, а именно данные геологоразведки (зондирование и стратиграфия) торфяного массива. По такому дискретно-точечному принципу работают практически все геоматематические модели, заложенные в ГИС.



Рис. 1. Алгоритм разработки цифровой модели торфяного месторождения

Учитывая высокий уровень сложности моделирования торфяного массива, предлагается использовать дискретную модель. Дискретная модель универсальна, что имеет принципиальное значение для автоматизированного проектирования и в отличие от других моделей позволяет достигнуть высокой точности. Основой для построения дискретной модели торфяного месторождения являются данные зондирования и послойного опробования залежи. В качестве базы для построения объемной модели торфяного массива, в настоящей работе применяли зондировочную сеть, в которой каждой точке зондирования соответствуют декартовы координаты  $x$  и  $y$ , а каждому слою толщиной  $\Delta h$  присваивается порядковый номер от 1 (поверхность) до  $\frac{h_i}{\Delta h + 1}$  (где  $h_i$  – мощность торфяного массива в точке  $i$ ). Качественные характеристики по слоям торфяного массива в каждой точке зондирования предлагается определять методом интерполяции.

Объем всего торфяного месторождения разбивается на единичные объемы (блоки):

$$\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta h, \quad (1)$$

где  $x, y$  – шаги зондировочной сетки по осям  $x$  и  $y$ , причем

$$\Delta F = \Delta x \cdot \Delta y, \quad (2)$$

где  $\Delta F$  – площадь ячейки сети (элементарного блока).

Исходя из этого, появляется возможность вычислить площадь  $F_k$  и объем  $V_k$  по каждому слою промышленных запасов торфа с выделением торфяного сырья заданной категории (качества) или вида торфяной продукции:

$$F_k = \Delta F \cdot m_k; \quad V_k = \Delta V \cdot m_k, \quad (3)$$

где  $m_k$  – число блоков  $\Delta V$  с заданной категорией сырья или вида торфопродукции.

Суммируя объемы запасов в слоях по всем категориям, получим послойные объемы балансовых запасов. Суммированием объемов послойных запасов находим объем балансовых запасов по всему торфяному массиву.

Для решения задачи 3d-моделирования торфяного месторождения требуется разработать метод распознавания категории торфяного сырья по набору значений качественных характеристик параметров, таких как тип торфа, степень разложения, зольность, пнистость. Таким образом, необходимо разбить многомерное подмножество точек  $M \in R^n$  на классы. Размерность  $n$  множества  $R^n$  определяется числом параметров, характеризующих категорию сырья; число классов равно числу категорий торфяного сырья. Задача состоит в том, чтобы для каждого центра элементарного блока найти значения типа торфа, степени разложения, зольности, пнистости и т.д. В качестве элементарных блоков (единиц построения месторождения) авторами предложено использовать следующие параметры [13–15]:

глубина ( $h$ ) 0,25...0,5 м – глубина пластообразующего слоя, в котором встречаются остатки растений-торфообразователей, соответствующих определенному торфяно-болотному фитоценозу;

длина ( $x$ ) 100...500...1 000 м – шаг сети зондирования (зависит от площади месторождения и вида геологической разведки);

ширина ( $y$ ) 80...1 000 м, определяемая технологией разработки месторождения, а именно шириной технологической площадки или участка, на которой ведется добыча торфа.

Для последующих расчетов массы торфа необходимо также найти значения влажности. Отыскание параметра  $u_{ij}$  в  $i$ -м пункте и  $j$ -м горизонте производилось методом интерполяции в  $j$ -м от поверхности горизонта торфопласта. Основная трудоемкость этого метода вычисления состоит в автоматизированном отыскании интерполяционных узлов (ближайшего окружения  $i$ -го пункта). По формуле (3) можно вычислить дискретный признак (например, тип торфа, закодированный по определенному правилу), а результат вычисления округлить до целого. После распределения объема запасов по категориям торфяного сырья можно вычислить массу воздушно-сухого торфа каждого элементарного блока [6]:

$$\Delta M = \frac{\Delta V \cdot \rho \cdot (100 - \omega_g)}{(100 - \omega_y)}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность торфа;  $\omega_e, \omega_y$  – соответственно естественная и условная влажность торфа, %.

Суммированием масс элементарных блоков находим запас воздушно-сухого торфа по категориям сырья, по слоям и в целом по торфяному массиву. Среднее значение признака для заданной категории торфяного сырья рассчитывалось как средневзвешенное:

$$\bar{u}_k = \frac{\sum u_i \cdot \Delta M_i}{\sum \Delta M_i}, \quad (5)$$

где  $u_i$  – значение признака в  $i$ -м блоке;  $\Delta M_i$  – масса воздушно-сухого торфа в  $i$ -м блоке.

Объем расчетного слоя, тыс. м<sup>3</sup>, вычисляется по формуле

$$V_n = \frac{10 \cdot h \cdot (F_{ВИ} + F_{НИ})}{2}, \quad (6)$$

где  $h$  – толщина расчетного слоя, м;  $F_{ВИ}, F_{НИ}$  – площадки соответственно верхней и нижней изолинии расчетного слоя, га.

Таким образом, балансовые (промышленные) запасы торфа, тыс. м<sup>3</sup>, составляют

$$V_{\bar{o}} = \sum 10 \cdot F_n \cdot h_{cp} \quad V_{\bar{o}} = \sum 10 \cdot F_n \cdot h_{cp}, \quad (7)$$

где  $F_n$  – площадь отдельных стратиграфических или типовых участков торфяного массива в промышленной границе залегания торфа, га;  $h_{cp}$  – средняя глубина залежи торфа на участке, м.

На первом этапе моделирования торфяного месторождения для разработки базы данных торфоисследовательских работ необходимо закодировать все известное разнообразие торфяных месторождений для удобства работы с геологической информацией в ГИС. И уже на этой стадии среди ученых и специалистов в настоящее время отсутствует единое мнение. Текущее положение дел по вопросу моделирования торфяных месторождений с применением ГИС таково, что разработкой этой темы занимаются три научные торфяные школы: Уральская, Томская и Тверская. Представители Уральской научной школы (Александров Б.М., Гревцев Н.В., Егошина О.С.) предлагают кодировать все виды торфяных месторождений, взяв за основу известную геологическую классификацию торфа [9] (рис. 2). Такую идею кодировки видов торфа разработали представители Тверской школы (Базин Е.Т., Косов В.И.) еще в 1987 г. Детальное кодирование торфяного сырья по геологической классификации может привести к тому, что на месторождении не будет достаточного с экономической точки зрения объема запасов определенных категорий торфа, и тогда селективная добыча становится нецелесообразной.

Представители Томской научной школы (Бернатонис П.В., Борко Г.Ю., Инишева Л.И.) предлагают кодировать торфяники по известным категориям запасов А, В, С. При этом качество торфа в залежи усредняется и пропадает стимул к селективной отработке запасов [10].



Рис. 2. Фрагмент системы кодирования видов торфа (Уральская школа) [11]

Классическая и старейшая торфяная научная школа в настоящее время – это Тверская, представленная Базиным Е.Т., Лиштваном И.И., Косовым В.И., Макаренко Г.Л. и другими учеными, которые при моделировании торфяного месторождения для кодировки видов торфа используют ключевые качественные характеристики торфяного и торфодревесного сырья [8, 11, 12]. Это позволяет расширить структуру запасов торфяного месторождения, что обеспечивает точное соответствие геологическим данным и является фундаментом для геоинформационного моделирования торфяного массива (табл. 1).

Таблица 1. Теоретические подходы к кодированию и интерпретации торфяных ресурсов для разработки информационной модели торфяного массива

Научная школа	Основа кодирования видов торфа при моделировании месторождения	Пример кодирования
Уральская	Геологическая классификация видов торфа	Тип – подтип – группа – вид (см. рис. 2) Н 1-низинный, П 2-переходный, В 3-верховой
Томская	По категориям промышленных запасов торфа	Категории запасов торфа по степени изученности: А – 1.1; В – 1.2; С – 1.3
Тверская	Комплексная классификация ресурсов торфяного месторождения	Тип – пнистость – степень разложения – зольность – глубина залежи (рис. 3)



Рис. 3. Комплексная кодификация категорий торфяных ресурсов для построения геоинформационной модели торфяного месторождения

### РЕЗУЛЬТАТ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДИРОВОК ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ НАУЧНЫХ ШКОЛ В ГИС MICROMINE

В качестве образца для разработки 3d-модели торфяного массива было выбрано месторождение «Ольчешское», геологические данные по которому содержатся в Торфяном фонде 1955 г. Геологической особенностью торфяного массива «Ольчешское» является наличие двух маломощных горизонтов погребенной древесины (П – 1,3 %), поэтому для их построения использовался скрипт (рис. 4). Результаты информационного кодирования месторождения по различным школам приведены в табл. 2–4. На рис. 5 представлены результаты моделирования торфяного месторождения.

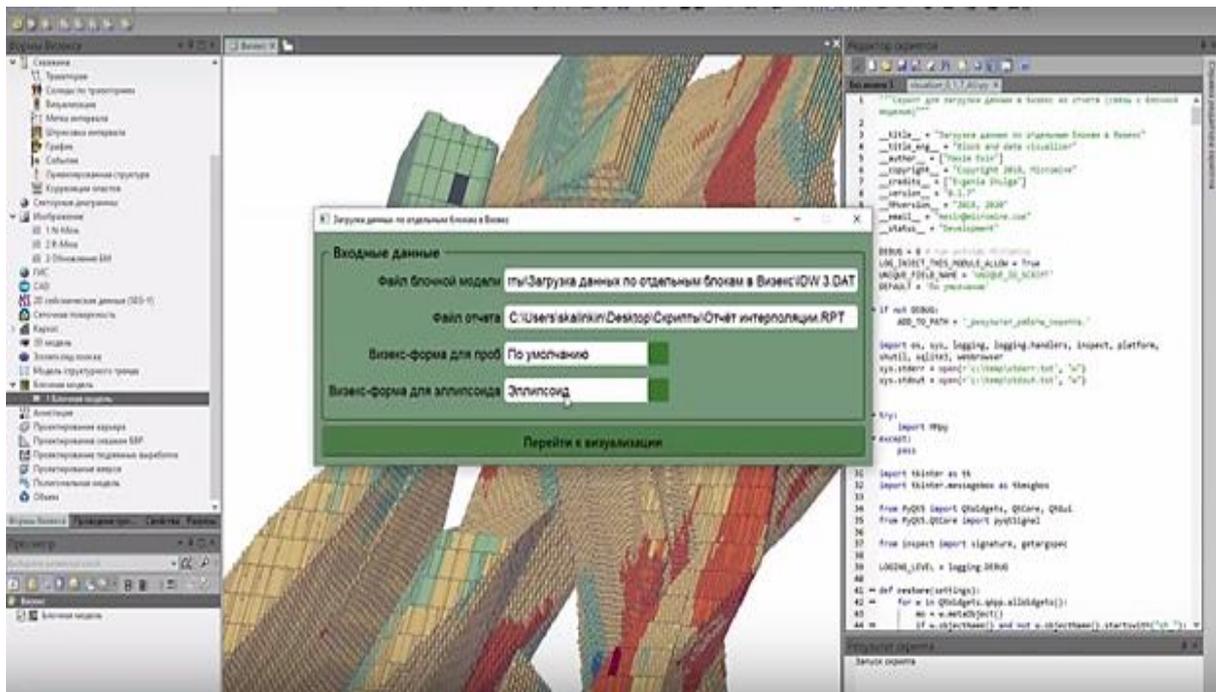


Рис. 4. Пример использования скрипта в Micromine

Таблица 2. Информационное кодирование месторождения «Ольчешское» в базе данных торфоисследовательских работ по стратиграфическим поперечникам, фрагмент (Уральская школа) [8]

Поперечник	Глубина, м	Степень разложения, %	Зольность, %	Влажность, %	Генетический код			Категория торфяного сырья
					Тип торфа	Подтип, группа	Подтип, группа, вид	
1/поп. 2	0,25	–	–	–	–	–	–	–
–	0,50	15,5	1,80	93,0	3,1101	3,11	3,1101	В-0-1
–	0,75	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
–	1,00	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
–	1,25	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
–	1,50	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
–	1,75	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
–	2,00	15,5	2,0	92,5	3,1101	3,11	3,1101	В-1-(1-2)
–	2,30	30,0	2,9	89,0	2,1101	2,11	2,1101	П-2-(1-2)

Таблица 3. Информационное кодирование месторождения «Ольчешское» в базе данных торфоисследовательских работ (Томская школа)

Категории торфяных запасов	Информационный код торфяного сырья	Результат кодирования*
А	1,1	1,1
В	1,2	–
С	1,3	–

\*Примечание. Томская школа рассматривает торфяное месторождение как цельный, единый массив. Такая точка зрения на структуру торфяной залежи распространена за рубежом [13–15].

