

**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  
№ 3 (11), 2021**

**Print ISSN 2658-5030**

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: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 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>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид вольфрама.....	5
<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Алмаз-карбидный композит на основе меди.....	12
<i>Архаров А.П.</i> Способ переустановки заготовки в трехкулачковый механизированный патрон.....	20
<i>Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю.</i> Способы послойного синтеза металлических изделий.....	24
<i>Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р.</i> Температура резания при применении инструмента с многослойным покрытием.....	34

### ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Яблонев А.Л., Некрасова А.И.</i> Повышение эффективности и надежности ковшового элеватора скреперно-бункерной машины для уборки фрезерного торфа.....	44
<i>Горлов И.В.</i> Система анализа результатов испытаний на износ трибоэлементов торфяных машин.....	52

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Зоренко Д.А.</i> Моделирование лазерного раскроя стального проката.....	63
<i>Черемных С.В.</i> Устройство системы мониторинга инженерных конструкций для строительных объектов на высокогорных территориях.....	69
<i>Ахремчик О.Л.</i> Использование типовых программно-технических средств автоматизации при управлении уровнем в парогенераторе Калининской АЭС.....	79
<i>Яконовская Т.Б., Жигульская А.И.</i> Использование модели Брауна в анализе экспериментальных данных (компьютерная интерпретация).....	91
<i>Кемайкин В.К., Ланчев В.М., Смеловская А.А.</i> Выбор структуры автоматизированной системы резервирования, применяемой в технологии синхронной цифровой иерархии при проектировании сети обмена данными.....	103

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> Electrical contact properties of the material containing refractory components. Composite copper – tungsten carbide.....	5
<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> Electric contact properties of the material containing refractory components. Diamond-carbide composite based on copper.....	12
<i>Arkharov A.P.</i> Method for reinstalling a workpiece into a three-jaw mechanized chuck.....	20
<i>Kakorin D.D., Lavrentev A.Yu.</i> Methods of layer-by-layer synthesis of metal products.....	24
<i>Migranov M.Sh., Migranov A.M., Shekhtman S.R.</i> Cutting temperature when using a multi-coated tool.....	34

### TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Yablonev A.L., Nekrasova A.I.</i> Increasing the efficiency and reliability of the bucket elevator of the scraper-hopper machine for harvesting milled peat.....	44
<i>Gorlov I.V.</i> System for result analysis of wear test for triboelements of peat machines.....	52

### INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Zorenko D.A.</i> Simulation of laser cutting of rolled steel.....	63
<i>Cheremnykh S.V.</i> Installation of a monitoring system for engineering structures for construction projects in high-altitude areas.....	69
<i>Akhremchik O.L.</i> The using of automation typical soft and hardware tools for level control in steam generator of Kalinin nuclear power plant.....	79
<i>Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I.</i> Use of the Brown model in analysis of experimental data (computer interpretation).....	91
<i>Kemaykin V.K., Lanchev V.M., Smelovskaya A.A.</i> Selection of the structure of the automated backup system used in the synchronous digital hierarchy technology in the design of the data exchange network.....	103

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.31:620.22

## ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТУГОПЛАВКИЕ КОМПОНЕНТЫ. КОМПОЗИТ МЕДЬ – КАРБИД ВОЛЬФРАМА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. e-mail: iz2v@tvcom.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2021

Представлены результаты исследования основных электроконтактных характеристик композиционного порошкового материала на медной основе с различным содержанием карбида вольфрама. Удельное электросопротивление, твердость и электроэрозионный износ исследованных образцов представлены в абсолютных величинах и в сравнении с аналогичными характеристиками эталонного материала – электротехнической меди, в зависимости от состава композита, режимов его изготовления и полярности образца (образец-анод и образец-катод).

*Ключевые слова:* композиционный материал, медь, карбид вольфрама, электропроводность, электроэрозионный износ, температура спекания.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-5-11**

### ВВЕДЕНИЕ

Порошковая технология является перспективным способом создания конструкционных и функциональных материалов для изготовления изделий современной техники. Одно из направлений, где порошковые технологии практически безальтернативны, – изготовление электроконтактных материалов, которые должны сочетать в себе, с одной стороны, высокую проводимость, а с другой – высокую механическую прочность, механическую и электроэрозионную износостойкость. Совмещение таких трудносовместимых свойств возможно в порошковом композиционном материале.

Состав композиционного материала зависит от назначения электроконтактного устройства, для которого предназначается материал. В частности, для повышения электроэрозионной стойкости контакт-деталей в композиционный материал вводят тугоплавкие компоненты в виде чистых металлов или их химических соединений (карбидов, боридов, силицидов), углерод, графит [1–8].

В данной статье представлены результаты сравнительных испытаний на электроэрозионную износостойкость композиционного порошкового материала на основе меди, содержащего тугоплавкий компонент в виде карбида вольфрама  $W_2C$ . Конкретной целью является изучение влияния состава и технологических режимов изготовления образцов на их износостойкость в режиме электроэрозионного изнашивания. За эталон в сравнительных испытаниях принята электротехническая медь марки М1. Данная работа является продолжением исследований влияния функ-

циональных наполнителей на механические и электрические свойства электроконтактных материалов на основе меди [1, 3, 7, 9].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые образцы композитов получены прессованием смеси порошков с массовым содержанием карбидов 2, 5 и 10 %, остальное медь. Компактирование заготовок образцов производилось под давлением 700 МПа при комнатной температуре в цилиндрической пресс-форме. Дальнейшее спекание образцов проводилось в вакууме  $10^{-4}$  мм рт. ст. в течение 1 ч при температурах 850, 900, 950 и 1 000 °С ( $\pm 10$  °С). Плотность образцов составляет 9,0...9,3 г/см<sup>3</sup>. Поскольку плотности меди и карбида вольфрама значительно различаются (табл. 1), массовые концентрации компонентов не всегда дают полное представление о составе материала. Приведем соответствующие объемные доли карбидов в образцах, %: 1; 2,2...2,7; 4,5...5,5. В табл. 1 указаны также некоторые характеристики компонентов композитов, важные с точки зрения их применения как материалов для электрических контактов.

Таблица 1. Характеристики порошковых материалов

Характеристика	Материал	
	Cu	W <sub>2</sub> C
Плотность, г/см <sup>3</sup>	8,92	15,8 [10]
Микротвердость, ГПа	0,055	13...22 [10]
Температура плавления, °С	1 083	2 780 [10]
Удельное сопротивление, $10^{-8}$ Ом·м	1,8	76 [10]

Методика и установка для оценки электроэрозионной износостойкости образцов описаны в патенте [11]. Образец из исследуемого материала в виде таблетки диаметром 20 мм и высотой 3...5 мм контактировал с контрольным образцом в виде зонда диаметром 1 мм из вольфрама. Максимальный коммутируемый заряд за одну коммутацию – 66 мКл. Для гашения вибрации контактов используется специальный фрикционный демпфер, гасящий энергию колебаний за счет трения. Нагрузка на контакт вольфрамового зонда с образцом прикладывалась с помощью разновесов и равнялась во всех описанных ниже экспериментах 0,5 Н.

Длительность одного испытания составляла 60 циклов коммутации. После испытаний измеряли линейный износ (глубину кратера на образце) с точностью 0,01 мм. Уменьшение длины вольфрамового зонда было незначительно, поэтому им пренебрегали.

В качестве характеристики износостойкости принята величина удельной эрозии (отношение объема удаленного материала к величине прошедшего через контакт электрического заряда).

Измерение удельного сопротивления опытных образцов производилось четырехзондовым методом [12]. Зонды были изготовлены из вольфрама, расстояние между зондами равнялось 1 мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав исследованных композитов, их физико-механические и электроконтактные характеристики представлены в табл. 2. Значения удельного электросопротивления и удельной эрозии приведены с доверительным интервалом, при

расчете которого использовался коэффициент Стьюдента для 95%-й доверительной вероятности. Даны величины удельной эрозии образцов при их положительной и отрицательной полярностях (образец – анод и катод соответственно).

Для всех образцов при отрицательной полярности (образец – катод) удельная эрозия меньше в 2...3 раза, чем при обратной полярности электродов.

Таблица 2. Состав и характеристики содержащих карбид вольфрама образцов, полученных при различных температурах спекания  $T_{сп}$

Характеристика	Состав			
	$T_{сп}, ^\circ\text{C}$	Cu+ +2 % W <sub>2</sub> C	Cu+ +5 % W <sub>2</sub> C	Cu+ +10 % W <sub>2</sub> C
Пористость, %	1 000	18	7	11
	950	12	12	17
	900	17	17	16
	850	16	14	15
Твердость индентирования $H$ при нагрузке на индентор 10 Н, МПа	1 000	566	716	794
	950	620	620	716
	900	566	650	650
	850	716	716	716
Удельное электро- сопротивление $\rho, 10^{-8}$ Ом·м	1 000	4,9±0,3	5,4±0,2	6,2±0,8
	950	3,9±0,5	5,5±0,7	7,1±1,2
	900	4,1±0,5	6,0±0,7	6,0±0,4
	850	3,9±0,7	5,2±0,7	6,8±0,8
Удельная эрозия $I, 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл (образец – анод)	1 000	9,3±1,2	8,5±0,3	8,8±0,2
	950	5,5±0,9	6,1±0,4	5,4±1,3
	900	5,2±0,1	5,2±0,2	5,4±0,6
	850	4,0±0,1	5,2±0,1	4,9±0,0
$I, 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл (образец – катод)	1 000	4,2±0,2	2,8±0,1	4,6±0,1
	950	2,0±0,1	2,6±0,1	2,5±0,1
	900	2,0±0,3	2,8±0,1	2,9±0,2
	850	1,8±0,1	3,2±0,4	3,0±0,7

Для исследованных карбидосодержащих материалов величина удельной эрозии (см. табл. 2) находится в пределах  $(2...10) \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Кл. Этот результат не противоречит известным литературным данным [13] по удельной эрозии медных образцов  $(10^{-12}...10^{-9})$  м<sup>3</sup>/Кл).

Для более наглядного сравнения с эталоном (медь марки М1) результаты испытаний приведены в виде относительных величин в табл. 3, где  $\sigma/\sigma_{Cu}$  и  $I/I_{Cu}$  – относительные электропроводность и удельная эрозия исследованных материалов по сравнению с эталоном. Твердость эталонного образца  $H = 716$  МПа. Удельное сопротивление  $\rho = 1,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Электроэрозионный износ эталонного образца в качестве анода  $I = (8,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Кл, в качестве катода  $I = (2,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Кл.

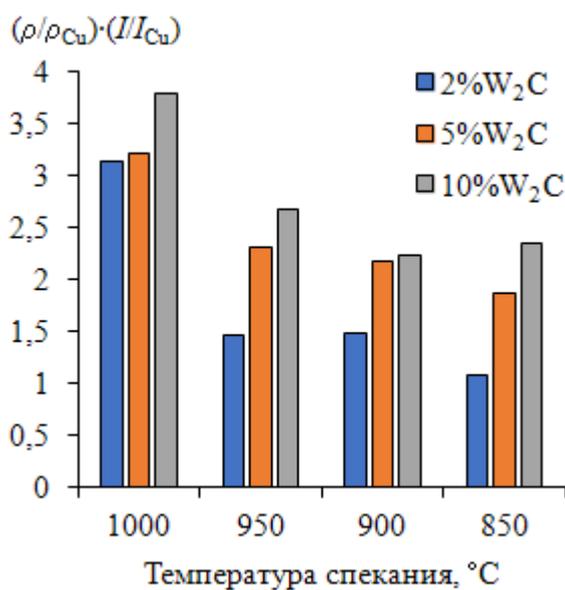
Таблица 3. Характеристики исследованных образцов в сравнении с эталоном

Характеристика	Состав	Cu+	Cu+	Cu+
	$T_{сп}, ^\circ C$	+2 % $W_2C$	+5 % $W_2C$	+10 % $W_2C$
$H/H_{Cu}$	1 000	0,79	1,00	1,11
	950	0,86	0,86	1,00
	900	0,79	0,91	0,91
	850	1,00	1,00	1,00
$\sigma/\sigma_{Cu}$	1 000	0,37	0,33	0,29
	950	0,46	0,33	0,25
	900	0,44	0,30	0,30
	850	0,46	0,35	0,26
$I/I_{Cu}$ анод (катод)	1 000	1,16 (1,83)	1,06 (1,22)	1,10 (2,00)
	950	0,67 (0,87)	0,76 (1,13)	0,67 (1,08)
	900	0,65 (0,87)	0,65 (1,22)	0,67 (1,26)
	850	0,50 (0,78)	0,65 (1,39)	0,61 (1,30)

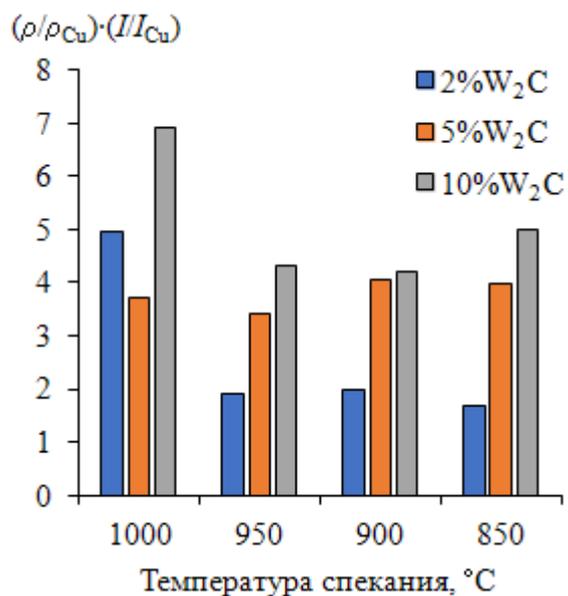
Как видно из табл. 3, электрическая проводимость исследованных материалов невысокая – 30...45 % от проводимости меди. Наибольшей электропроводностью (45 % от проводимости меди) обладают образцы, содержащие 2 % карбидов, спеченные при температурах ниже 1 000 °С. Проводимость порошкового композита определяется не только проводимостью компонентов и пористостью, но и состоянием поверхности гранул порошка [1]. Теоретическая модель двухкомпонентного порошкового материала [1] предсказывает для исследованных материалов проводимость в диапазоне 20...70 % от проводимости меди в зависимости от наличия оксидных пленок на поверхности гранул и степени их разрушения при прессовании и спекании композита.

Указанные выше образцы с содержанием 2 % карбида вольфрама имеют повышенную износостойкость (выше износостойкости меди в 1,5...2 раза при положительной полярности электрода и примерно в 1,2 раза – при отрицательной).

Очевидно, что качество электроконтактных материалов следует оценивать по комплексу их основных эксплуатационных характеристик. В режиме электроэрозийного изнашивания оптимальным сочетанием таких характеристик является малое удельное сопротивление и малый износ, поэтому за критерий сравнения исследованных материалов предложено принять произведение относительных величин  $(\rho/\rho_{Cu}) \cdot (I/I_{Cu})$ . Значения этого произведения представлены на рисунке. По величине принятого критерия в лучшую сторону выделяются материалы с содержанием 2 % карбида вольфрама, спеченные при температуре 850...950 °С.



(а)



(б)

Сравнение электроконтактных характеристик исследованных материалов:  
анод (а); катод (б)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическая оценка износостойкости композита в режиме электроэрозионного изнашивания, в отличие от проводимости материала, затруднительна по причине сложного характера процессов, протекающих в межэлектродном промежутке и на рабочей поверхности контакт-деталей. Поэтому экспериментальные результаты, приведенные в данной статье, будут полезны при выборе композиционного материала для электроконтактных устройств.

Как показали результаты исследований, введение карбида вольфрама в электроконтактный материал на медной основе повышает его износостойкость по сравнению с медью. Положительный эффект зависит как от процентного содержания карбида, так и от технологических параметров изготовления композита. Исследования в этом направлении целесообразно продолжить в поисках оптимальных параметров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Гершман И.С., Новоселова М.В., Харитонов Е.О. Порошковые материалы для электрических контактов // *Материаловедение*. 2007. № 8. С. 22–28.
2. Пименова Н.В. Разработка и исследование композиционного материала Cu-Cr для электрических контактов вакуумных дугогасительных камер // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2008. № 2. С. 66–69.
3. Измайлов В.В., Дроздова Е.И., Черногорова О.П., Потапова И.Н., Новоселова М.В., Екимов Е.А. Электроконтактные свойства композиционного материала с медной матрицей, армированной сверхупругим твердым углеродом // *Металлы*. 2015. № 3. С. 45–50.
4. Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Белецкий В.В., Николаев С.В., Кожурин А.Н., Кучинский М.Ю., Григорьева О.А. Микроструктура и свойства электроконтактного материала Cu-(ZnO/TiO<sub>2</sub>) // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 12. С. 88–93.

5. Еремина М.А., Ломаева С.Ф., Паранин С.Н., Демаков С.Л., Елсуков Е.П. Влияние способа компактирования на структуру и свойства объемных композитов  $\text{Cu} + \text{Cr}_3\text{C}_2$  // *Физика металлов и металловедение*. 2016. Т. 117. № 5. С. 530–537.

6. Еремина М.А., Трифонов И.С., Ломаева С.Ф., Тарасов В.В., Паранин С.Н., Заяц С.В. Структура и износостойкость нанокompозитов  $\text{Cu}-\text{Cr}_3\text{C}_2$  // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19. № 6. С. 107–115.

7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства композиционного алмазосодержащего медного материала // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 5. С. 25–29.

8. Королев А.П., Лоскутова А.Д. Исследование электрофизических свойств композита железо – карбид вольфрама // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2017. Т. 23. № 3. С. 535–540.

9. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид хрома // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2(10). С. 15–20.

10. Самсонов Г.В., Веницкий И.М. Тугоплавкие соединения (справочник). М.: Металлургия, 1976. 560 с.

11. Патент РФ 2265862. *Способ оценки электроэрозионной износостойкости материалов для электрических контактов* / Измайлов В.В., Новоселова М.В. Заявл. 05.04.2004. Опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34.

12. Радьков А. В., Малаханов А. А. Методы измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов. *Актуальные вопросы технических наук: материалы V Международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, февраль 2019 г.)*. СПб.: Свое издательство, 2019. С. 18–24. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/324/14799/> (дата обращения: 24.01.2020).

13. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия высокопрочных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид вольфрама // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 5–11.

## **ELECTRICAL CONTACT PROPERTIES OF THE MATERIAL CONTAINING REFRACTORY COMPONENTS. COMPOSITE COPPER - TUNGSTEN CARBIDE**

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22 Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: iz2v@tvcom.ru

The results of a study of the main electrical contact characteristics of a composite powder material based on a copper with different contents of tungsten carbide are presented. The electrical resistivity, hardness, and electrical erosive wear of the investigated samples are presented in absolute values and in comparison, with similar characteristics of the reference material – electrical copper – depending on the composition of the composite, the modes of its manufacture and the polarity of the sample (sample – anode and sample – cathode).

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 3 (11), 2021*

*Keywords:* composite material, copper, tungsten carbide, electrical conductivity, electroerosive wear, sintering temperature.