Таблица 4. Информационное кодирование месторождения «Ольчешское» в базе данных торфоисследовательских работ (Тверская школа)

Тип залежи	Среднее значение по всем стратиграфическим поперечникам				Результат кодирования
	Пнистость, %	Зольность, %	Степень разложения, %	Глубина, м	
В	1,5	9,7	37	5,88	1.1-2.1-3.5-4.2-5.3
Н	0	13	47	3,7	1.3-2.1-3.6-4.3-5.3
П	1,1	7	40	4,1	1.2-2.1-3.5-4.2-5.3

На основе данных таблиц 2–4 построены три геологические модели в ГИС Micromine (рис. 5). При этом для распознавания границ слоев торфа различной

кодификации и слоя погребенной древесины использовались методы интерполяции: кригинг, обратного соседа. По построенным 3d-моделям в табл. 5 приведены результаты расчета объема запасов торфа на торфяном месторождении «Ольчское».

По данным торфяного фонда 1955 г. месторождение «Ольчское» было детально разведано в 1931 г. и характеризовалось следующими основными геоданными:

промышленная площадь – 2 041 га;  
запас торфа – 155 123 т.

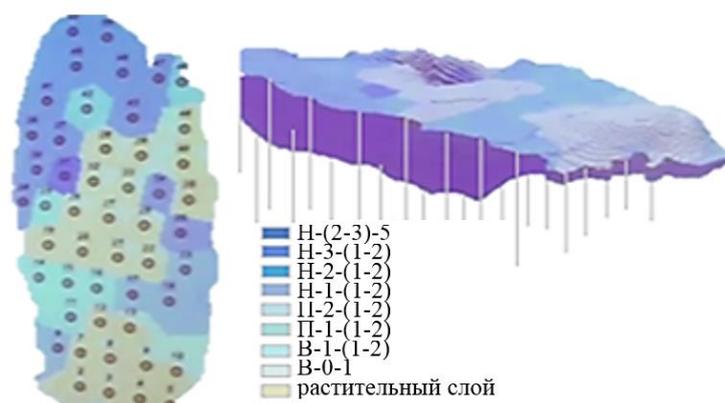
Месторождение активно эксплуатировалось, и в торфяном фонде 1990 г. объем его запасов составлял уже 12 808 т. По результатам 3d-моделирования ближе всего к реальному значению объема запасов торфа в месторождении «Ольчское» – модель, показанная на рис. 5(в), которая построена с использованием подхода Тверской торфяной школы.

Таблица 5. Запасы торфа,  
рассчитанные по 3d-моделям торфяного месторождения

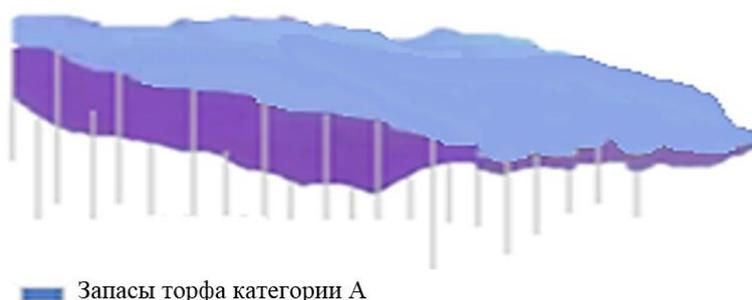
Торфяная научная школа					
(а) Уральская		(б) Томская		(в) Тверская	
Код сырья	Запасы, тыс. т	Код сырья	Запасы, тыс. т	Код сырья	Запасы, тыс. т
Н-(2-3)-5	10	А	13 885	В1-2.1-3.5-4.2-5.3	2 603
Н-3-(1-2)	301			Н3-2.1-3.6-4.3-5.3	7 274
Н-2-(1-2)	5 016			П2-2.1-3.5-4.2-5.3	2 910
Н-1-(1-2)	993			Погребенная древесина	1 149
П-2-(1-2)	1 548				
П-1-(1-2)	1 770				
В-1-(1-2)	845				
В-0-1	1 546				
Очес*	975				
Всего	13 004	Всего	13 885	Всего	12 787**

Примечания:

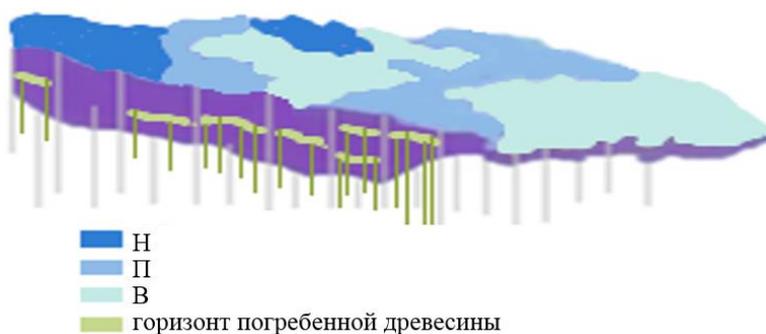
- \* – растительный слой.
- \*\* – запас торфа без учета погребенной древесины.



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. 3d-модель месторождения торфа «Ольчское» в ГИС Micromine по кодировке торфяных ресурсов: Уральская (а), Томская (б) и Тверская (в) школы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Истоки автоматизации и информатизации разработки и проектирования торфяных производств заложены в стенах Тверского государственного технического университета еще в 1979 г. профессором Караваевой Н.М. В 1988 г. НИИ «Центр-программсистем» разработал отдельные пакеты прикладных программ для торфяной отрасли. Современные научные исследования по вопросам информатизации торфяной отрасли проводятся в университете на базе прикладных и специализированных информационных кафедр под руководством профессора Палюха Б.В. [16–20]. Поэтому утверждение авторов работы [8] об отсутствии исследований в этой области некорректно.

2. Все известные и используемые ГИС в добывающей отрасли рассматривают любое месторождение, в том числе и торфяную залежь, как единый сплошной массив,

что в корне ошибочно, так как противоречит геологическим знаниям о строении торфяника. Ввиду различных точек зрения по вопросу строения торфяного месторождения 3d-модель одного и того же месторождения получается различной как по структуре, так и по точности расчета запасов торфяных ресурсов.

3. Препятствием для моделирования торфяных месторождений является отсутствие достоверной геологической информации на стадии торфоисследовательских работ.

4. При моделировании торфяного месторождения во всех горных ГИС возникает важный вопрос о размерах единичных блоков, используемых для построения 3d-модели месторождения.

5. Для применения горных ГИС в процессе моделирования и проектирования торфяных месторождений необходима их существенная адаптация.

6. Ввиду большой протяженности торфяного месторождения в горизонтальном направлении возникают трудности с интерполяцией точек, ограничивающих поверхности. В связи с этим необходимо подбирать оптимальный масштаб модели для ее лучшей наглядности.

7. Практическое значение 3d-моделирования торфяного массива заключается в возможности точного определения объемов запасов месторождения. При этом точность 3d-модели торфяной залежи, построенной ГИС Micromine, зависит от качества торфоисследовательских работ и используемого подхода в кодировании торфяного сырья Уральской, Томской и Тверской торфяными школами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении методических рекомендаций в целях ведения статистического учета запасов и месторождений торфа по форме, утвержденной постановлением Госкомстата России от 18.06.1999 № 44 и обеспечения подготовки федерального и территориального балансов запасов торфа по единой для Российской Федерации системе. Приказ № 87 от 29.03.2000. URL: <https://pandia.ru/text/80/306/43997.php> (дата обращения: 16.10.2020).

2. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., Зюзин Б.Ф. Вопросы инвестиционной привлекательности торфяной отрасли // *Современное состояние экономических систем: экономика и управление: сб. науч. трудов межд. науч. конф.* / под общ. ред. Д.В. Розова, Г.Г. Скворцовой. Тверь: СКФ-офис, 2018. С. 139–142.

3. Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Яконовская Т.Б. Горнопромышленный комплекс Тверского региона Российской Федерации: анализ развития // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования: материалы межд. науч. конф., посвященной 215-летию со дня рождения И. Домейко* / под ред. А.К. Карабанова. Минск: Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, 2017. С. 148–151.

4. Михайлов А.В., Жигульская А.И., Яконовская Т.Б., Жигульский М.А. Оценка этапов жизненного цикла разработки торфяного месторождения // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования: материалы межд. науч. конф., посвященной 215-летию со дня рождения И. Домейко* / под ред. А.К. Карабанова. Минск: Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, 2017. С. 196–199.

5. Яконовская Т.Б. Проблемы информатизации анализа геологических данных предприятий по добыче торфа // *Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (инфос-2020): материалы межд. науч.-техн. конф.* Вологда: ВГУ, 2020. С. 89–94.

6. Условное моделирование в Micromine. URL: <https://www.micromine.ru/micromine-mining-software> (дата обращения: 15.10.2020).

7. Poggio L., Gimona A., Aalders I., Morrice J., Hough R. Legacy data for 3D modelling of peat properties with uncertainty estimation in Dava bog-Scotland // *Geoderma Regional*. 2020. С. e00288.

8. Косов В.И. Системные принципы разработки ресурсосберегающих технологий в торфяном производстве: дис. ... докт. техн. наук. Тверь, 1991. 350 с.

9. Егошина О.С., Александров Б.М. Система цифрового кодирования генетической классификации видов торфа и ее роль в комплексной оценке запасов торфа по категориям сырья и направлениям использования // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, 2019. № 3. С. 55–63.

10. Бернатонис П.В., Бернатонис В.К., Боярко Г.Ю. Геологическое обоснование кондиций на торф // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 3 (40). С. 345–350.

11. Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Яконовская Т.Б. Моделирование физико-химических процессов // *Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: сб. материалов VIII Всероссийской конф., посвященной 60-летию ПАО «Химпром»*. Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2020. С. 285–286.

12. Косов В.И., Масленников А.В. Системные принципы расчета на ЭВМ экологически сбалансированного и ресурсосберегающего освоения торфяных месторождений // *Торфяная промышленность*, 1990. № 10. С. 6–14

13. Mikhailov A., Zhigulskaaya A., Yakonovskaya T. Strip mining of peat deposit // *Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017*. С. 497–501.

14. Mikhailov A.V., Zhigulskaaya A.I., Yakonovskaya T.B. Excavating and loading equipment for peat mining // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2017. V. 87. №. 2. С. 022014.

15. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., Яконовский П.А. Оценка использования геофизического метода VLF для определения мощности торфяного месторождения // *Горные науки и технологии*. 2020. № 5 (3). С. 224–234.

16. Караваева Н.М., Бураков А.И., Дмитриев Г.А., Лифшиц М.С. Автоматизация торфяного производства. М.: Недра, 1979. 312 с.

17. Волков А.Н. Технологические аспекты разработки высококачественного программного обеспечения // *Торфяная промышленность*, 1990. № 6. С. 27–30.

18. Палюх Б.В., Ветров А.Н. Архитектура комплекса инструментальных программных средств динамических распределенных систем мониторинга торфяных пожаров // *Научный сервис в сети Интернет*. Труды Всероссийской науч. конф. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005. С. 251–252.

19. Палюх Б.В., Цветков Р.Е. Информационная система имитационного моделирования торфяных пожаров // *Программные продукты и системы*. 2007. № 3. С. 48.

20. Палюх Б.В., Цветков Р.Е. Интеллектуальная система управления пожарной безопасностью хранения фрезерного торфа // *XI Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием*. Дубна. 2008. С. 300–305.

**Для цитирования:** Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Особенности 3d-моделирования торфяных месторождений в геоинформационной среде Micromine // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 1 (9). С. 71–85.

## FEATURES OF 3D MODELING OF PEAT IN THE GEOINFORMATION ENVIRONMENT MICROMINE

T.B. YAKONOVSKAYA, Cand. Sc., A.I. ZHIGULSKAYA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: tby81@yandex.ru

One of the most important tasks of paramount importance for the design of a peat mining enterprise is the construction of an information model of a peat massif. In the article, the authors show the result of modeling a peat deposit in the Micromine mountain geographic information environment (GIS) using system approaches to processing geological information from various peat schools. As a result of modeling on the informational data of detailed exploration, three versions of the geological model of the «Olchevskoe» peat deposit were obtained. In conclusion, the authors cite the following conclusions: first, a wide range of software packages has been developed on the software market for mining enterprises; secondly, the system principles embedded in the software are the same, but for the purposes of a particular mining enterprise, mining and geological conditions and the type of deposit, it takes a lot of time to adapt mining geographic information systems; thirdly, depending on the underlying theoretical and systemic principles in the informational description of a peat deposit, the created 3d models will differ significantly.

*Keywords:* geographic information systems (GIS), modeling of deposits, 3d model, scientific peat schools, Micromine.