## REFERENCES

1. Izmailov V.V., Gershman I.S., Novoselova M.V., Kharitonov E.O. Powder materials for electrical contacts. *Materialovedeniye*. 2007. No 8, pp. 22–28. (In Russian).
2. Pimenova N.V. Development and research of a Cu-Cr composite material for electrical contacts of vacuum interrupting chambers. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosov*. 2008. No 2, pp. 66–69. (In Russian).
3. Izmailov V.V., Drozdova E.I., Chernogorova O.P., Potapova I.N., Novoselova M.V., Ekimov E.A. Electrical contact properties of a composite material with a copper matrix reinforced with superelastic solid carbon. *Metally*. 2015. No 3, pp. 45–50. (In Russian).
4. Zeer G.M., Zelenkova E.G., Beletsky V.V., Nikolaev S.V., Kozhurin A.N., Kuchinsky M.Yu., Grigorieva O.A. Microstructure and properties of electrocontact material Cu- (ZnO / TiO<sub>2</sub>). *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. V. 85. No 12, pp 88–93. (In Russian).
5. Eremina M.A., Lomaeva S.F., Pararin S.N., Demakov S.L., Elsukov E.P. Influence of the method of compacting on the structure and properties of bulk composites Cu + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2016. V. 117. No 5, pp. 530-537. (In Russian).
6. Eremina M.A., Trifonov I.S., Lomaeva S.F., Tarasov V.V., Pararin S.N., Zayats S.V. Structure and wear resistance of Cu-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> nanocomposites. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2016. V. 19. No 6, pp. 107–115. (In Russian).
7. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a composite diamond-containing copper material. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*. 2020. No 5, pp. 25–29. (In Russian).
8. Korolev A.P., Loskutova A.D. Investigation of the electrophysical properties of the iron - tungsten carbide composite. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. V. 23. No 3, pp. 535–540. (In Russian).
9. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper – chromium carbide. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 2 (10), pp. 15–20. (In Russian).
10. Samsonov G.V., Vinitskiy I.M. Tugoplavkiye soyedineniya (spravochnik). [Refractory compounds (reference book)]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 560 p.
11. RF patent 2265862. *Sposob otsenki elektroerozionnoy iznosostoykosti materialov dlya elektricheskikh kontaktov* [Method for assessing the electrical discharge wear resistance of materials for electrical contacts]. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Declared 05.04.2004. Published 10.12.2005, Bulletin No 34. (In Russian).
12. Radkov A.V., Malakhanov A.A. Methods of measuring the resistivity of semiconductor materials. Topical issues of technical sciences: materials of the V International scientific conference (St. Petersburg, February 2019). St. Petersburg: Svoye izdatelstvo, 2019, pp. 18–24. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/324/14799/> (date accessed: 24.01.2020).
13. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. Elektricheskaya eroziya silnotochnykh kontaktov i elektrodov [Electrical erosion of high current contacts and electrodes]. Moscow: Energiya, 1978. 256 p.

Поступила в редакцию/received: 02.05.2021; после рецензирования/revised: 17.06.2021;  
принята/accepted: 21.06.2021

## **ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТУГОПЛАВКИЕ КОМПОНЕТЫ. АЛМАЗ-КАРБИДНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ МЕДИ**

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет  
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. e-mail: iz2v@tvcom.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2021

Содержит результаты исследования основных электроконтактных характеристик композиционных порошковых материалов на медной основе с добавками карбидов хрома и вольфрама. Удельное электросопротивление, твердость и электроэрозионный износ исследованных образцов представлены в абсолютных величинах и в сравнении с аналогичными характеристиками эталонного материала – электротехнической меди, в зависимости от состава композита, режимов его изготовления и полярности образца (образца-анода и образца-катода).

*Ключевые слова:* композиционный материал, медь, карбид хрома, карбид вольфрама, электропроводность, электроэрозионный износ, температура спекания.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-12-19**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Данная статья продолжает серию публикаций авторов по результатам исследования электроконтактных свойств композитов на основе меди с добавками тугоплавких компонентов [1–5].

Порошковые технологии позволяют вплотную приблизиться к созданию материалов с требуемыми эксплуатационными свойствами благодаря практически аддитивному характеру этих свойств. Применительно к электроконтактным материалам набор желательных эксплуатационных свойств зависит от назначения контакт-деталей, для изготовления которых предназначен материал.

Многие требования универсальны для всех электроконтактных материалов. Так, единым требованием является высокая проводимость и малое контактное электросопротивление. Желательна и высокая теплопроводность материала, способствующая отводу джоулева тепла из зоны контакта. В металлах, как известно, эти два свойства – высокая электро- и теплопроводность – сочетаются (закон Видемана – Франца). Для материалов для разрывных контактов дополнительными требованиями являются высокая электроэрозионная износостойкость и стойкость к свариванию. Не следует забывать и о механическом изнашивании, которое в той или иной степени присутствует в электроконтактных соединениях. Стойкость материалов к механическому изнашиванию можно оценить по величине твердости материала: чем она выше, тем, как правило, меньше механическая составляющая износа контакт-деталей.

По проводимости среди электроконтактных материалов лидируют серебро и медь – металлы с наименьшим удельным сопротивлением. Они широко применяются в самых различных электроконтактных соединениях. Их общими недостатками является невысокая механическая прочность, склонность к свариванию и к образованию плохо

проводящих пленок на рабочей поверхности контакт-деталей. У серебра к этим недостаткам добавляется сравнительно высокая стоимость и дефицитность.

По электроэрозионной стойкости среди чистых металлов лидирует вольфрам. К его достоинствам можно отнести также стойкость к свариванию и высокую твердость. При этом у вольфрама есть и существенные недостатки: достаточно высокое удельное электросопротивление, склонность к образованию оксидных пленок на поверхности и плохая обрабатываемость.

Помимо чистых металлов, в состав композитов для изготовления электрических контактов включают их химические соединения, например оксиды. Имеется положительный опыт применения карбидов тугоплавких металлов в качестве компонентов электроконтактных композитов [6–10]. Карбиды обладают целым комплексом свойств, желательных для электроконтактных материалов: высокой температурой плавления, уникальной твердостью, коррозионной стойкостью, металлическим характером проводимости. Например, по критерию электроэрозионной стойкости (видоизмененный критерий Палатника):

$$Pa = T_{пл} \sqrt{\lambda c_{уд} \rho}$$

карбиды вольфрама  $W_2C$  и  $WC$  немного уступают меди и не уступают серебру. Для карбидов  $Pa \approx 30$  МДж/с<sup>0,5</sup>м<sup>2</sup>, для меди  $Pa \approx 41$  МДж/с<sup>0,5</sup>м<sup>2</sup>, для серебра  $Pa \approx 31$  МДж/с<sup>0,5</sup>м<sup>2</sup> [11]. (В формуле использованы обозначения:  $T_{пл}$  – температура плавления материала;  $\lambda$  – теплопроводность;  $c_{уд}$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность.)

Еще одним широко применяемым материалом для различных по назначению, конструкции и режимам работы электроконтактных устройств является графит. При всех неоспоримых преимуществах графита как электроконтактного материала его существенные недостатки – невысокие твердость и прочность – становятся критическими для разрывных контактов, в которых контакт-детали испытывают циклические ударные нагрузки. В работе [12] предложено использовать другую аллотропную модификацию углерода (алмаз в виде мелкодисперсного порошка) и приведены аргументы в пользу такой замены.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом вышеизложенного объектом данного исследования были выбраны композиты, предназначенные для разрывных электрических контактов и изготовленные по порошковой технологии на основе медной матрицы с добавлением тугоплавких компонентов. В качестве последних выбраны карбиды тугоплавких металлов (вольфрама и хрома) и углерод в виде мелкодисперсного алмазного порошка (размер частиц 8...12 мкм).

Исследуемые образцы композитов получены прессованием смеси порошков с массовым содержанием 2 % алмазного порошка и 2 % карбида, остальное медь. Компактирование заготовок образцов производилось под давлением 700 МПа при комнатной температуре в цилиндрической пресс-форме. Дальнейшее спекание образцов проводилось в вакууме  $10^{-4}$  мм рт. ст. в течение 1 ч при температурах 850, 900, 950 ( $\pm 10$ ) °С.

Сравнительные испытания образцов проводили на установке [13] в режиме импульсного разряда. Образцы из исследуемых материалов в виде таблеток диаметром 14 мм и высотой 3...4,5 мм контактировали с контробразцом – зондом из вольфрамовой

проволоки диаметром 1 мм. В качестве эталона для сравнительных испытаний использован монолитный образец из меди марки М1.

Усилие нажатия в контакте создавалось с помощью разновесов и равнялось во всех экспериментах 0,5 Н. Для устранения вибрации контактов в установке используется фрикционный демпфер. Источником коммутируемой электрической энергии в установке служит емкостный накопитель, максимальная величина коммутируемого заряда составляет 66 мКл за одну коммутацию. Продолжительность испытаний – 60 циклов коммутации.

После окончания испытания образца измеряли объем изношенного материала по диаметру и глубине кратера. Диаметр измеряли под микроскопом, глубину – с помощью часового индикатора с погрешностью 0,01 мм. За нулевой уровень отсчета глубины кратера принималась исходная поверхность образца; образовавшиеся вокруг кратера наплывы материала не учитывались. Таким образом, общий объемный износ измеряли как результат испарения и переноса материала.

Как известно, величина электроэрозионного износа зависит от полярности электрода, поэтому испытания каждого материала проводили при положительной полярности образца (анод) и при отрицательной (катод). Измерение удельного сопротивления опытных образцов производилось четырехзондовым методом [14]. Зонды были изготовлены из вольфрама, расстояние между зондами равнялось 1 мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний материалов представлены в табл. 1 в виде объемной удельной эрозии  $I_V = V/q$ , которая рассчитывается как отношение абсолютной величины объемного износа  $V$  к величине коммутируемого заряда  $q$ . Другой часто используемой в литературе формой представления электроэрозионного износа является массовая удельная эрозия  $I_m = m/q$ , где  $m$  – масса изношенного материала. Объемная и массовая удельная эрозия связаны очевидным соотношением  $I_m = I_V \cdot d$ , где  $d$  – плотность материала. Значения удельного электросопротивления и удельной эрозии приведены с доверительным интервалом при 95%-й доверительной вероятности.