### REFERENCES

1. Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsiy v tselyakh vedeniya statisticheskogo ucheta zapasov i mestorozhdeniy torfa po forme, utverzhdennoy postanovleniyem Goskomstata Rossii ot 18.06.99 g. № 44 i obespecheniya podgotovki federal'nogo i territorial'nogo balansov zapasov torfa po yedinoy dlya Rossiyskoy Federatsii sisteme. Prikaz №87 ot 29.03.2000. URL: <https://pandia.ru/text/80/306/43997.php> (data accessed: 16.10.2020). (In Russian).
2. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I., Zyuzin B.F. Issues of investment attractiveness of the peat industry. *Current state of economic systems: economics and management*. Collection of scientific papers int. scientific conf. / under total ed. D.V. Rozova, G.G. Skvortsova. Tver: SCF-offis, 2018, pp. 139–142. (In Russian).
3. Zyuzin B.F., Zhigulskaya A.I., Yakonovskaya T.B. Mining complex of the Tver region of the Russian Federation: analysis of development // *Geology and mineral resources of the West of the East European platform: problems of study and rational use*. Materials int. scientific. conf., dedicated to the 215th anniversary of the birth of I. Domeyko / ed. A.K. Karabanov. Minsk: Institut prirodopolzovaniya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi, 2017, pp. 148–151. (In Russian).
4. Mikhailov A.V., Zhigulskaya A.I., Yakonovskaya T.B., Zhigulsky M.A. Assessment of the stages of the life cycle of the development of a peat deposit. *Geology and mineral resources of the West of the East European platform: problems of study and rational use*. Materials int. scientific. Conf., dedicated to the 215th anniversary of the birth of I. Domeyko / ed. A.K. Karabanov. Minsk: Institut prirodopolzovaniya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi, 2017, pp. 196–199. (In Russian).
5. Yakonovskaya T.B. Problems of informatization of the analysis of geological data of enterprises for peat extraction. *Intelligent information technologies and intelligent business*

(info-2020): materials of the int. scientific and technical conf. Vologda: VGU. 2020, pp. 89–94. (In Russian).

6. Uslovnoye modelirovaniye v Micromine. URL: <https://www.micromine.ru/micromine-mining-software>. (data accessed: 15.10.2020). (In Russian).

7. Poggio L., Gimona A., Aalders I., Morrice J., Hough R. Legacy data for 3D modelling of peat properties with uncertainty estimation in Dava bog-Scotland. *Geoderma Regional*. 2020. P. e00288.

8. Kosov V.I. System principles for the development of resource-saving technologies in peat production: Diss ... doct. tech. sciences. Tver, 1991. 350 p. (In Russian).

9. Egoshina O.S., Alexandrov B.M. A digital coding system for the genetic classification of peat species and its role in the comprehensive assessment of peat reserves by categories of raw materials and directions of use. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*, 2019. No. 3, pp. 55–63. (In Russian).

10. Bernatonis P.V., Bernatonis V.K., Boyarko G.Yu. Geological substantiation of conditions for peat. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2013. No. 3 (40), pp. 345–350. (In Russian).

11. Zyuzin B.F., Zhigul'skaya A.I., Yakonovskaya T.B. Modeling of physical and chemical processes. *Actual problems of chemical technology and environmental protection*. Sb. materialov VIII Vserossiyskoy konf., posvyashchenoy 60-letiyu PAO "Khimprom". Cheboksary: ChGU im. I.N. Ulyanova, 2020, pp. 285–286. (In Russian).

12. Kosov V.I., Maslennikov A.V. System principles of computing on an ecologically balanced and resource-saving development of peat deposits. *Torfyanaya promyshlennost*, 1990. No. 10, pp. 6–14. (In Russian).

13. Mikhailov A., Zhigul'skaya A., Yakonovskaya T. Strip mining of peat deposit. *Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017*, pp. 497–501.

14. Mikhailov A.V., Zhigul'skaya A.I., Yakonovskaya T.B. Excavating and loading equipment for peat mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2017. V. 87. No. 2. P. 022014.

15. Yakonovskaya T.B., Zhigul'skaya A.I., Yakonovskiy P.A. Assessment of the use of the VLF geophysical method for determining the thickness of a peat deposit. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2020. No. 5 (3), pp. 224–234. (In Russian).

16. Karavaeva N.M., Burakov A.I., Dmitriev G.A., Lifshits M.S. Avtomatizatsiya torfyanogo proizvodstva [Peat production automation]. Moscow: Nedra. 1979. 312 p.

17. Volkov A.N. Technological aspects of high-quality software development. *Torfyanaya promyshlennost*, 1990. No. 6, pp. 27–30. (In Russian).

18. Palukh B.V., Vetrov A.N. Architecture of the complex of instrumental software for dynamic distributed systems for monitoring peat fires. *Scientific service on the Internet*. Proceedings of the All-Russian Scientific. conf. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova. 2005, pp. 251–252. (In Russian).

19. Palyukh B.V., Tsvetkov R.E. Information system for simulation of peat fires. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2007. No. 3. P. 48. (In Russian).

20. Palyukh B.V., Tsvetkov R.E. Intelligent fire safety management system for storage of milled peat. *XI national conference on artificial intelligence with international participation*. Dubna. 2008, pp. 300–305. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 26.10.2020; после рецензирования/revised: 28.10.2020;  
принята/accepted 23.11.2020

## СИНТЕЗ РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ЛИНИЙ РАВНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Б.И. МАРГОЛИС, д-р техн. наук, К.И. МАКАРОВ, магистрант

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: borismargolis@yandex.ru

© Марголис Б.И., Макаров К.И., 2021

В статье изложен метод расчета настроек регуляторов в системах автоматического управления с использованием линий равного быстродействия. Предложено развитие метода расширенных частотных характеристик для решения задачи синтеза систем с заданным быстродействием. Рассмотрены примеры расчета настроек регуляторов в среде MatLab. Получены графики переходного процесса и характеристики качества систем управления.

*Ключевые слова:* система автоматического управления, регулятор, переходный процесс, расширенные частотные характеристики, быстродействие, показатели качества.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-86-91

### ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее применение при автоматизации технологических процессов находят одноконтурные замкнутые системы автоматического управления (САУ) с типовыми пропорционально-интегральным (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законами регулирования [1]. Структурная схема такой САУ состоит из последовательно соединенных регулирующего устройства и объекта с передаточными функциями  $W_p(p)$  и  $W(p)$  соответственно, охваченных обратной связью [2]. Широко известным методом для расчета настроек регуляторов является метод расширенных частотных характеристик (РЧХ), в котором синтезируется заданная степень колебательности  $m$  замкнутой системы [3]. Задача данной работы состоит в распространении метода РЧХ на синтез систем с заданным быстродействием.

### РАСЧЕТ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРОВ МЕТОДОМ РАСШИРЕННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В методе РЧХ замкнутая система управления выводится на заданную степень колебательности  $m$ . Соотношения для расчета настроек ПИД-регулятора получены в работе [4] и выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} K_1 = R(\omega) - mI(\omega) + 2K_2m\omega; \\ K_0 = -I(\omega)(m^2 + 1)\omega + K_2(m^2 + 1)\omega^2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $K_1$ ,  $K_0$ ,  $K_2$  – пропорциональная, интегральная и дифференциальная настройки;  $I(\omega)$ ,  $R(\omega)$  – действительная и мнимая части РЧХ регулятора:

$$W_p((j - m)\omega) = -1/W((j - m)\omega) = R(\omega) + jI(\omega).$$

Параметрическая зависимость  $K_1 = f(K_0)$  называется линией равного затухания. Формулы для ПИИ-регулятора получаются из (1) при  $K_2 = 0$ .

Для объекта в виде колебательного звена  $W(p) = 3/(p^2 + 2p + 2)$  со степенью колебательности  $m_{об} = 1$ , ПИД-регулятора и заданных перерегулирования  $\sigma_{зад} = 30\%$ , времени переходного процесса  $t_{зад} = 4$  с получены наилучшие переходные процессы (рис. 1) для различных  $K_2$ , из которых выбран оптимальный по критерию

$$J = w_\sigma |\sigma - \sigma_{зад}| / \sigma_{зад} + w_t |t - t_{зад}| / t_{зад} + w_m |m - m_{зад}| / m_{зад}, \quad (2)$$

где  $w_\sigma$ ,  $w_t$ ,  $w_m$  – соответствующие веса.

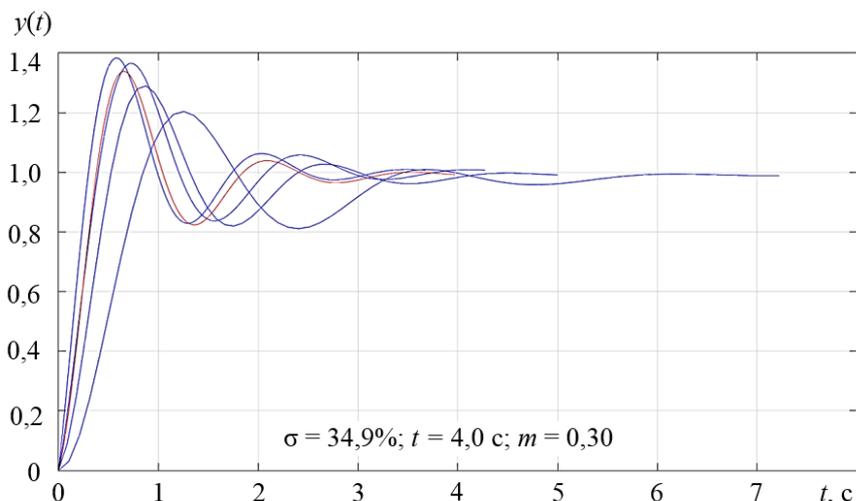


Рис. 1. Семейство переходных процессов для настроек ПИД-регуляторов при расчете методом РЧХ для  $\sigma_{зад} = 30\%$

На рис. 2 показаны наилучшие переходные процессы для заданного перерегулирования  $\sigma_{зад} = 5\%$  для каждой из линий равного затухания и оптимальный процесс, который не удовлетворяет требуемым характеристикам качества.

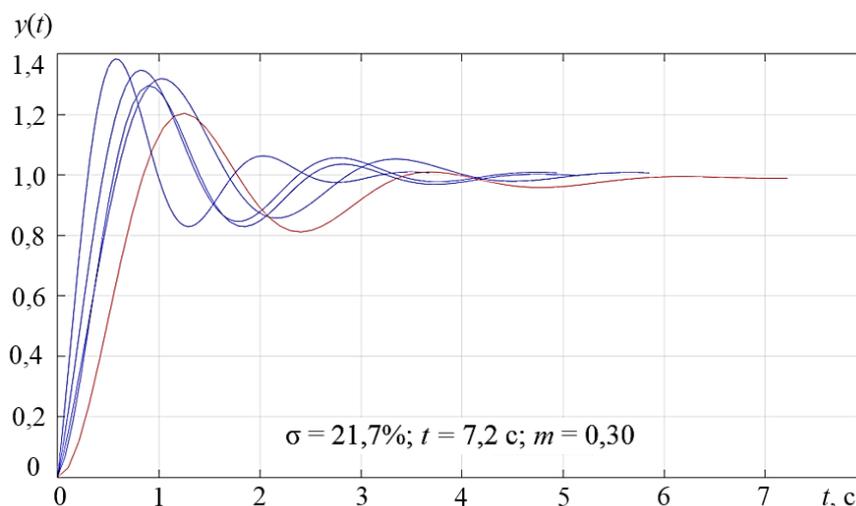


Рис. 2. Семейство переходных процессов для настроек ПИД-регуляторов при расчете методом РЧХ для  $\sigma_{зад} = 5\%$

## РАСЧЕТ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРОВ МЕТОДОМ ЛИНИЙ РАВНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

В отличие от метода РЧХ в методе с использованием линий равного быстродействия (ЛРБ) предложено синтезировать не степень колебательности  $m$ , а быстродействие системы, характеризуемое действительной частью корней характеристического уравнения замкнутой системы  $\alpha$ . Эту величину можно оценить по заданному времени переходного процесса из выражения  $\alpha = -5/t_{\text{зад}}$ .

Формулы метода ЛРБ можно получить из (1) путем формальной подстановки  $m = \alpha/\omega$ , где  $\omega$  является уже не частотой, а мнимой частью корней характеристического уравнения замкнутой системы. В результате получаются следующие соотношения для расчета настроек ПИД-регулятора методом ЛРБ:

$$\begin{cases} K_1 = R(\omega) - \alpha I(\omega)/\omega + 2K_2\alpha; \\ K_0 = -I(\omega) \left( \frac{\alpha^2}{\omega} + \omega \right) + K_2(\alpha^2 + \omega^2). \end{cases} \quad (3)$$

В среде MatLab [5] разработана программа для определения настроек регуляторов в САУ методом ЛРБ. На рис. 3 и 4 представлены рассчитанные с ее помощью графики переходных процессов при тех же исходных условиях, что и в методе РЧХ.

Графики линий равного быстродействия для различных  $K_2$  ПИД-регулятора приведены на рис. 5.

Таким образом, идея метода заключается в том, что синтезируются корни с заданной действительной  $\alpha$ , но различными мнимыми частями  $\omega$ . Быстродействие у переходных процессов получается примерно одинаковым, но колебательные свойства системы можно задать различными через требуемую величину перерегулирования  $\sigma_{\text{зад}}$ . Плоскость корней для полученного при  $\sigma_{\text{зад}} = 5\%$ ;  $t_{\text{зад}} = 4$  с оптимального регулятора  $W_p(p) = 1,91 + 1,39/p + 0,4p$  показана на рис. 6.