Таблица 1. Состав и характеристики исследованных образцов

Характеристика	Состав	Cu+2 % C+ +2 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Cu+2 % C+ +2 % W <sub>2</sub> C
	T <sub>сп.</sub> , °C		
Пористость, %	950	16	12
	900	15	13
	850	15	11
Твердость индентирования $H$ при нагрузке на индентор 10 Н, МПа	950	566	620
	900	650	620
	850	716	716
Удельное электросопротивление $\rho$ , $10^{-8}$ Ом·м	950	3,2±0,1	3,8±0,4
	900	3,5±0,3	3,6±0,5
	850	3,7±0,4	2,8±0,4
Удельная эрозия $I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл (образец – анод)	950	1,6±0,1	2,0±0,1
	900	2,4±0,1	2,4±0,3
	850	2,2±0,2	2,8±1,3
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл (образец – катод)	950	1,5±0,1	0,9±0,1
	900	1,9±0,3	1,7±0,2
	850	0,9±0,1	1,5±0,1

Значения массового удельного износа исследованных образцов заключены в интервале  $I_m \approx 0,1 \dots 0,3$  мг/Кл, что по порядку величин соответствует диапазону типичных значений удельного массового износа таких распространенных электроконтактных материалов, как вольфрам, молибден и медь. Согласно классическим работам Усова, Займовского, Буткевича, Хольма этот диапазон составляет  $I_m \approx 0,1 \dots 10$  мг/Кл.

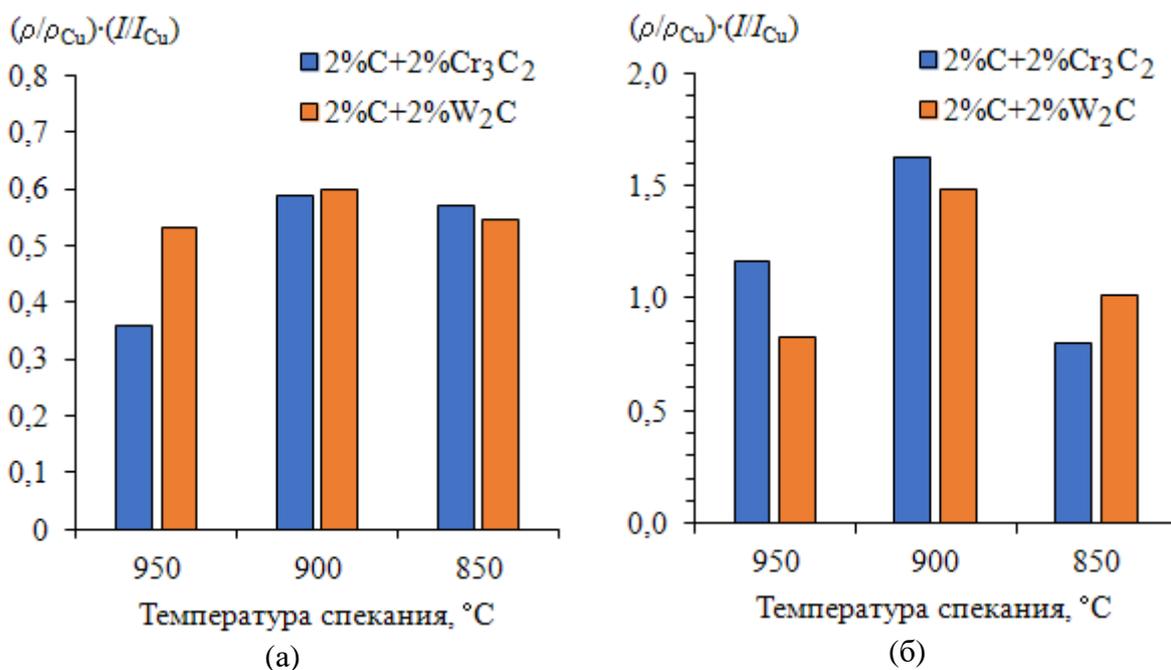
Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет сделать вывод о том, что исследованные композиты несущественно уступают эталонному материалу (меди) по величине твердости и проводимости. Твердость композитов составляет не менее 80 % от твердости монолитного медного эталонного образца, проводимость – не менее 50 % от проводимости эталона. Для сравнения: проводимость чистого вольфрама составляет 30 % от проводимости меди, платины – 16 %. При этом и тот и другой материал широко используются в электрических контактах. В то же время электроэрозионная износостойкость исследованных композитов существенно (до пяти раз) превышает износостойкость меди.

Для более детального сравнения характеристик исследованных композитов и эталона в табл. 2 приведены результаты испытаний в виде относительных величин, где  $H/H_{Cu}$ ,  $\sigma/\sigma_{Cu}$  и  $I/I_{Cu}$  – относительные твердость, электропроводность и удельная эрозия исследованных материалов по сравнению с эталоном. Твердость эталонного образца  $H = 716$  МПа, удельное сопротивление  $\rho = 1,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Электроэрозионный износ эталонного образца в качестве анода  $I = (8,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Кл, в качестве катода  $I = (2,3 \pm 0,8) 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Кл.

Таблица 2. Состав и характеристики исследованных образцов в сравнении с эталоном

Характеристика	Состав		
	$T_{сп}, ^\circ C$	Cu+2 % C+ +2 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Cu+2 % C+ +2 % W <sub>2</sub> C
$H/H_{Cu}$	950	0,79	0,86
	900	0,91	0,86
	850	1,00	1,00
$\sigma/\sigma_{Cu}$	950	0,56	0,47
	900	0,51	0,50
	850	0,49	0,64
$I/I_{Cu}$ анод (катод)	950	0,20 (0,65)	0,25 (0,39)
	900	0,30 (0,83)	0,30 (0,74)
	850	0,28 (0,39)	0,35 (0,65)

Для электроконтактного материала, подвергающегося электроэрозионному изнашиванию, выгодно сочетание малого удельного сопротивления и малого удельного износа, поэтому за критерий сравнения исследованных материалов можно принять произведение относительных величин  $(\rho/\rho_{Cu}) \cdot (I/I_{Cu})$ . Значения этого произведения представлены на рисунке. По величине принятого критерия оптимальным является материал состава Cu+2 % C+ 2 % W<sub>2</sub>C, полученный спеканием при температуре 950 °С. Ему немного уступает материал состава Cu+2 % C+2 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, полученный при той же температуре спекания.



Сравнение электроконтактных характеристик исследованных материалов:  
анод (а); катод (б)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные результаты, приведенные в данной статье, могут быть полезны при выборе композиционного материала для электроконтактных устройств, подверженных электроэрозионному изнашиванию.

Как показали результаты исследований, введение в композиционный электроконтактный материал на медной основе карбидов вольфрама или хрома в сочетании с небольшими добавками мелкодисперсных алмазов существенно повышает его износостойкость по сравнению с медью. При этом твердость и проводимость композитов остаются в допустимых пределах.

Повышение электроэрозионной износостойкости композитов с тугоплавкими добавками зависит как от состава материала, так и от технологических параметров изготовления композита, в частности от температуры спекания. Представленные нами результаты нельзя считать окончательными. Исследования в этом направлении целесообразно продолжить в поисках оптимальных параметров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Гершман И.С., Новоселова М.В., Харитонов Е.О. Порошковые материалы для электрических контактов // *Материаловедение*. 2007. № 8. С. 22–28.
2. Измайлов В.В., Дроздова Е.И., Черногорова О.П., Потапова И.Н., Новоселова М.В., Екимов Е.А. Электроконтактные свойства композиционного материала с медной матрицей, армированной сверхупругим твердым углеродом // *Металлы*. 2015. № 3. С. 45–50.
3. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства композиционного алмазосодержащего медного материала // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 5. С. 25–29.

4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид хрома // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 15–20.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид вольфрама // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 5–11.
6. Акимов Е.Г., Белкин Г.С., Годжелло А.Г., Дегтярь В.Г., Курбатов П.А., Райнин В.Е., Таев И.С., Шоффа В.Н. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань, 2015. 592 с.
7. Николенко С.В., Хосен Ри. Электродные материалы для электроискрового легирования. Хабаровск: изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 206 с.
8. Оглезнев Н.Д., Оглезнева С.А., Доливец О.В., Мазуренко К.А., Морозов О.П. Исследование износостойкости электродов-инструментов из композиционных материалов при электроэрозионной прошивке // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16013> (дата обращения: 02.02.2021).
9. Оглезнев Н.Д., Оглезнева С.А., Гревнов Л.М., Абляз Т.Р. Исследование структуры и относительной эрозионной стойкости электродов-инструментов из порошковых материалов на основе меди и карбида, карбонитрида, карбосилицида титана // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2017. Т. 19. № 3. С. 179–192.
10. Ловшенко Ф.Г., Хабибуллин А.И. Повышение электропроводности дисперсно-упрочненной меди // *Литье и металлургия*. 2019. № 4. С. 115–122.
11. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.
12. Иванов В.В. Физико-химические основы технологии и материаловедение порошковых электроконтактных композитов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 234 с.
13. Патент РФ 2265862. *Способ оценки электроэрозионной износостойкости материалов для электрических контактов* / Измайлов В.В., Новоселова М.В. Заявл. 05.04.2004. Опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34.
14. Радьков А.В., Малаханов А.А. Методы измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов. *Актуальные вопросы технических наук: материалы V Международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, февраль 2019 г.)*. СПб.: Свое издательство. 2019. С. 18–24. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/324/14799/> (дата обращения: 24.01.2020).

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Алмаз-карбидный композит на основе меди // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 12–19.

# **ELECTRIC CONTACT PROPERTIES OF THE MATERIAL CONTAINING REFRACTORY COMPONENTS. DIAMOND-CARBIDE COMPOSITE BASED ON COPPER**

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22 Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: iz2v@tvcom.ru

The results of the study of the main electrical contact characteristics of composite powder materials on a copper base with additions of chromium and tungsten carbides are presented. The electrical resistivity, hardness and electrical erosion wear of the studied samples are presented in absolute values and in comparison, with similar characteristics of the reference material – electrical copper – depending on the composition of the composite, the modes of its manufacture and the polarity of the sample (sample – anode and sample – cathode).

*Keywords:* composite material, copper, chromium carbide, tungsten carbide, electrical conductivity, electroerosive wear, sintering temperature.

## **REFERENCES**

1. Izmailov V.V., Gershman I.S., Novoselova M.V., Kharitonov E.O. Powder materials for electrical contacts. *Materialovedeniye*. 2007. No 8, pp. 22–28. (In Russian).
2. Izmailov V.V., Drozdova E.I., Chernogorova O.P., Potapova I.N., Novoselova M.V., Ekimov E.A. Electrical contact properties of a composite material with a copper matrix reinforced with superelastic solid carbon. *Metally*. 2015. No 3, pp. 45–50. (In Russian).
3. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a composite diamond-containing copper material. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*. 2020. No 5, pp. 25–29. (In Russian).
4. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper – chromium carbide. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 2 (10), pp. 15–20. (In Russian).
5. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper - tungsten carbide *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 3 (11), pp. 5–11. (In Russian).
6. Akimov E.G., Belkin G.S., Godzhello A.G., Degtyar V.G., Kurbatov P.A., Rainin V.E., Taev I.S., Shoffa V.N. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov [Fundamentals of the theory of electrical apparatus] / Pod red. P.A. Kurbatova*. St. Petersburg: Lan, 2015. 592 p.
7. Nikolenko S.V., Hosen Ri. *Elektrodnyye materialy dlya elektroiskrovogo legirovaniya [Electrode materials for electrospark alloying]*. Khabarovsk: izd-vo Tikhookeanskogo gos. universiteta, 2015. 206 p.

8. Ogleznev N.D., Oglezneva S.A., Dolivets O.V., Mazurenko K.A., Morozov O.P. Investigation of the wear resistance of electrodes-tools made of composite materials with electric discharge piercing. *Modern problems of science and education*. 2014. No 6. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16013> (date accessed: 02.02.2021). (In Russian).

9. Ogleznev N.D., Oglezneva S.A., Grevnov L.M., Ablyaz T.R. Investigation of the structure and relative erosion resistance of electrodes-tools made of powder materials based on copper and carbide, carbonitride, titanium carbosilicide. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*. 2017. V. 19. No 3, pp. 179–192. (In Russian).

10. Lovshenko F.G., Khabibullin A.I. Increase of electrical conductivity of dispersion-hardened copper. *Litye i metallurgiya*. 2019. No 4. Pp. 115–122. (In Russian).

11. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. Elektricheskaya eroziya silnotochnykh kontaktov i elektrodov [Electrical erosion of high current contacts and electrodes]. Moscow: Energiya, 1978. 256 p.

12. Ivanov V.V. Fiziko-khimicheskiye osnovy tekhnologii i materialovedeniye poroshkovykh elektrokontaktnykh kompozitov [Physicochemical fundamentals of technology and materials science of powder electrocontact composites]. Krasnoyarsk: IPTS KGTU, 2002. 234 p.

13. Patent RF 2265862. *Sposob otsenki elektroerozionnoy iznosostoykosti materialov dlya elektricheskikh kontaktov* [Method for assessing the electroerosive wear resistance of materials for electrical contacts]. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Declared 05.04.2004. Published 10.12.2005, Bulletin No 34. (In Russian).

14. Radkov A.V., Malakhanov A.A. Methods of measuring the resistivity of semiconductor materials. Topical issues of technical sciences: materials of the V International scientific conference (St. Petersburg, February 2019). St. Petersburg: Svoye izdatelstvo. 2019, pp. 18–24. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/324/14799/> (date accessed: 24.01.2020).

Поступила в редакцию/received: 09.03.2021; после рецензирования/revised: 23.03.2021;  
принята/accepted: 05.04.2021

## СПОСОБ ПЕРЕУСТАНОВКИ ЗАГОТОВКИ В ТРЕХКУЛАЧКОВЫЙ МЕХАНИЗИРОВАННЫЙ ПАТРОН

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

© Архаров А.П., 2021

Проведен анализ известных способов переустановки заготовок в механизированные патроны. Выявлены их достоинства и недостатки. Раскрыты сущность и реализация разработанного способа. Проведено его сравнение с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность способа и достигаемый технический результат.

*Ключевые слова:* переустановка, способ, заготовка, закрепление, патрон, точность, автоматизация.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-20-23**

### ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении при изготовлении деталей используются высокотехнологичные двухшпиндельные токарные многоцелевые станки с ЧПУ. После обработки заготовки на одном из шпинделей возникает необходимость ее переустановки на другой шпиндель. Для закрепления заготовок на таком оборудовании используют трехкулачковые самоцентрирующие патроны [1]. Эти патроны обладают высокой надежностью закрепления, поскольку закрепление выполняется в трех местах поверхности заготовки [2]. Однако при переустановке заготовки с закреплением ее кулачками самоцентрирующего патрона, расположенного на контршпинделе, другой патрон, закрепленный на основном шпинделе, удерживает заготовку в закрепленном состоянии. При этом отклонения от соосности патронов и от соосности закрепляемой поверхности относительно патрона контршпинделя, а также отклонение формы закрепляемой поверхности приводят к деформации переустанавливаемой заготовки из-за одновременного закрепления ее кулачками контршпинделя. Это снижает точность переустановки. Кроме того, ограничиваются технологические возможности способа из-за невозможности закрепления заготовки за поверхность несимметричного профиля.

Необходимость переустановки заготовки возникает также при автоматической загрузке металлорежущих станков. В этом случае заготовки переустанавливаются из позиции, в которой они размещены, в другую позицию для последующей обработки. С этой целью используют способ переустановки заготовки с применением самоцентрирующих механизированных захватов [3]. На точность переустановки этим способом влияют такие же погрешности расположения и формы, которые присущи вышеупомянутому способу.

Отмеченные недостатки устранены в способе установки заготовки в двухкулачковом механизированном патроне [4, 5]. В этом способе устанавливают заготовку на базирующий элемент. Устанавливают патрон напротив заготовки. Подводят патрон к базирующему элементу, перемещают кулачки патрона в радиальном направлении на сближение с заготовкой. В момент касания одного из кулачков с заготовкой прерывают перемещение этого кулачка, а возобновляют его перемещение при касании другого

кулачка с упомянутой заготовкой. Затем закрепляют заготовку одновременно двумя кулачками и отводят патрон с заготовкой в исходное положение.

Указанный способ позволяет переустанавливать заготовки, лишенные подвижности в радиальном направлении. Однако при этом закрепление заготовки выполняется в двух местах закрепляемой поверхности, что ограничивает технологические возможности данного способа, поскольку нельзя закрепить, например, заготовку за трехгранную поверхность или за поверхность несимметричного профиля. Кроме того, снижается надежность установки при закреплении за поверхности, для которых закрепления только в двух местах недостаточно (например, за цилиндрические поверхности, имеющие погрешности формы в виде огранки или овальности).

Проблемой является разработка способа переустановки заготовки, лишенной подвижности в радиальном направлении, при закреплении в трехкулачковом механизированном патроне.

В результате решения этой проблемы повышается точность и надежность переустановки за счет применения для закрепления заготовки трехкулачкового механизированного патрона с переменным движением кулачков.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В работе использовался анализ известных способов переустановки заготовок на технологическом оборудовании. При разработке усовершенствованного способа применялся синтез таких существенных признаков, которые в совокупности обеспечивают новизну и оригинальность способа.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Решение поставленной проблемы и технический результат достигнуты в разработанном способе переустановки заготовки в трехкулачковый механизированный патрон. Его основу составляет способ установки заготовки в двухкулачковом механизированном патроне [4].

Сущность разработанного способа заключается в следующем.

В способе устанавливают заготовку на базирующий элемент. Трехкулачковый механизированный патрон устанавливают напротив заготовки. Подводят патрон к базирующему элементу. Перемещают кулачки патрона в радиальном направлении на сближение с заготовкой. Прерывают движение каждого из первых двух кулачков в моменты их касания заготовки. Возобновляют прерванные движения упомянутых кулачков при касании заготовки третьим кулачком. Затем совместными движениями всех трех кулачков закрепляют заготовку и отводят патрон с заготовкой в исходное положение.

Сравнение разработанного способа с известным [4] показывает следующее. В разработанном способе движение кулачка, коснувшегося заготовки вторым, также приостанавливают. В известном способе перемещение упомянутого кулачка не прерывают, а в момент его касания начинают закрепление заготовки. В разработанном способе возобновление приостановленных движений и первого и второго кулачков начинают только после касания заготовки третьим кулачком, а закрепление выполняют одновременно тремя кулачками. Такое переменное движение кулачков при сближении с заготовкой, а также одновременное закрепление заготовки в трех местах позволяет уменьшить влияние погрешности формы закрепляемой поверхности и погрешности ее расположения относительно оси патрона на точность и надежность переустановки. Кроме того, расширяются технологические возможности заявленного способа переустановки за счет закрепления, например, за трехгранную поверхность.

На рисунке показана схема осуществления способа. Способ выполняется следующим образом.

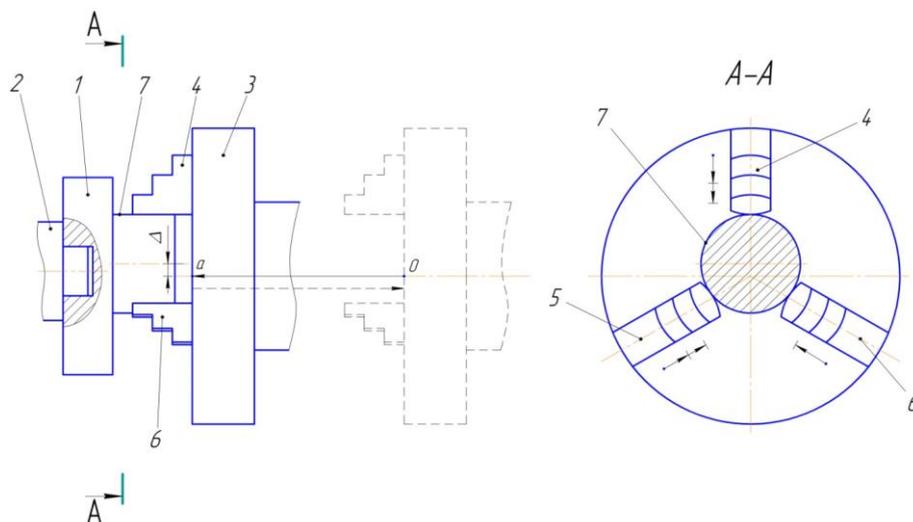


Схема осуществления способа

Заготовку 1 устанавливают на базирующий элемент 2. Напротив заготовки устанавливают механизированный трехкулачковый патрон 3. Подводят патрон 3 к базирующему элементу 2. Перемещают кулачки 4, 5 и 6 патрона в радиальном направлении на сближение с заготовкой. Из-за отклонения от соосности  $\Delta$  закрепляемой поверхности 7 относительно рабочей поверхности кулачков, погрешности формы закрепляемой поверхности, а также возможного отклонения от симметричности профиля этой поверхности, касание кулачков с упомянутой поверхностью произойдет неодновременно. В момент касания кулачка, который первым коснется поверхности, например, кулачка 4, прерывают его перемещение. Прерывают также перемещение кулачка, который следующим коснется упомянутой поверхности, например, кулачка 5. Возобновляют прерванные перемещения упомянутых кулачков в момент касания поверхности третьим кулачком 6. Затем одновременно закрепляют заготовку всеми тремя кулачками. После этого отводят патрон с заготовкой в исходное положение.