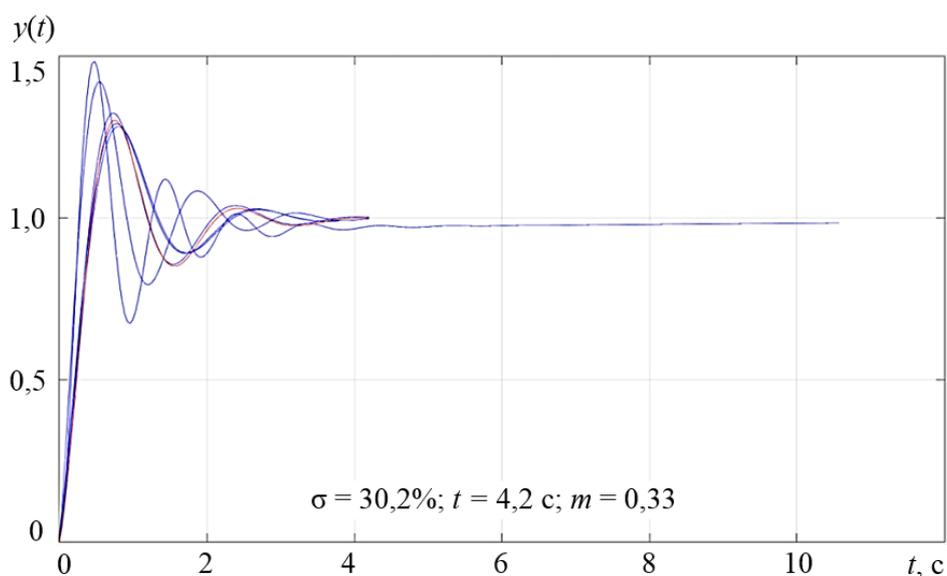


Рис. 3. Семейство переходных процессов для настроек ПИД-регуляторов при расчете методом ЛРБ для  $\sigma_{\text{зад}} = 30\%$

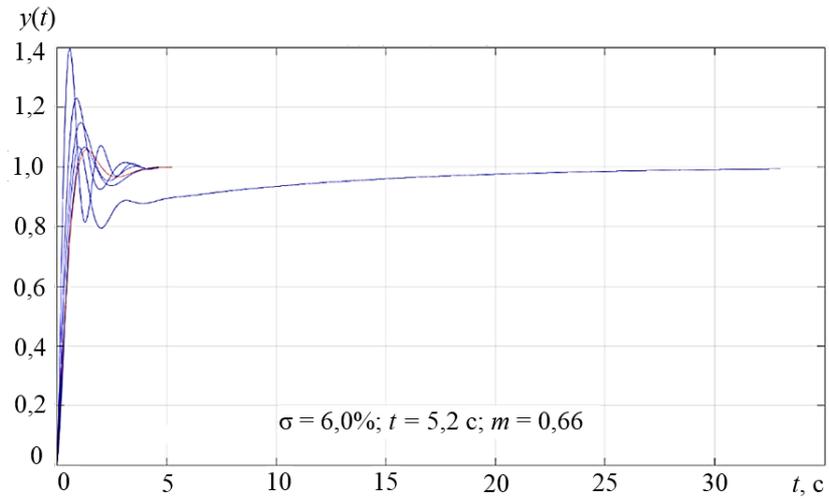


Рис. 4. Семейство переходных процессов для настроек ПИД-регуляторов при расчете методом ЛРБ для  $\sigma_{зад} = 5\%$

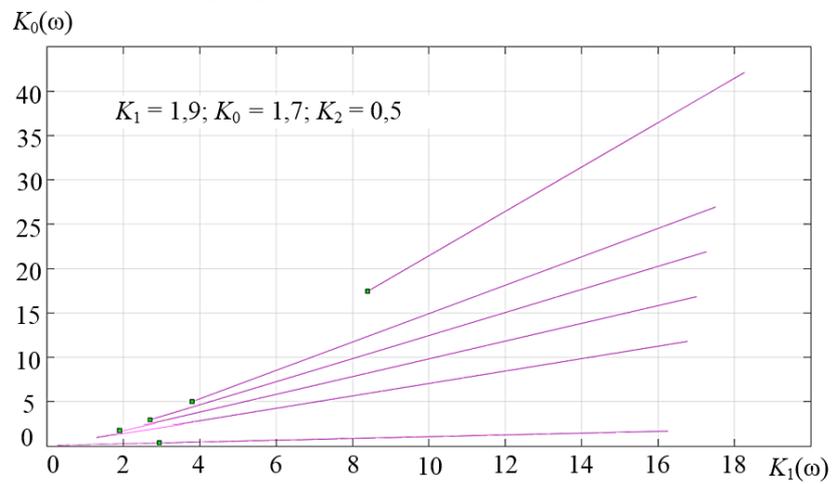


Рис. 5. График ЛРБ ПИД-регулятора для  $\sigma_{зад} = 5\%$

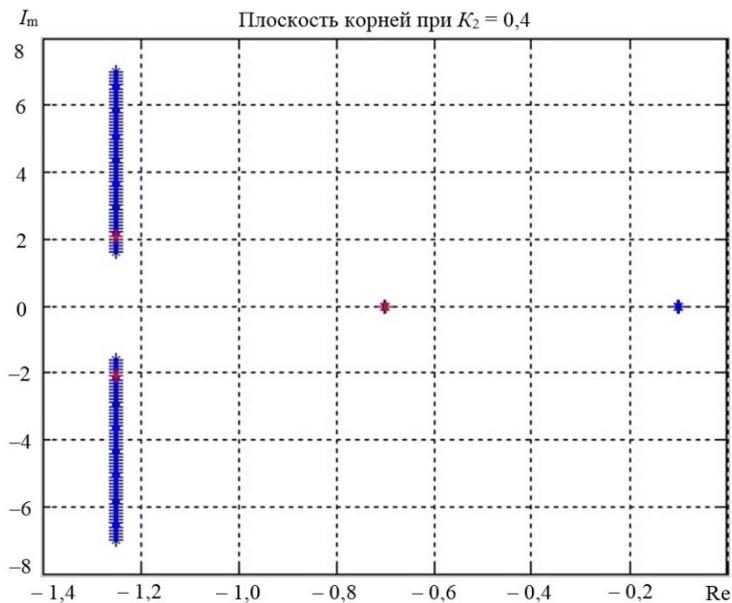


Рис. 6. Плоскость корней замкнутой системы для  $\sigma_{зад} = 5\%$

Из рис. 4 и 6 видно, что заданное перерегулирование практически достигнуто, но результат по быстродействию хуже, так как кроме двух комплексных корней  $-1,25 \pm 2j$  присутствует еще один действительный корень  $-0,7$ , находящийся ближе к мнимой оси и увеличивающий время переходного процесса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинством метода ЛРБ по сравнению с методом РЧХ является отсутствие необходимости учета степеней колебательности исходного объекта  $m_{об}$ , результирующей системы  $m$  и выполнения соотношения  $m < m_{об}$  [4]. Это демонстрируется данными таблицы, в которой представлены характеристики рассчитанных методами РЧХ и ЛРБ оптимальных переходных процессов для желаемого времени переходного процесса  $t_{зад} = 4$  с.

Характеристики оптимальных рассчитанных переходных процессов для  $t_{зад} = 4$  с

Метод	Заданное перерегулирование $\sigma_{зад}$ , %	Время переходного процесса $t_{п. п.}$ , с	Перерегулирование $\sigma$ , %	Степень колебательности $m$
РЧХ	30	4	34,9	0,33
	5	7,2	21,7	0,3
ЛРБ	30	4,2	30,2	–
	5	5,2	6	–

При помощи рассмотренного метода ЛРБ можно анализировать характеристики качества и переходные процессы САУ. Написание программного приложения в среде MatLab позволяет легко модифицировать его код. Оно хорошо подходит для исследовательских целей, поскольку имеется возможность задавать различные параметры объекта и желаемые характеристики качества итоговой системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Комиссарчик В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов: учеб. пособие. Тверь: ТГТУ, 2001. 247с.
2. Чемоданов Б.К., Иванов В.А., Медведев В.С., Ющенко А.С. Математические основы теории автоматического управления: учеб. пособие для студентов вузов; в 3 т. Т. 1. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 551 с.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 296 с.
4. Марголис Б.И. Компьютерные методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования в среде Matlab: учеб. пособие. Тверь: ТГТУ, 2015. 92 с.
5. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: учебный курс. СПб.: Питер, 2005. 512 с.

**Для цитирования:** Марголис Б.И., Макаров К.И. Синтез регулирующих устройств в системах автоматического управления методом линий равного быстродействия // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 86–91.

**SYNTHESIS OF REGULATING DEVICES  
IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS  
BY THE EQUAL SPEED OPERATION LINE METHOD**

B.I. MARGOLIS, Dr. Sc., K.I. MAKAROV, Undergraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: borismargolis@yandex.ru

The article describes a method for calculating the settings of regulators in automatic control systems using lines of equal speed operation. The development of the extended frequency response method for solving the problem of synthesizing systems with a given speed is proposed. The examples of calculating the settings of regulators in the MatLab environment are considered. The graphs of the transient process and quality characteristics of control systems were obtained.

*Keywords:* automatic control system, regulator, transient process, extended frequency characteristics, speed operation, quality indicators.

**REFERENCES**

1. Komissarchik V.F. Avtomaticheskoe regulirovanie tekhnologicheskikh processov: ucheb. posobie [Automatic regulation of technological processes: a tutorial]. Tver: TGTU, 2001. 247 p.
2. Chemodanov B.K., Ivanov V.A., Medvedev V.S., Yushchenko A.S. Matematicheskie osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobie dlya studentov vuzov; v 3 t. T. 1 [Mathematical foundations of the theory of automatic control: textbook manual for university students; in 3 volumes. V. 1]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2006. 551 p.
3. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya teploenergeticheskimi processami: ucheb. posobie dlya vuzov [Theory of automatic control of heat and power processes: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 296 p.
4. Margolis B.I. Kompyuternye metody analiza i sinteza sistem avtomaticheskogo regulirovaniya v srede Matlab: ucheb. posobie [Computer methods of analysis and synthesis of automatic control systems in the Matlab environment: a tutorial]. Tver: TGTU, 2015. 92 p.
5. Lazarev Yu. Modelirovanie processov i sistem v MATLAB: uchebnyy kurs [Modeling of processes and systems in MATLAB: textbook course]. St. Petersburg: Piter, 2005. 512 p.

Поступила в редакцию/received: 3.11.2020; после рецензирования/ revised: 30.11.2020;  
принята/accepted 07.12.2020

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ В МОБИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ИМИТАЦИИ ИЗОЛИРУЮЩИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Д. ОБУХОВ, канд. техн. наук, Д.Л. ДЕДОВ, канд. техн. наук,  
М.В. ЗВЕРЕВ, магистрант

Тамбовский государственный технический университет, 392000, Тамбов,  
ул. Советская, д. 106, e-mail: obuhov.art@gmail.com

© Обухов А.Д., Дедов Д.Л., Зверев М.В., 2021

Рассматривается задача обработки информации в подсистеме тренажерного комплекса – мобильной системе имитации изолирующих дыхательных аппаратов. Выявлены две проблемы: необходимость определения новых расчетных формул после замены компонентов системы на аналоги и прогнозирования значений при потере пакетов данных в процессе их беспроводной передачи. Для их решения разработаны алгоритмы обработки данных на основе нейросетевых технологий, позволяющие автоматизировать поиск расчетных формул при переходе от эталонных компонентов к аналогам и уменьшить количество потерь пакетов данных за счет прогнозирования отсутствующих значений. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность и эффективность предложенных алгоритмов. Применение нейронных сетей при решении задач обработки информации позволило повысить точность данного процесса.

*Ключевые слова:* нейронные сети, обработка данных, восстановление отсутствующих значений, прогнозирование, тренажерные комплексы, системы имитации, мобильная разработка.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-92-101**

### ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности работы персонала человеко-машинных систем необходима организация качественной и регулярной подготовки. При моделировании пожара и задымления, чрезвычайной ситуации, поломки оборудования и так далее высокую эффективность показывают тренажерные комплексы, функционирующие на основе технологий виртуальной или дополненной реальности [1, 2]. Однако в ряде случаев отображения только визуального представления каких-либо процессов или сценариев недостаточно для полноценной подготовки персонала.

В таких областях, как химическая, горнодобывающая промышленность, актуальной проблемой является выработка у сотрудников правильных навыков дыхания в изолирующих дыхательных аппаратах (ИДА). Достаточный уровень владения ИДА позволит человеку в условиях загрязнения воздуха и наличия в нем ядовитых примесей использовать ИДА в рамках установленного регламента и получать необходимый объем кислорода (на основе проходящих в аппарате химических реакций). Однако высокая стоимость подготовки из-за одноразовости ИДА приводит к необходимости разработки различных систем их имитации [3]. В этом направлении ранее были получены положительные теоретические и практические результаты [4, 5].