Осуществляемая таким образом переустановка заготовки, лишенной подвижности в радиальном направлении, в трехкулачковый механизированный патрон, отличается высокой точностью и надежностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный структурный анализ способов, используемых для установки и переустановки, загрузки и разгрузки заготовок на технологическое оборудование, выявил их достоинства и недостатки. Разработанный способ переустановки с использованием трехкулачкового механизированного патрона с переменным движением кулачков позволяет устранить недостатки известных способов и обеспечить повышение точности и надежности переустановки. Способ может быть использован на машиностроительных предприятиях при автоматических загрузке, переустановке заготовок на технологическом оборудовании и его разгрузке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 24351-80. Патроны токарные самоцентрирующие трех- и двухкулачковые клиновые и рычажно-клиновые. М.: Издательство стандартов, 1993. 11 с.

2. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 1 // Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г. [и др.]. 5-е изд., испр. М.: Машиностроение-1. 2003. 912 с.

3. Малов А.Н. Загрузочные устройства для металлорежущих станков. М.: Машиностроение. 1972. 400 с.

4. Архаров А.П., Павлов А.В. Способ установки заготовки в двухкулачковом механизированном патроне // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. № 1 (31). С. 40–41.

5. Патент РФ 2623549. *Способ установки заготовки в двухкулачковом механизированном патроне* // Архаров А.П. Заявл. 26.10.2016. Опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18.

**Для цитирования:** Архаров А.П. Способ переустановки заготовки в трехкулачковый механизированный патрон // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 20–23.

## METHOD FOR REINSTALLING A WORKPIECE INTO A THREE-JAW MECHANIZED CHUCK

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc

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

The analysis of the known methods of reinstalling workpieces into power chucks is carried out. Their advantages and disadvantages are revealed. The essence and implementation of the developed method are disclosed. It is compared with similar known solutions. The originality of the method and the achieved technical result are reflected.

*Keywords:* reinstallation, method, workpiece, fastening, chuck, accuracy, automation.

### REFERENCES

1. GOST RF 24351-80. *Patrony tokarnyye samotsentriruyushchiye trekh- i dvukhkulachkovyye klinovyye i rychazhno-klinovyye* [Lathe concentric three- and two-cam wedge-type and lever-wedge-type chucks]. Moscow: Izdatelstvo standartov. 2019. 11 p. (In Russian).

2. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja: v 2 t.* [Machine building technologist directory in 2 volumes] V. 1. A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, etc. 5<sup>th</sup> edition, revised. Moscow: Mashinostroenie-1, 2003. 912 p.

3. Malov A.N. *Zagruzochnyye ustroystva dlya metallorzhushchikh stankov* [Feeding equipment for metal cutting machines]. Moscow: Mashinostroenie. 1972. 400 p.

4. Arkharov A.P., Pavlov A.V. Method of workpiece installation in two-cam mechanized chuck. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*. 2017. No 1(31), pp. 40– 41. (In Russian).

5. Patent RF 2623549. *Sposob ustanovki zagotovki v dvukhkulachkovom mehanizirovannom patrone* [Method of workpiece installation in two-cam mechanized chuck]. Arkharov A.P. Declared 26.10.2016. Published 27.06.2016. Bulletin No 18. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 10.03.2021; после рецензирования/revised: 17.03.2021;  
принята/accepted: 05.04.2021

## СПОСОБЫ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Д.Д. КАКОРИН, магистрант, А.Ю. ЛАВРЕНТЬЕВ, к.т.н.

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: lavr\_ay@mail.ru

© Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю., 2021

В статье описаны наиболее широко применяемые способы послойного синтеза металлических деталей. Рассмотрена технология послойного синтеза с помощью электродуговой наплавки проволоочной присадкой. Показаны возможности электронно-лучевого и лазерного послойного синтеза изделия. Приводятся сравнительные характеристики различных способов получения деталей послойной наплавкой. Обосновано, что применение проволоочных присадок в качестве исходного материала для серийного изготовления деталей в производстве обеспечит снижение себестоимости изделия, несмотря на необходимость использования механической обработки наиболее точных поверхностей.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, послойный синтез, наплавка, спекание, металлы.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-24-33**

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного производства требует внедрения новых высокопроизводительных и экономичных технологий для производства деталей, моделей и прототипов. Применяемые на производстве технологии получения деталей литьем и обработкой давлением (ковка, штамповка и прессование) отличаются большой трудоемкостью подготовительных работ (например, созданием модельного комплекта при литье деталей), которая может составлять до 80 % времени от производства деталей. В связи с этим их применение при штучном и мелкосерийном производстве, а также при создании моделей и прототипов нецелесообразно.

Известные технологии механической обработки и производства деталей резанием характеризуются меньшими затратами времени на подготовительные работы, однако в их основе лежит нерациональный принцип «вычитания», т.е. поэтапного удаления слоев материала до придания заготовке требуемых формы и размеров, что делает производственный процесс малоэффективным вследствие значительного перерасхода материала и, соответственно, экономически невыгодным [1].

В конце 20-го века постепенно развиваются технологии создания заготовок методом послойного синтеза, которые в дальнейшем дают начало внедрению в науку и производство методов быстрого прототипирования RP (Rapid Prototyping). Технологии послойного выращивания основаны на принципе «добавления», т.е. нанесении слоев одинаковой толщины на исходную подложку (основу) с целью получения объекта, соответствующего заданной конфигурации. Интенсивное изучение и развитие аддитивных технологий обусловлено совершенствованием вычислительной техники и разработкой 3D-моделирования, при помощи которого за короткое время можно создать цифровое описание модели и воспроизвести реальный физический образец.

Возникший в последнее время массовый интерес к аддитивным технологиям, доступность материалов и технологий для проведения исследований привели к

разработке множества способов технической реализации послойного синтеза, постоянному обновлению информации и изменению ее актуальности. Поэтому целью данной работы является анализ современных способов послойного синтеза, определение их достоинств и недостатков, а также выбор наиболее доступного и производительного способа послойного синтеза для проведения научных исследований.

## **ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

Наиболее широкое применение технологии послойного синтеза с применением способа электродуговой наплавки с механизированным способом подачи проволоки (Wire and Arc Additive Manufacturing – WAAM) нашли при производстве деталей больших размеров и сложной конфигурации из различных сталей и сплавов [2].

Данный процесс отличается высокой производительностью послойного спекания, доступностью технологий, материалов и относительно невысокой стоимостью оборудования. Однако применение данной технологии при производстве моделей небольших размеров из титановых и алюминиевых сплавов нецелесообразно по причине высокой трудоемкости осуществления технологического процесса и отсутствия на рынке достаточного разнообразия расходных материалов.

Проводятся различные научные исследования на тему усовершенствования технологии электродуговой наплавки проволочного материала. Разработаны такие методы, как наплавка металлическим электродом в среде защитного газа (Gas Metal Arc Welding, GMAW), наплавка вольфрамовым электродом в среде защитного газа (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) и наплавка с применением плазменной дуги (Plasma Arc Welding, PAW) [3].

Данные методы послойной наплавки могут осуществляться способами капельного переноса с замыканием и без замыкания дугового промежутка, а также струйным переносом расплавленного металла.

Технология GMAW (рис. 1) осуществляется с помощью непрерывной автоматической подачи твердого плавящегося электрода в среде защитного инертного газа. По сравнению с WAAM-наплавкой, данный процесс отличается лучшей стабильностью горения дуги, чистотой поверхности наплавленного слоя и возможностью полной автоматизации процесса. В GMAW-процессе также возможно достижение струйного переноса наплавляемого металла, т.е. переноса металла с конца проволоки на поверхность сварочной ванны в виде непрерывной струи мельчайших капель. При таком переносе металла практически не возникает разбрызгивания материала и обеспечивается глубокое проплавление основного материала, благодаря чему повышается связность наплавленных слоев.

Технология GTAW (рис. 2) основана на подогреве расплавляемого и основного материала с помощью электрической дуги между неплавящимся вольфрамовым электродом и подложкой в среде защитного инертного газа. По сравнению с наплавкой плавящимся электродом данная технология обеспечивает более высокое качество поверхности наплавляемого слоя и отсутствие в структуре материала инородных включений, однако производительность процесса значительно снижена, чем при применении GMAW-технологии, а возможности автоматизации ограничены.

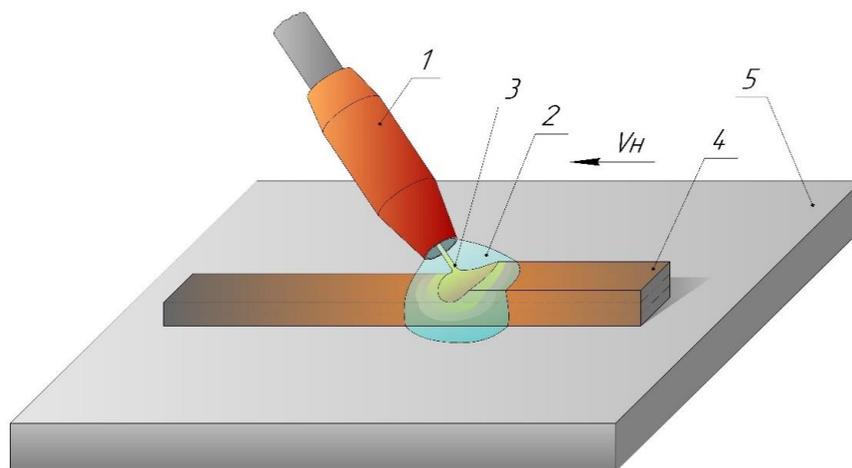


Рис. 1. Схема электродуговой наплавки с механизированной подачей проволочного материала в защитной газовой атмосфере: 1 – сопло горелки; 2 – защитная газовая атмосфера; 3 – присадочная проволока; 4 – построенный образец; 5 – подложка

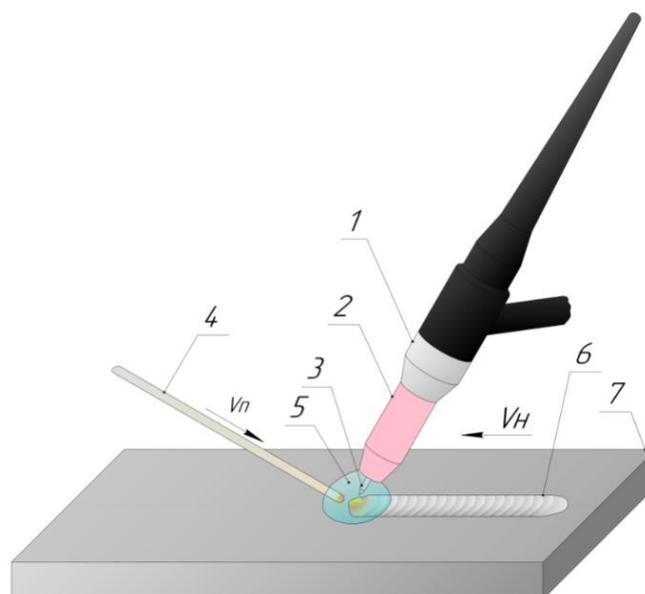


Рис. 2. Схема электродуговой наплавки неплавящимся вольфрамовым электродом: 1 – горелка; 2 – керамическое сопло; 3 – неплавящийся вольфрамовый электрод; 4 – присадочный материал; 5 – защитная газовая атмосфера; 6 – наплавленный слой; 7 – подложка

В процессе послойного синтеза при помощи плазменной наплавки PAW (рис. 3) дуга, в отличие от GTAW-технологии, горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и медной горелкой. При этом инертный газ, проходя через сопло горелки, фокусирует электрическую дугу, что приводит к увеличению плотности тепловой энергии, росту тепловложения и температуры дуги, а следовательно, повышает эффективности теплопередачи и увеличивает скорость наплавки.

Технология холодного переноса металла (Cold Metal Transfer – CMT) позволяет расширить область применения аддитивных технологий. Отличительной чертой

процесса является значительно меньшее тепловложение по сравнению с другими процессами WAAM.

Осуществляется СМТ-процесс следующим образом: при первоначальном обнаружении короткого замыкания, в момент подачи сварочной проволоки в ванну расплавленного металла, происходит снижение тока до минимально допустимого значения и одновременно осуществляется перенос капли расплавленного материала за счет обратного движения сварочной проволоки.

Таким образом, процесс переноса идет при минимальном значении тока, что существенно снижает количество передаваемой теплоты. Затем проволока снова подается в сварочную ванну и процесс повторяется. С помощью технологии СМТ возможно получение тонких слоев наплавляемого материала со скоростью, в 1,5–2 раза превосходящей скорость GMAW-процесса. Процесс является автоматическим и не зависит от скорости наплавки. Недостатком данной технологии является отсутствие прогрева предыдущих слоев заготовки, а следовательно, ограниченное применение в аддитивном производстве изделий.

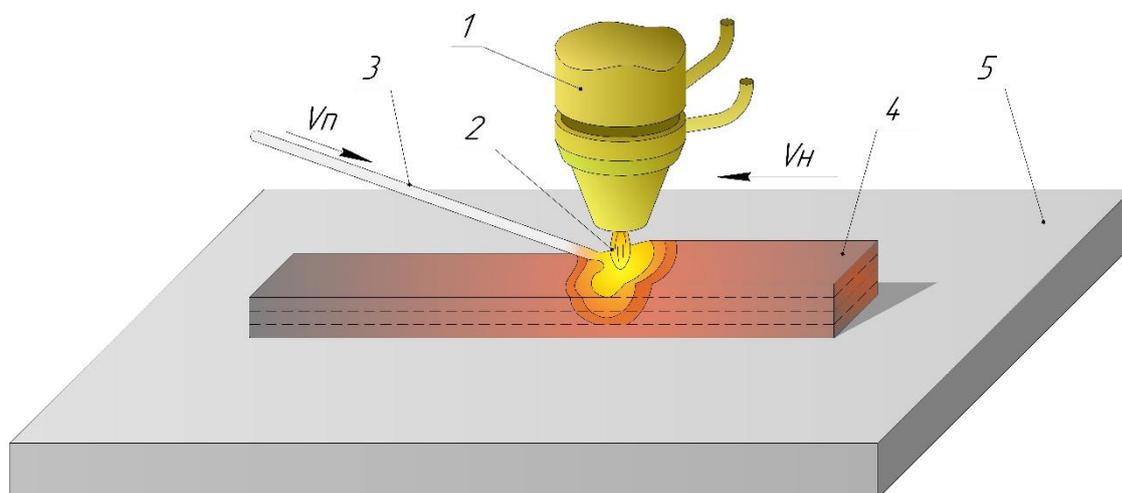


Рис. 3. Схема наплавки с применением плазменной дуги:  
1 – плазматрон; 2 – плазменная дуга; 3 – присадочный материал;  
4 – построенный образец; 5 – подложка

### ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СПЕКАНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ И ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Технология ЕВМ (Electron Beam Melting) основана на электронно-лучевом спекании металлических порошков. Ванна расплавленного металла создается путем разравнивания порошкового материала, поступающего из бункера, по рабочей зоне, расположенной на рабочем столе. Источником тепловой энергии является электронный луч, который оплавляет слой нанесенного порошка по заданной траектории, создавая тем самым модель слой за слоем. После оплавления и спекания слоя оставшуюся часть порошка удаляют с рабочей зоны, и рабочий стол опускают на величину, равную толщине одного наплавленного слоя. Затем процесс повторяют в той же последовательности до тех пор, пока деталь не будет изготовлена полностью.

Установка для электронно-лучевого синтеза объектов состоит из электронно-лучевой пушки, нити накала, блока астigmaticкой, фокусирующей и отклоняющей

линз, вакуумной камеры, бункера, теплозащитного экрана, рабочей зоны, рабочего стола, рейки и механизма вертикального перемещения рабочего стола.

Данная технология позволяет получать образцы с большей плотностью структуры и увеличивать скорость печати в 3–4 раза по сравнению с технологиями, основанными на лазерном спекании слоев. Полная свобода геометрии форм дает возможность создавать изделия различных конструкций и размеров, уменьшить затраты на последующую механическую обработку [4].

Недостатком данной технологии является высокая стоимость материалов и большое количество вспомогательного оборудования: систем подготовки порошка, его удаления и восстановления, системы подогрева рабочей зоны, устройства откачки воздуха и др.

Система откачки воздуха обеспечивает остаточное давление в вакуумной камере не менее 1 Па на протяжении всего цикла. В процессе плавления в камеру подается гелий и давление повышается до 200 Па. Тем самым создается окружающая среда, благоприятная для сохранения однородности химического состава порошкового материала.

Система подогрева порошкового материала обеспечивает оптимальную температуру перед спеканием, в результате чего получают детали, свободные от остаточных напряжений, и микроструктуру без закалочных включений мартенсита.

Технология EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing) осуществляется электронно-лучевым оплавлением проволочного строительного материала. Использование проволоки вместо порошка позволяет значительно ускорить, упростить и удешевить процесс производства деталей, особенно крупных размеров. Однако при этом заметно снижается качество поверхности изделия, что предполагает значительную последующую механическую обработку.

Такая установка (рис. 4) состоит из электронно-лучевой пушки 1, электронного луча 2, расплавляющего проволочный материал 3, системы подачи проволоки 4, построенного образца 5 и подложки 6. Перемещение пушки, рабочего стола и системы подачи проволоки задается на компьютерной модели изделия и обеспечивает формирование изделия заданной формы.

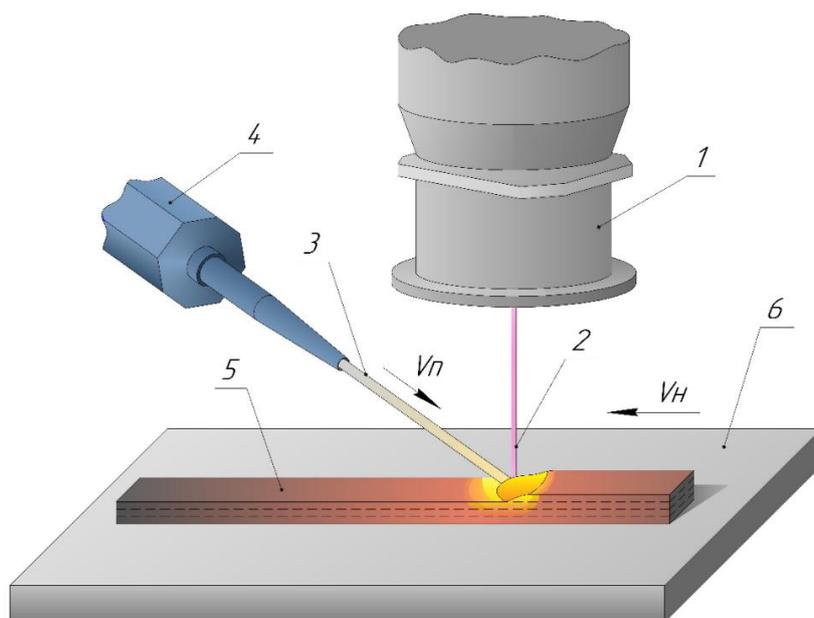


Рис. 4. Схема наплавки по технологии EBAM

## ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Технология селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering – SLS) осуществляется по принципу формирования слоя материала с последующим его сплавлением лазерным лучом, который связывает частицы порошка в соответствии с заданным контуром изделия (рис. 5) [5]. Перед лазерным спеканием слой порошка полностью прогревают до температуры близкой к температуре плавления, облегчая тем самым плавление материала в предыдущем слое и снижая температурные деформации и напряжения. После построения слоя рабочий стол с заготовкой опускается на величину толщины наплавленного слоя и происходит нанесение нового порошкового материала.