В ходе практических испытаний системы имитации ИДА выявлены проблемы в области сбора, анализа и обработки информации, оказывающих влияние на точность работы системы.

Первая проблема связана с наличием нескольких видов датчиков, собирающих информацию о температуре, дифференциальном давлении, а также о пульсе человека, на основе чего осуществляется как регулирование работы системы (увеличение или уменьшение нагрева газодыхательной смеси), так и мониторинг состояния пользователя (путем расчета спирограммы, пневмотахограммы, пульсограммы). При замене датчика на альтернативу от другого производителя либо при разработке новой конструкции датчика, обладающей некоторыми преимуществами (например, большей надежностью или влагостойкостью), приходится заново определять расчетные формулы метрик или вводить поправочные коэффициенты. Это приводит к снижению точности получаемых данных.

Вторая проблема заключается в нестабильности потока получаемой информации от датчиков на сервер или мобильные устройства оператора, осуществляющего контроль выполнения упражнений [6]. Ввиду необходимости активной деятельности в процессе тренировки невозможно осуществить передачу данных проводным способом, что приводит к неизбежной потере отдельных пакетов из-за нестабильности беспроводного сигнала, наличия помех, внешних условий и т.п.

Перспективным вариантом решения данных задач является использование нейросетевых технологий и методов машинного обучения, так как они относятся к классу регрессионных [7, 8] и успешно решаются с помощью нейронных сетей с достаточной точностью [9, 10]. В связи с этим в работе рассматривается разработка алгоритмического и программного обеспечения, направленного на решение данных задач, с использованием нейросетевых технологий, что позволит автоматизировать процессы анализа и обработки информации в мобильной системе имитации ИДА.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формализуем обозначенные задачи обработки информации в системе имитации ИДА.

Пусть задано множество исходных данных  $X = \{x_n\}$ , собранных с  $K = \{k_q\}$  компонентов системы имитации, т.е. имеет место отображение  $k_q \rightarrow \{x_i^q \mid x_i^q \in X_q, X_q \subseteq X\}$ .

Тогда необходимо реализовать функцию  $FP$  обработки информации, которая при замене компонента  $k_a \in K$  (эталона) на  $k_b \in K$  (аналог) обеспечит максимальное отклонение получаемых от аналога  $X_b$  значений от эталона  $X_a$  не более  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned} FP: X_a &\rightarrow X_b, \\ \forall x_i^a \in X_a, x_i^b \in X_b &\left( |x_i^a - x_i^b| \leq \varepsilon \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Для канала передачи данных от компонента  $k_q$ , в которых сигнал поступает с периодом  $\tau$  (т.е. каждые  $\tau$  секунд), необходимо осуществить прогнозирование  $FM$  отсутствующих значений  $\{xm_i^q \mid xm_i^q \in XM_q\}$  на основе собранных данных  $X_q$  с ошибкой не более  $\varepsilon$  при отсутствии новых данных в течение времени  $t > \tau$ :

$$\begin{aligned} FM: X_q &\rightarrow XM_q, \\ \left( |xm_i^q - x_i^q| \leq \varepsilon \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Для решения данных задач и реализации функций  $FP$  и  $FM$  разработаем необходимое алгоритмическое и программное обеспечение, функционирующее на основе нейронных сетей.

### АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ ИМИТАЦИИ ИДА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрим теоретическое обоснование возможности решения задач (1) и (2) с помощью нейронных сетей.

В первой задаче задано непрерывное отображение вектора эталонных значений в вектор значений компонента аналога ( $X_a \rightarrow X_b$ ). Размерность векторов одинакова:  $|X_a| = |X_b|$ . Таким образом, искомая функция  $FP$  решает задачу регрессии. Возможность решения данной задачи с помощью многослойной нейронной сети доказана теоремами Хехт-Нильсена, Колмогорова и Цыбенко [11].

Для решения первой задачи с применением нейросетевых технологий создан следующий алгоритм обработки информации (рис. 1).

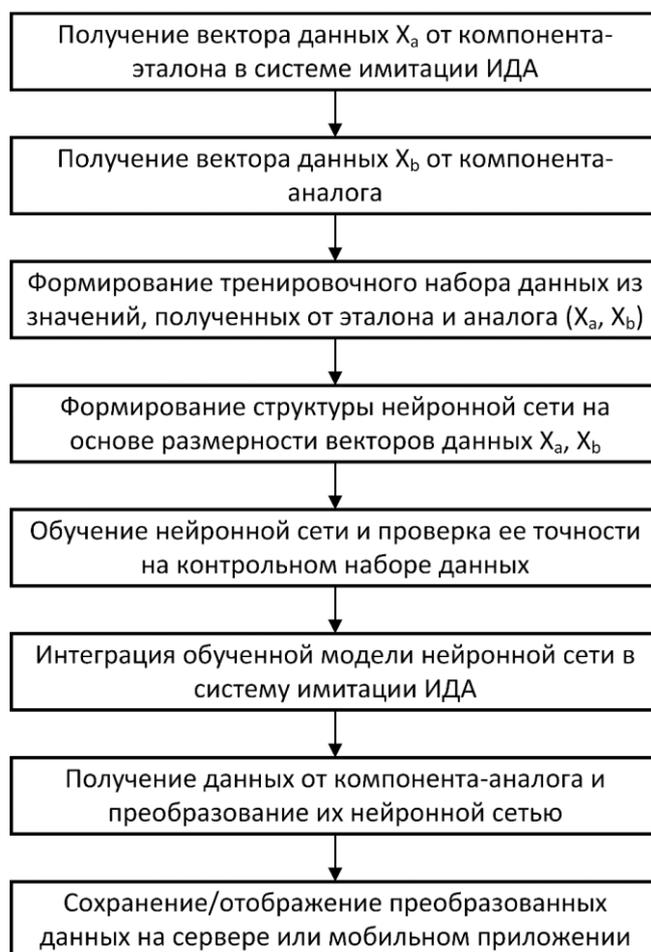


Рис. 1. Алгоритм обработки информации при замене компонентов в системе имитации ИДА

Во второй задаче задан вектор  $X_{M_q}$  отсутствующих значений имеет одинаковую размерность с векторами поступающих от компонента  $k_q$ :  $|X_{M_q}| = |X_q|$ . Однако данные вектора относятся к различным временным отрезкам:

$t_0 \rightarrow X_q, t_0 + \tau \rightarrow XM_q$ . Таким образом, можно сформировать временной ряд из упорядоченных пар  $\{(X_{q,i}, t_i), i = \overline{0..T}\}$ . Поскольку в момент  $t_0 + \tau$  в систему имитацию ИДА не поступил соответствующий ему новый вектор данных, необходимо осуществить его прогнозирование функцией  $FM$ . Продолжение временного ряда на основе предыдущих значений также относится к классу регрессивных задач и аналогично может быть осуществлено путем использования нейронных сетей за счет непрерывности отображения  $\{(X_{q,j}, t_j), j = i - h, i\} \rightarrow (XM_q, t_i + \tau)$ . В данном отображении для прогнозирования значений в момент времени  $t_i + \tau$  используется множество пар за время от  $t_{i-h}$  до  $t_i$ . Переменная  $h$  отражает количество данных, используемое для формирования прогноза.

Для решения второй задачи с применением нейросетевых технологий разработан алгоритм прогнозирования потерянных значений (рис. 2).

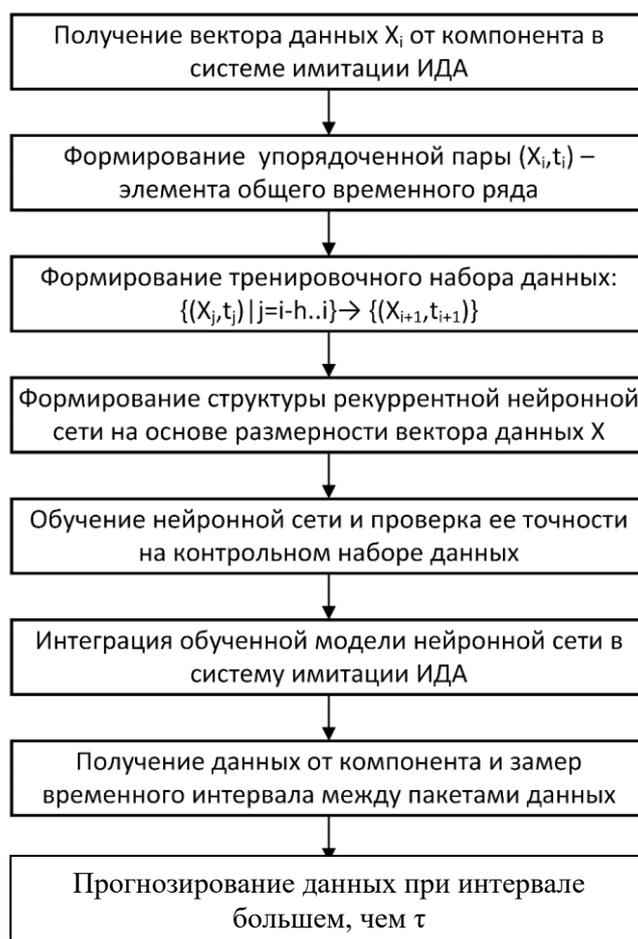


Рис. 2. Алгоритм прогнозирования потерянных значений в системе имитации ИДА

Рассмотренное математическое и алгоритмическое обеспечение позволит осуществить решение задач обработки информации в системе имитации ИДА и повысить точность собираемых данных.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для проверки адекватности разработанных алгоритмов и их апробации осуществлены экспериментальные исследования на базе реализованной системы имитации ИДА [4].

Экспериментальная установка включает в себя следующие основные компоненты:

имитатор ИДА (в него входят датчики дифференциального давления, потока, температуры, управляющие механизмы и контроллер для сбора и передачи данных) [12];

мобильный терминал для сбора и мониторинга информации о легочной активности пользователя (реализуется на базе приложения для операционной системе Android [13]);

мобильное устройство для измерения пульса [14];

роутер для создания беспроводной сети.

В рамках первого эксперимента рассматривается задача замены эталонного датчика потока SpiroQuant H на аналог [15]. В качестве аналога выступает спроектированный датчик потока, изготовленный из металла и способный выдержать воздействие различных внешних негативных факторов, таких как влага, температура, которые достаточно быстро приводят эталон в неработоспособное состояние.

Так как установленный в имитатор датчик дифференциального давления настроен на работу с датчиком потока SpiroQuant H, то при установке аналога он отражает некорректные значения. На первом этапе осуществлена аналитическая регрессия значений путем подбора корректирующих коэффициентов, что позволило сократить ошибку.

На втором этапе выполнен сбор данных на эталонном датчике и аналоге (2 045 значений) на установке искусственных легких, при этом исключена вариативность значений (что неизбежно при замере на человеке). Размерность вектора составила одно значение. Обучим простейшую регрессионную нейронную сеть, включающую дополнительно пять скрытых слоев: три Dense, один Dropout для снижения эффекта переобучения и слой BatchNormalization для нормализации. На вход сети подаются значения аналога, на выход – эталонные.

Результаты сравнительного анализа значений эталона, исходных значений датчика-аналога, аналога с корректирующими коэффициентами и, наконец, аналога с нейросетевой обработкой представлены на рис. 3 и 4.

Графики на рис. 4 могут не совпадать, так как при различных методах достаточно трудно синхронизировать начало вдоха и выхода при замере на человеке (ввиду изменяющейся частоты дыхания), однако они позволяют сделать вывод об амплитуде вдоха-выдоха.

Ошибка относительно эталона (1.0) составила:

для аналога без обработки: от 2,28 до 3,12;

для аналога с коэффициентами: от 0,99 до 1,36;

для аналога после нейросетевой обработки: от 0,98 до 1,03.

Таким образом, нейросетевой подход к обработке информации, получаемой с датчика-аналога, показал большую точность в реальных условиях при замере на человеке. Это также подтверждают графики на рис. 3 и 4, где максимальные и минимальные значения датчика-аналога после нейросетевой обработки максимально близки к датчику-эталону.

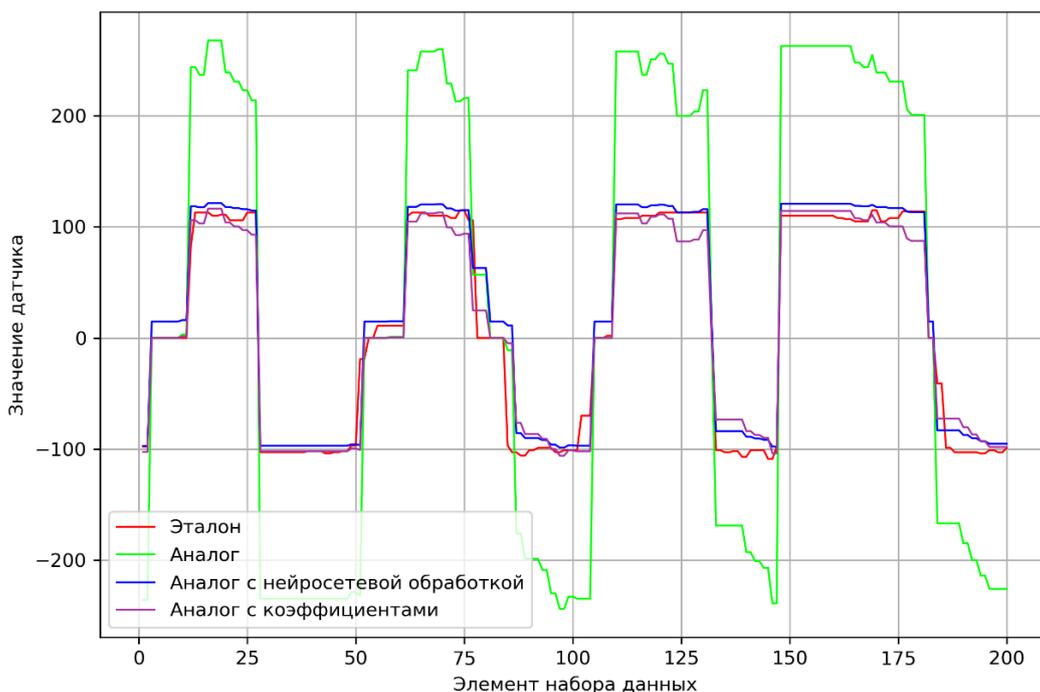


Рис. 3. Сравнение методов обработки данных при замере на искусственных легких

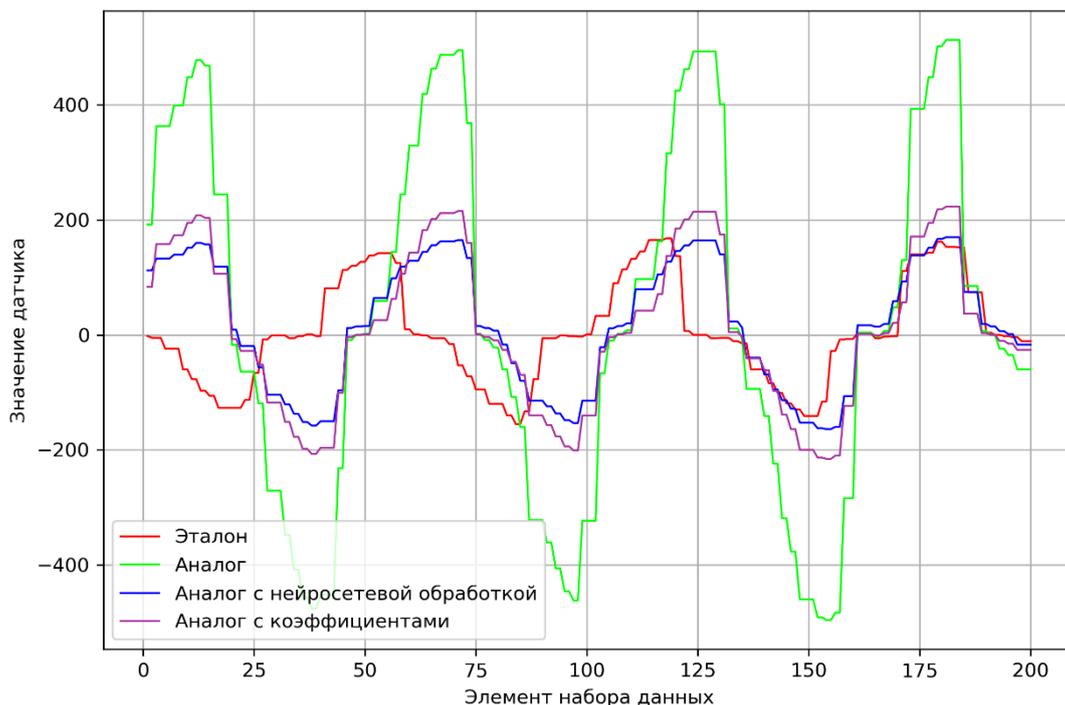


Рис. 4. Сравнение методов обработки данных при замере на легких человека

Второй эксперимент заключается в прогнозировании значений датчика дифференциального давления и, соответственно, значений на графиках спирограмм и пневмотахограмм в случаях нарушения связи с имитатором и потери пакетов.

Для решения данной задачи обучим рекуррентную нейронную сеть, на вход которой поступает вектор размерностью (20, 3), т.е. 20 последних записей по

3 значения (дифференциальное давление, спирограмма, пневмотахограмма), на выход – прогнозируемое значение. В случае, если от имитатора в течение установленного промежутка времени (50 миллисекунд) не поступает нового пакета данных, нейронная сеть формирует возможные значения давления, спирограммы, пневмотахограммы. Обучающий набор включал более 18 000 записей. Точность прогнозирования обученной нейронной сети составила 85 %.

Затем проводились практические испытания по восстановлению потерянных пакетов данных различной размерности (от 8 до 20 замеров). Средняя ошибка нейронной сети при прогнозировании данных составила 14,6 (4,4 %), что можно считать удовлетворительным результатом. На рис. 5 представлен исходный график значений с датчика дифференциального давления и восстановленные точки при потере данных в различные отрезки времени.

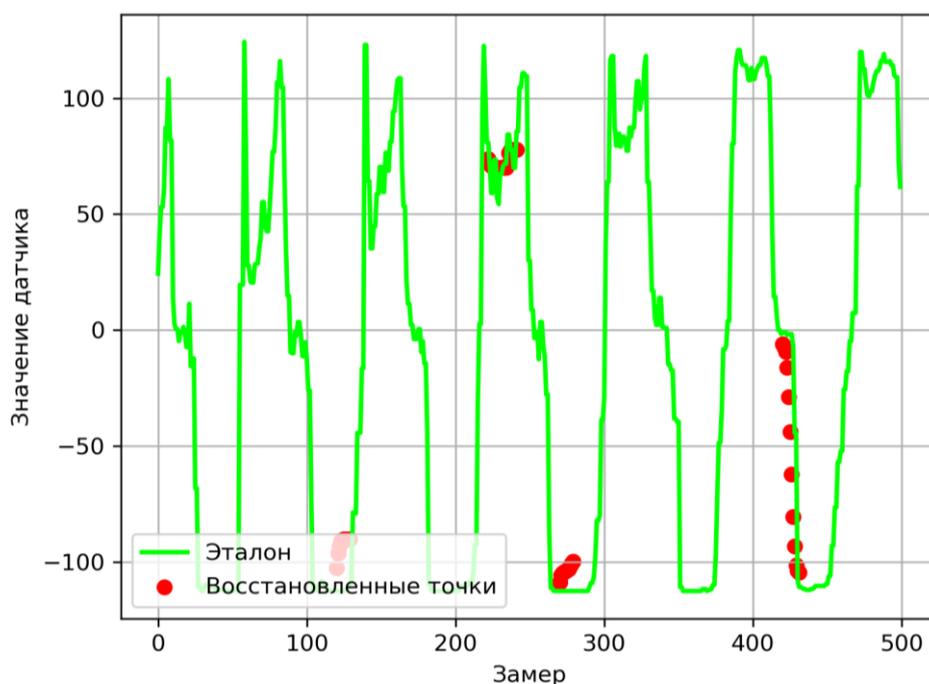


Рис. 5. Экспериментальные исследования по восстановлению потерянных данных

Таким образом, применение алгоритмов на основе нейросетевых технологий для обработки данных в системе имитации ИДА показывает достаточную эффективность и позволяет повысить точность при сборе и анализе информации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача повышения точности обработки данных в тренажерных комплексах на примере мобильной системы имитации дыхательных аппаратов. В данной предметной области выявлено две актуальные проблемы: определение расчетных формул для компонентов-аналогов при их замене в рамках системы, а также прогнозирование и восстановление потерянных пакетов данных.

Для обеих задач разработано алгоритмическое обеспечение, основанное на применении нейросетевых технологий для автоматизации процессов обработки информации. В ходе практической реализации алгоритмов успешно решены обе задачи. Общая ошибка при замене компонентов улучшена по сравнению с аналитическим

решением (с применением поправочных коэффициентов) с 0,99...1,36 до 0,98...1,03 при эталоне 1,0.

При решении задачи прогнозирования в ходе экспериментального исследования нейронная сеть успешно восстанавливала отсутствующие пакеты данных (вплоть до 20 пакетов) со средней ошибкой 4,4 %.

Полученные результаты подтверждают применимость и эффективность предлагаемых подходов на основе нейросетевых технологий.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00660 с использованием вычислительного оборудования ЦКП «Цифровое машиностроение».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gavish N., Gutiérrez T., Webel S., Rodríguez J., Peveri M., Bockholt U., Tecchia F. Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks // *Interactive Learning Environments*. 2015. V. 23. № 6. P. 778–798.

2. Pallavicini F. Argenton L., Toniuzzi N., Aceti L., Mantovani F. Virtual reality applications for stress management training in the military // *Aerospace medicine and human performance*. 2016. V. 87. № 12. P. 1021–1030.

3. Захаров А.Ю., Обухов А.Д., Дедов Д.Л. Постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы имитации изолирующих дыхательных аппаратов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2019. № 3. С. 412–422

4. Obukhov A. Dedov D., Siukhin A., Arkhipov A. Mobile Simulator Control System for Isolating Breathing Apparatus of Software-Hardware Platform // *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2020. V. 14. № 08. P. 32–42.

5. Obukhov A., Dedov D., Arkhipov A. Determination of the design parameters of the simulator breathing apparatus for training complexes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. V. 709. № 2. P. 022090.

6. Kamalesh S., Ganesh Kumar P. Data aggregation in wireless sensor network using SVM-based failure detection and loss recovery // *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2017. V. 29. № 1. P. 133–147.

7. Cao W., Wang X., Ming Z., Gao J. A review on neural networks with random weights // *Neurocomputing*. 2018. V. 275. P. 278–287.

8. Bataineh M., Marler T. Neural network for regression problems with reduced training sets // *Neural networks*. 2017. V. 95. P. 1–9.

9. Lahmiri S., Bekiros S. Cryptocurrency forecasting with deep learning chaotic neural networks // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2019. V. 118. P. 35–40.

10. Данилов А.Д., Мугатина В.М. Решение задачи оптимизации регрессионного тестирования с использованием нейросетевого подхода // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020. Т. 8. № 1. С. 35–36.

11. Pednault E. Transform regression and the kolmogorov superposition theorem // *Proceedings of the 2006 SIAM International Conference on Data Mining. – Society for Industrial and Applied Mathematics*. 2006. P. 35–46.

12. He Z., Chen X., Fang Z., Sheng T., Xia S. Fusion estimation of respiration rate from ECG and PPG signal based on Android platform and wearable watch. *2nd IET International Conference on Biomedical Image and Signal Processing (ICBISP 2017)*, 2017.

13. Drigas A., Angelidakis P. Mobile applications within education: An overview of application paradigms in specific categories // *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*. 2017. V. 11. № 4. P. 17–29.

14. Agustine L., Muljono I., Angka P.R., Gunadhi A., Lestariningsih D., Weliamto W.A. Heart rate monitoring device for arrhythmia using pulse oximeter sensor based on android // *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM)*. IEEE. 2018. P. 106–111.

15. Nagel M.W., Suggett J.A., Mitchell J.P. Method for Recording Inhalation Waveforms from a Valved Holding Chamber and Comparison of Potential Inhalation Techniques on Inspired Volume // *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery*. 2019. V. 32. № 3. P. A34.

**Для цитирования:** Обухов А.Д., Дедов Д.Л., Зверев М.В. Обработка данных в мобильной системе имитации изолирующих дыхательных аппаратов на основе нейросетевых технологий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 92–101.

## **DATA PROCESSING IN A MOBILE SYSTEM OF IMITATION OF ISOLATING RESPIRATORY EQUIPMENT BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES**

A.D. OBUKHOV, Cand. Sc., D.L. DEDOV, Cand. Sc., M.V. ZVEREV, undergraduate

Tambov State Technical University, 106, st. Soviet, 392000, Tambov,  
Russian Federation, e-mail: obuhov.art@gmail.com

The paper considers the problem of information processing in the subsystem of the training complex – a mobile system for imitation of self-contained breathing apparatus. Two problems have been identified: the need of determine new calculation formulas after replacing the system components with analogs and predicting values in case of loss of data packets during their wireless transmission. To solve them, data processing algorithms have been developed based on neural network technologies, which make it possible to automate search for calculation formulas during the transition from system components to analogs and reduce the number of data packet losses by predicting missing values. Experimental studies have confirmed the adequacy and effectiveness of the proposed algorithms. The use of neural networks in solving information processing problems has improved the accuracy of this process.

*Keywords:* neural networks, data processing, missing values restoration, forecasting, training complexes, simulation systems, mobile development.

### **ACKNOWLEDGMENTS**

The study was carried out with the financial support of the RFBR within the framework of scientific project No. 19-07-00660 using the computing equipment of Center for Collective Use "Digital Engineering".

### **REFERENCES**

1. Gavish N., Gutiérrez T., Webel S., Rodríguez J., Peveri M., Bockholt U., Tecchia F. Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. *Interactive Learning Environments*. 2015. V. 23. No. 6, pp. 778–798.

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (9), 2021*

2. Pallavicini F., Argenton L., Toniuzzi N., Aceti L., Mantovani F. Virtual reality applications for stress management training in the military. *Aerospace medicine and human performance*. 2016. V. 87. No. 12, pp. 1021–1030.
3. Zakharov A.Yu., Obukhov A.D., Dedov D.L. Formulation of the problem of structural-parametric synthesis of a system for imitation of self-contained breathing apparatus. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. No. 3, pp. 412–422. (In Russian).
4. Obukhov A., Dedov D., Siukhin A., Arkhipov A. Mobile Simulator Control System for Isolating Breathing Apparatus of Software-Hardware Platform. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2020. V. 14. No. 08, pp. 32–42.
5. Obukhov A., Dedov D., Arkhipov A. Determination of the design parameters of the simulator breathing apparatus for training complexes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. V. 709. No. 2, pp. 022090.
6. Kamalesh S., Ganesh Kumar P. Data aggregation in wireless sensor network using SVM-based failure detection and loss recovery. *Journal of ExpErimEntal & thEorEtical artificial intElligEncE*. 2017. V. 29. No. 1, pp. 133–147.
7. Cao W., Wang X., Ming Z., Gao J. A review on neural networks with random weights. *Neurocomputing*. 2018. V. 275, pp. 278–287.
8. Bataineh M., Marler T. Neural network for regression problems with reduced training sets. *Neural networks*. 2017. V. 95, pp. 1–9.
9. Lahmiri S., Bekiros S. Cryptocurrency forecasting with deep learning chaotic neural networks. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2019. V. 118, pp. 35–40.
10. Danilov A.D., Mugatina V.M. Solution of the optimization problem for regression testing using a neural network approach. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii*. 2020. V. 8. No. 1, pp. 35–36. (In Russian).
11. Pednault E. Transform regression and the kolmogorov superposition theorem. *Proceedings of the 2006 SIAM International Conference on Data Mining. – Society for Industrial and Applied Mathematics*. 2006, pp. 35–46.
12. He Z., Chen X., Fang Z., Sheng T., Xia S. Fusion estimation of respiration rate from ECG and PPG signal based on Android platform and wearable watch. *2nd IET International Conference on Biomedical Image and Signal Processing (ICBISP 2017)*, 2017.
13. Drigas A., Angelidakis P. Mobile applications within education: An overview of application paradigms in specific categories. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2017. V. 11. No. 4, pp. 17–29.
14. Agustine L., Muljono I., Angka P.R., Gunadhi A., Lestariningsih D., Weliamto W.A. Heart rate monitoring device for arrhythmia using pulse oximeter sensor based on android. *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM)*. IEEE. 2018, pp. 106–111.
15. Nagel M.W., Suggett J.A., Mitchell J.P. Method for recording inhalation waveforms from a valved holding chamber and comparison of potential inhalation techniques on inspired volume. *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery*. 2019. V. 32. No. 3. P. A34.

Поступила в редакцию/received: 16.10.2020; после рецензирования/revised: 26.10.2020;  
принята/accepted 05.11.2020

**МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА  
В РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Н.М. ПУЗЫРЕВ, канд. техн. наук, Д.В. МАРТЫНОВ, канд. техн. наук,  
Н.Б. БАРБАШИНОВА, доцент

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: puzyrevdpo@rambler.ru

© Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б., 2021

При решении задач, направленных на повышение уровня производственной безопасности в эргатических системах, приходится учитывать достаточно большое количество факторов, образующих сложную взаимосвязанную структуру. Для решения такого вида задач предлагается и обосновывается возможность использования различных методов системного анализа. Морфологический метод анализа сложных систем можно считать наиболее эффективным способом, который позволяет учитывать большое количество исходных параметров. В качестве примера рассмотрено решение задачи по снижению уровня звукового давления до нормативного уровня в производственном помещении. Предложен пример расчета критерия соответствия нормативному уровню безопасности при решении задачи снижения уровня звукового воздействия на персонал.

*Ключевые слова:* системный анализ, морфологический метод, производственная безопасность.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-102-110**

**ВВЕДЕНИЕ**

Опасные инциденты на производственных объектах, электростанциях, в космической отрасли и других сферах человеческой деятельности, происходившие в последние десятилетия, потребовали серьезных теоретических исследований, создания количественных методов анализа и оценки уровня безопасности, основанных на построении структурных схем надежности, разработки методик обеспечения безопасности для предотвращения техногенных и иных катастроф и происшествий. В настоящее время назрела необходимость проведения дальнейших исследований в этой области и систематизации уже известных результатов для совершенствования системы обеспечения и управления безопасностью во всех отраслях промышленного производства, в том числе в металлообработке, строительстве, энергетике. Наличие теоретических, методологических разработок и созданных на их основе инженерных методов позволяет разработать меры по обеспечению безопасности еще на этапе их проектирования промышленных технологий, а также при анализе существующих технологий и средств производства.

При решении таких задач приходится учитывать достаточно большое количество элементов, факторов, условий, ограничений, составляющих сложную взаимосвязанную структуру обеспечения должного уровня безопасности, без системного анализа которой невозможно достичь требуемого результата. Системный анализ как научный метод познания представляет собой последовательность действий по установлению структурных связей между элементами исследуемых сложных

систем, в том числе таких, которые помогут обеспечить требуемый, достаточный уровень безопасности технических устройств, технологических процессов, безопасность персонала, как при их проектировании, так и в процессе эксплуатации [1]. Системный анализ включает в себя совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений по проблемам производственной безопасности, под которой здесь понимается отсутствие недопустимого риска, связанного с причинением вреда жизни или здоровью персонала и (или) окружающей среде.

В решении практических задач производственной безопасности можно применять различные методы системного анализа. *Метод экспертных оценок* характерен тем, что в процессе принятия решений выбор факторов, параметров, от которых зависит уровень безопасности, приходится осуществлять в условиях неопределенности в связи с наличием показателей, не поддающихся строгой количественной оценке. В этом случае все процедуры и методы направлены на поиск альтернативных вариантов решения проблемы, выявление масштабов неопределенности по каждому из вариантов и их сопоставление по тем или иным критериям эффективности. Для этого эксперты, специалисты готовят или рекомендуют варианты решения, руководствуясь совокупностью имеющихся элементов системы и их связей. При этом количественные показатели, параметры отдельных элементов, входящих в систему, их граничные условия принимаются на основе экспериментальных или лабораторных исследований процесса либо используются уже известные параметры аналогичных систем, средств индивидуальной и коллективной защиты от опасных и вредных производственных факторов. Принятие окончательных вариантов решения поставленной задачи остается в компетенции соответствующего эксперта, должностного лица или нескольких ответственных лиц. Однако это нередко представляется затруднительным, так как перечень вариантов решений может быть достаточно обширным. В таких случаях необходимо применить метод систематического исследования всех возможных вариантов анализируемого объекта, вытекающих из закономерностей его строения (т.е. морфологии).

В основе *морфологического метода* системного анализа лежит упорядочение процесса выдвижения и рассмотрения различных вариантов решения задачи [2]. Основной идеей метода является создание системности, упорядоченности в поиске наибольшего числа возможных вариантов решения поставленной проблемы путем комбинирования основных структурных элементов системы или их признаков [3, 4].

Суть метода состоит в том, что в системе выделяют несколько значимых признаков (структурных или функциональных). Каждый из них может характеризовать какой-либо параметр или свойство системы, от которых зависит решение проблемы. По каждому выделенному признаку составляют перечень его различных вариантов-альтернатив. Признаки с альтернативами располагают в таблицу – «морфологический ящик» или составляют матрицу. Перебирая всевозможные сочетания этих альтернатив, можно выявить новые варианты решения поставленной задачи.

Морфологический метод системного анализа сложных систем можно считать наиболее эффективным способом решения задач, в которых приходится учитывать множество исходных параметров. Он применим и в случаях, когда нужно получить нетрадиционные, оригинальные решения.

Идеи современного морфологического метода были впервые опробованы в XIII веке монахом Раймундом Луллием, создателем так называемой «логической машины», заложившим основы комбинаторики. Вторую жизнь методу дал Фриц Цвикки – известный швейцарский астрофизик, работавший в США в середине XX века. Используя свой метод, Ф. Цвикки смог генерировать внушительное количество оригинальных решений для задач ракетостроения. Название метода – «морфологический» – иногда заменяют термином «метод Цвикки». В настоящее время морфологический метод широко применяется в различных областях производственной деятельности. Отдельным его направлением является теория решения изобретательских задач (ТРИЗ Г.С. Альтшуллера).

## **ЦЕЛИ И МЕТОДЫ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Морфологический метод, основной идеей которого является упорядочение процесса выдвижения и рассмотрения различных вариантов решения практических, прикладных задач, предлагается использовать, в частности, применительно к техническим системам при решении таких проблем, как проектирование, создание или анализ способов, технологий, устройств по обеспечению или повышению уровня безопасности в сфере производства.

Основными преимуществами морфологического метода анализа считаются равноценность всех элементов анализируемого объекта, максимальная четкость формулировки поставленной задачи, снятие ограничений в анализе элементов исследуемого объекта, возможность получения новых и (или) развития уже имеющихся идей.

Рассмотрим такую важную в производственной сфере задачу, как снижение уровня звукового давления (уровня шума) на производственном участке металлообработки, приведение уровня шума к установленным нормам. Под шумом понимают любой звук, который может вызвать снижение остроты или потерю слуха, быть вредным для здоровья. Воздействие шумового фактора на человека зависит от его интенсивности, спектрального состава, временных характеристик и продолжительности действия. Измерение и гигиеническая оценка шума, а также профилактические мероприятия проводятся в соответствии с руководством Р 2.2.4/2.1.8-96 «Гигиеническая оценка физических факторов производственной и окружающей среды». В число нормативных документов входят также Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки», утвержденные Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г. № 36. Они устанавливают предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах с учетом напряженности и тяжести трудовой деятельности не более 80 дБ. Межгосударственный стандарт ГОСТ 12.1.003-2014 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности» устанавливает принципы обеспечения безопасности и сохранения здоровья работников при воздействии на них шума в нормальных условиях рабочего процесса и общие требования к оценке этого воздействия.

Согласно ГОСТ 12.1.029-80 «ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация» для снижения уровня шума могут применяться такие основные методы коллективной защиты, как уменьшение шума в источнике его возникновения, изменение направленности излучения звука, рациональная планировка предприятия, цеха, участка, рабочего места, акустическая обработка помещений, уменьшение шума

на пути его распространения. ГОСТ 31287-2005. «Шум. Руководство по снижению шума в рабочих помещениях акустическими экранами» устанавливает акустические и эксплуатационные требования, которые должны быть согласованы между поставщиком/изготовителем и потребителем акустических экранов.

Для защиты работников от шума используются средства индивидуальной защиты в соответствии с такими нормативными документами, как ГОСТ Р ЕН 13819-2-2011 «Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органа слуха. Акустические методы испытаний», ГОСТ 12.4.051-87 «ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов слуха. Общие технические условия и методы испытаний» и др.

Суть морфологического метода заключается в том, что сначала выделяют ряд характерных морфологических признаков (вариантов) рассматриваемой технической системы. Причем решения проблемы безопасности требует комплексного подхода с учетом экономических затрат, экологических, эргономических и прочих показателей.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

При решении задачи снижения уровня звукового воздействия на рабочем месте, например станочника, сварщика, элементами системы, характеризующими условия труда в совокупности их связей, являются:

нормативно-правовая документация, регламентирующая допустимые уровни звукового давления на рабочем месте: предельные уровни шума (для постоянных шумов), уровни звука в дБА, которые используются для ориентировочной оценки постоянного и непостоянного шума без учета частотных характеристик;

источники звукового давления – оборудование, рабочие инструменты, отражательные поверхности конструкций цеха (стен, потолков, перегородок), резонирующие поверхности обрабатываемых конструкций;

количественные характеристики шума, звукового давления – спектральные характеристики шума, уровень шума;

способы защиты – шумопоглощение, шумоизоляция, защита расстоянием и др.;

устройства защиты – специальные шумопоглощающие экраны, покрытия пола, стен, потолка, перегородок, шумоизолирующие экраны;

средства индивидуальной защиты (наушники, звукопоглощающие шлемы, спецодежда);

замена, модернизация технологического процесса, оборудования;

организационные мероприятия – сокращение длительности воздействия звукового давления на организм работающего (перерывы в работе, сокращенный рабочий день);

показатели экономической эффективности принимаемых решений;

показатели эргономичности, экологической безопасности и др.

С учетом каждого из элементов системы составляется перечень возможных вариантов (альтернатив) решения поставленной задачи. Далее все альтернативные варианты перебирают, составляя из них различные возможные сочетания. Таким образом, формулируются новые варианты решения задачи. При этом расчет строится на том, что в поле зрения могут попасть варианты, которые ранее не рассматривались. Признаки располагают в форме таблицы, которую называют «морфологическим

ящиком», матрицей. Ее можно назвать также поисковым полем. Таким образом, по своей сути морфологический метод обеспечивает системный подход в области творческого решения прикладных задач.

Морфологический метод решения задачи включает следующие этапы:

выделение всех значимых для каждого из вариантов решения задачи параметров (факторов);

оценивание ранга и шкалы для каждого из параметров;

проведение экспертной оценки в баллах или других оценочных параметрах значимости каждого из факторов в пределах выбранной шкалы;

сложение величин экспертных оценок по всем параметрам и определение по сумме баллов наиболее подходящего варианта.

Недостатком метода является то, что при рассмотрении возможных альтернатив решения поставленной задачи перечень которых может быть достаточно обширным, возможны трудности с выбором оптимального варианта.

Для сложных объектов, имеющих большое число элементов, морфологическая таблица (матрица) может быть достаточно громоздкой (например, в виде трехмерной матрицы). При этом возникает необходимость рассмотрения большого числа вариантов, часть которых оказывается лишённой практического смысла, что повышает трудоемкость метода. Применение его рационально для несложных объектов и в тех случаях, когда возможно найти новую идею за счет оптимальной комбинации известных решений. В более сложных случаях целесообразно использовать математические методы решения матричных уравнений.

В качестве примера рассмотрим решение задачи по снижению уровня звукового давления до нормативного уровня в производственном помещении. Для этого формулируем возможные варианты решения: шумоизоляция, шумопоглощение, перепланировка помещения, акустическая обработка помещения. Этот перечень далеко не полный, его можно продолжать. Рассмотрим конструктивные варианты решения, т.е. материалы, виды конструкций, места их размещения или установки. В их числе могут быть шумоизоляционные панели, минеральная вата, шумоизоляционная или шумопоглощающая мастика, а также воздушная прослойка, а также другие материалы и устройства. При этом шумоизоляционные панели, так же, как и разновидности минеральной ваты, могут быть выбраны из номенклатуры изделий, выпускаемых специализированными предприятиями. Все эти варианты заносим в таблицу, представляющую собой морфологическую матрицу.

Таблица морфологического анализа снижения уровня звукового давления при сочетании вариантов

Конструктивные варианты	Возможные варианты решения			
	Шумоизоляция	Шумопоглощение	Перепланировка помещения	Акустическая обработка
Материал	A1 – Воздушная прослойка	A2 – Минвата	A3 – Панель шумоизоляционная	A4 – Мастика шумопоглощающая
Конструкция	B1 – Стационарная	B2 – Панель подвесная	B3 – Перегородка	B4 – Нанесение распылением
Место установки	V1 – Пол и стены	V2 – Потолок	V3 – Пол	V4 – Стены

Общее число теоретически возможных вариантов решения  $N$  равно произведению чисел элементов в каждой строке таблицы. В данном случае  $N = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$ . Самой непростой частью работы является выбор и анализ полученных вариантов. Такими вариантами могут, например, быть:

1) материал – минеральная вата (A2), конструкция – стационарная (B1), место установки – стены (B4); запишем это в виде  $A2 \cdot B1 \cdot B4$ ;

2) материал – мастика (A4), конструкция – нанесение распылением (B4), место установки – потолок (B2); запишем как  $A4 \cdot B4 \cdot B2$ ;

3) материал – воздушная прослойка (A1), конструкция – панель подвесная (B2), место установки – пол (B3);  $A1 \cdot B2 \cdot B3$ .

Могут быть и другие варианты. Затем необходимо оценить эффективность каждого из выбранных вариантов и провести их сравнительную оценку для выбора наиболее предпочтительного.

Расчет величин снижения уровня звукового давления  $\Delta L$  для различных вариантов можно проводить по известным методикам [5–9].

Максимально возможное снижение  $\Delta L$  в рабочей точке помещения при его акустической обработке в виде установки шумопоглотителей можно вычислить по формуле

$$\Delta L_{\max} = 10 \lg (1 + Q).$$

Здесь величина  $Q$  зависит от формы помещения (соразмерного, плоского или длинного) и может быть определена по известным данным [9].

Максимальное снижение уровня звукового давления  $\Delta L$ , дБ, на рабочем месте, расположенном в зоне отраженного звука, при установке шумопоглощающих конструкций определяется по формуле

$$\Delta L = 109 \lg [B_1 \psi / B \psi_1],$$

где  $\psi$  и  $\psi_1$  – коэффициенты, определяемые для случаев до и после установки шумопоглощающих конструкций.

Постоянная  $B_1$  рассчитывается по формуле

$$B_1 = (A_1 + \Delta A) / (1 - \alpha_1),$$

где  $A_1$  – значение шумопоглощения необлицованных ограждающих поверхностей,  $\text{м}^2$ :  $A_1 = \alpha(S_{\text{огр}} - S_{\text{обл}})$ , где  $\alpha$  – средний коэффициент шумопоглощения помещения до установки шумопоглощающих конструкций:  $\alpha = B / (B + S_{\text{огр}})$ ;  $S_{\text{огр}}$  – общая площадь ограждающих поверхностей помещения,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{обл}}$  – площадь шумопоглощающей облицовки,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta A$  – значение дополнительного шумопоглощения, вносимого облицовкой и штучными шумопоглотителями:  $\Delta A = a_{\text{обл}} S_{\text{обл}} + A_{\text{шт}} n_{\text{шт}}$ ;  $a_{\text{обл}}$  – реверберационный коэффициент шумопоглощения облицовки в октавной полосе частот;  $A_{\text{шт}}$  – значение шумопоглощения штучного шумопоглотителя,  $\text{м}^2$ ;  $n_{\text{шт}}$  – количество штучных шумопоглотителей;  $\alpha_1$  – средний коэффициент шумопоглощения помещения после установки шумопоглощающих конструкций:  $\alpha_1 = (A_1 + \Delta A) / S_{\text{огр}}$ .

Расчетами получено, что с помощью шумопоглощающих облицовок и конструкций можно обеспечить снижение шума в помещении на  $\Delta L = 8 \dots 10$  дБ.

Звукопоглощающие конструкции следует размещать на потолке и на верхних частях стен. Звукопоглощающие конструкции целесообразно размещать отдельными участками или полосами. На частотах ниже 250 Гц эффективность звукопоглощающей облицовки увеличивается при ее размещении в углах помещения [10]. Штучные шумопоглотители применяются в тех случаях, когда требуемое снижение  $\Delta L_{\text{тр}}$  шума в расчетных точках превышает 1...3 дБ не менее чем в трех октавных полосах или 5 дБ хотя бы в одной из полос. Возможен и такой путь решения задачи по установлению величины  $\Delta L$ , как использование экспериментальных данных, приведенных в литературных источниках, по применению тех или иных устройств, приемов, материалов и т.д.

После выполнения расчетов величины  $\Delta L$  из всех выбранных вариантов выбирается тот, который отвечает критерию соответствия нормативному уровню безопасности. Общее математическое выражение этого критерия можно представить в виде следующей формулы:

$$K_{CH} = \frac{L_{\Phi} - \Delta L}{L_0},$$

где  $K_{CH}$  – критерий соответствия нормативным требованиям;  $L_{\Phi}$  – фактический (до акустической обработки) показатель уровня звукового давления, дБ;  $\Delta L$  – величина, показывающая, насколько снизится уровень звукового давления в результате проведенного мероприятия, дБ;  $L_0$  – нормативный показатель уровня звукового давления, дБ.

Идеальным является уровень безопасности при  $K_{CH} = 0$ , но в любом случае он должен отвечать условию  $K_{CH} \leq 1$ .

При системном подходе к оценке степени опасности (безопасности) эргатических систем критерии, оценивающие соответствие фактического уровня безопасности нормативному, должны рассматриваться во взаимосвязи с технико-экономическими, экологическими и другими показателями. Это является предметом отдельного рассмотрения и решения задачи с применением морфологического метода системного анализа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Морфологический метод системного анализа сложных систем можно считать наиболее эффективным способом решения задач улучшения условий труда, повышения уровня производственной безопасности при необходимости учета множества исходных параметров. Его можно использовать и в тех случаях, когда требуется получить оригинальные решения. Рассмотренное в качестве примера решение задачи по снижению звукового давления в производственном помещении до нормативного уровня носит практический, прикладной характер. Эту методику можно применять в инженерной практике. Предложенный пример расчета критерия соответствия достигнутых результатов нормативному уровню безопасности при решении задачи снижения уровня звукового воздействия на персонал позволяет оценить эффективность принимаемых решений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2003. 512 с.

2. Мухин В.И., Малинин В.С. Исследование систем управления. М: Экзамен, 2003. 384 с.
3. Антонов А.В. Системный анализ: учебник для вузов. М: Высшая школа, 2004. 454 с.
4. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: учеб. пособие для вузов / под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М.: Высшая школа, 2004. 616 с.
5. Средства защиты в машиностроении: Расчет и проектирование: справочник / под ред. С.В. Белова. М.: Машиностроение, 1989. 368 с.
6. Борьба с шумом на производстве: справочник / под ред. Е.Я. Юдина. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
7. Справочник проектировщика: Защита от шума / под ред. Е.Я. Юдина. М.: Стройиздат, 1974. 134 с.
8. Руководство по расчету и шумоглушению вентиляционных установок. М.: Книга по требованию, 2013. 55 с.
9. Руководство по расчету и проектированию шумоглушения в промышленных зданиях. М.: Книга по требованию, 2014. 130 с.
10. СНиП 23-03-03. Защита от шума. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 55 с.

**Для цитирования:** Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б. Морфологический метод системного анализа в решении прикладных задач производственной безопасности // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 102–110.

## **MORPHOLOGICAL METHOD OF SYSTEM ANALYSIS IN SOLVING APPLIED PROBLEMS OF INDUSTRIAL SAFETY**

N.M. PUZYREV, Cand. Sc., D.V. MARTYNOV, Cand. Sc.,  
N.B. BARBASHINOVA, Lecturer

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: puzyrevdpo@rambler.ru

When solving problems aimed at improving the level of industrial safety in ergatic systems, it is necessary to take into account a fairly large number of factors that form a complex interconnected structure. To solve this type of problem, the possibility of using various methods of system analysis is proposed and justified. The morphological method of analysis of complex systems can be considered the most effective way in which a large number of initial parameters can be taken into account. As an example, the solution of the problem of reducing the sound pressure level to the standard level in the production room is considered. An example of calculating the criterion of compliance with the standard level of safety in solving the problem of reducing the level of sound impact on personnel is proposed.

*Keywords:* industrial safety, system analysis, morphological method.

## REFERENCES

1. Belov P.G. Sistemnyy analiz i modelirovaniye opasnykh protsessov v tekhnosfere: Uchebnoye posobiye dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy. [System analysis and modeling of hazardous processes in the technosphere: textbook for students of higher educational institutions]. Moscow: Akademiya, 2003. 512 p.
2. Mukhin V.I., Malinin V.S. Issledovaniye sistem upravleniya [Research of control systems]. Moscow: Ekzamen, 2003. 384 p.
3. Antonov A.V. Sistemnyy analiz: uchebnik dlya vuzov [System analysis. Textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 454 p.
4. Sistemnyy analiz i prinyatiye resheniy: slovar-spravochnik: ucheb. posobiye dlya vuzov [System analysis and decision making: Dictionary – reference book: textbook for universities] / ed. V.N. Volkova, V.N. Kozlova. Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 616 p.
5. Sredstva zashchity v mashinostroyenii: Raschet i proyektirovaniye: spravochnik [Means of protection in mechanical engineering: Calculation and design: reference book / ed. S.V. Belov]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 368 p.
6. The fight against noise in production: a reference book, ed. E.Ya. Yudin. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 400 p.
7. Borba s shumom na proizvodstve: spravochnik [The fight against noise in production: a reference book] / ed. by E.Ya. Yudin. Moscow: Stroizdat, 1974. 134 p.
8. Rukovodstvo po raschetu i shumoglusheniyu ventilyatsionnykh ustanovok [Guidelines for the calculation and noise suppression of ventilation units]. Moscow: Kniga po trebovaniyu, 2014. 130 p.
9. Guidelines for the calculation and design of noise suppression in industrial buildings [Rukovodstvo po raschetu i proyektirovaniyu shumoglusheniya v promyshlennykh zdaniyakh]. Moscow: Kniga po trebovaniyu, 2014. 130 p.
10. SNiP 23-03-03. Zashchita ot shuma [Noise protection]. Moscow: Gosstroy Rossii, FGUP TSPP, 2004. 55 p.

Поступила в редакцию/received: 02.11.2020; после рецензирования/ revised: 30.11.2020;  
принята/accepted 07.12.2020

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 1 (9), 2021**

**Online ISSN 2687-0029**

Редактор М.Б. Юдина  
Корректор А.В. Смирнов

---