Предварительный подогрев заготовки значительно снижает скорость производства изделий, однако несмотря на это данный процесс является одним из наиболее популярных способов аддитивного производства методом спекания порошкового материала и обеспечивает высокую точность и качество поверхности изготовленных деталей.

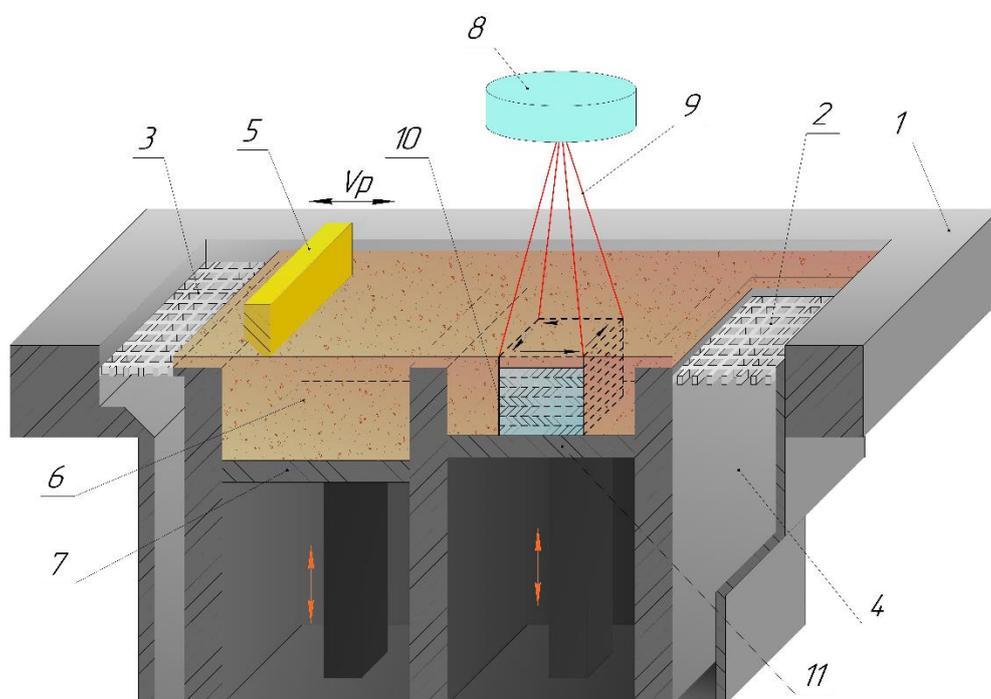


Рис. 5. Схема технологии селективного лазерного спекания SLS

Схема технологии селективного лазерного спекания состоит из рабочего стола 1, на котором расположены ячейки 2, 3, просеивающие излишки порошкового материала в бункер 4, рейки 5, разравнивающей порошковый строительный материал 6, который подается при подъеме подающей платформы 7, фокусирующей линзы 8 и сканирующего лазерного луча 9, с помощью которого происходит расплавление порошкового строительного материала и постепенное построение образца 10. После наплавления нового слоя образец опускается на глубину последующего слоя при помощи подвижной платформы построения 11.

Селективное лазерное плавление порошковых материалов (Selective Laser Melting – SLM) – процесс, аналогичный процессу лазерного сплавления (SLS), но отличающийся плавлением порошка без предварительного подогрева вследствие повышенной мощности лазера (как правило, используются иттербиевые волоконные лазеры), уменьшенного диаметра фокусированного пятна и нанесения более тонкого слоя порошка.

Существенное влияние на широкое распространение SLM-технологии оказывает процесс сфероидизации порошка, который проявляется в формировании отдельно лежащих друг от друга капель материала (эффект Марангони), а также повышенное порообразование по границам капель, вследствие затягивания в каплю окружающих ее частиц порошка под действием сил поверхностного натяжения. Процесс сфероидизации напрямую зависит от поверхностного натяжения и вязкости материала, что ограничивает использование различных металлов и сплавов. Кроме того, невозможность использования таких металлов, как медь, олово и свинец, объясняется наличием кислорода, который, растворяясь в металле, повышает вязкость расплава, ухудшает его растекание и ограничивает смачиваемость нижележащего слоя.

На качество получаемого слоя оказывает влияние как подбор оптимальной зависимости параметров процесса – мощности лазерного излучения и скорости сканирования, так и появление внутренних напряжений и деформация изделия, которые зависят от скорости нагрева и охлаждения, коэффициента теплового расширения материала, а также структурно-фазовых превращений в металле [6]. Снизить негативное влияние напряжений и деформаций можно применением нагревательных элементов, устанавливаемых внутри заготовки и вокруг подложки, и проведением послеоперационного отжига. Предварительный подогрев порошкового материала позволяет уменьшить степень окисления металла, удаляя избыток влаги.

Изделия, полученные методом селективного лазерного плавления, характеризуются анизотропией свойств, повышенной прочностью и нередко пониженной пластичностью вследствие наличия остаточных напряжений. Прочность получаемых изделий обусловлена мелкозернистой структурой материала, образующейся вследствие высокой скорости охлаждения.

Высокая скорость охлаждения приводит к увеличению числа зародышей кристаллов и уменьшению их критического размера. Зародышами кристаллов, как правило, являются различные неметаллические включения, пузырьки газов или частицы ограниченной растворимости, выделившиеся из расплава. С уменьшением размера зерна увеличивается прочность вследствие развитой сети границ зерен, которая препятствует движению дислокаций.

Технология прямого нанесения материала (Direct Metal Deposition – DMD), схожая с ранее рассмотренными процессами, использует промышленный лазерный луч под роботизированным управлением, сканирующий плоскость заготовки трехмерной детали, спекая и расплавляя порошковый материал, который вместе с инертным газом подается несколькими форсунками непосредственно на обрабатываемую головку. Данная технология позволяет получать изделия с геометрией повышенной сложности, однако значительно повышается стоимость оборудования и усложняется процесс наладки роботизированного комплекса (рис. 6) [7].

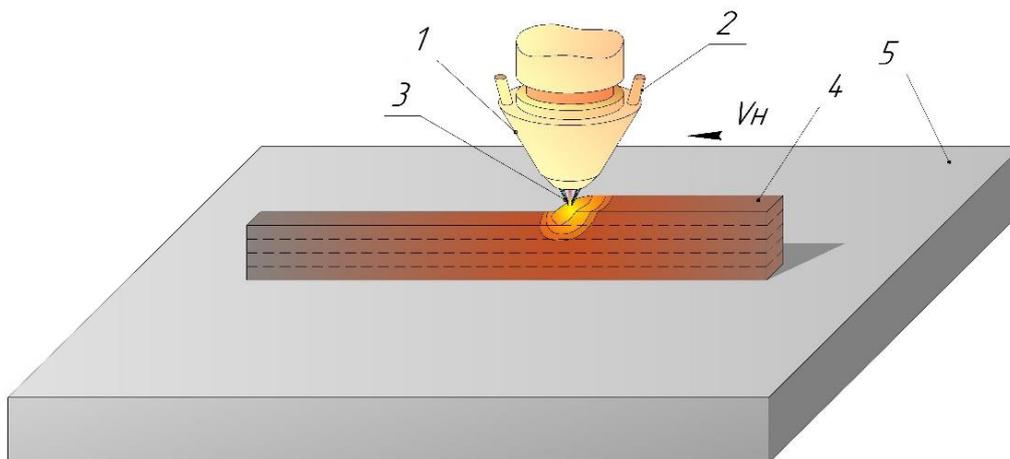


Рис. 6. Схема технологии прямого нанесения порошкового материала DMD:  
 1 – обрабатывающая головка; 2 – отверстие для подачи порошкового строительного материала; 3 – прямая подача порошкового материала; 4 – построенный образец; 5 – подложка

Технология лазерного сплавления порошков (Laser Engineered Net Shaping – LENS) основана на расплавлении лазерным лучом металлического порошка, который подается коаксиально через лазерную головку. Порошок распределяется по лазерной головке по окружности под действием силы тяжести или при использовании инертного газа. Лазерный луч создает небольшую ванну расплава на подложке или ранее созданном слое, куда подают расплавленный порошок, наращивая тем самым новый слой изделия. Таким методом могут создаваться изделия значительных размеров, но с относительно низкой точностью и невысоким качеством поверхности.

Существуют методы непрямого (Indirect Metal Laser Sintering – IMLS) и прямого (Direct Metal Laser Sintering – DMLS) лазерного спекания, основанные на сплавлении связанного по конфигурации изделия порошка.

В IMLS-процессе в качестве связующего выступает полимер, который также обеспечивает необходимую прочность для дальнейшей термической обработки. Во время термообработки полимер выводится и происходит спекание каркаса изделия и окончательная пропитка пористого каркаса связующим металлом. Главным недостатком процесса IMLS является сложность регулировки содержания тугоплавкой фазы, так как ее процентное содержание определяется насыпной плотностью порошка, которая в несколько раз меньше теоретической плотности материала порошка.

Основное отличие DMLS-процесса от непрямого лазерного спекания заключается в использовании сплавов или легкоплавких соединений вместо полимера, а также в отсутствии операции пропитки. В процессе прямого лазерного спекания изделие формируется в результате затекания расплава-связки в пространство между частицами основного металла под действием капиллярных сил. Порошок-связующее имеет меньший размер частиц по сравнению с материалом основы, благодаря чему увеличивается насыпная плотность порошковой смеси и ускоряется процесс образования расплава.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были изучены наиболее распространенные способы послойного синтеза металлических изделий, проведен анализ технологий, выявлены их основные достоинства и недостатки. В настоящее время наиболее широко распростра-

нены электронно-лучевые и лазерные технологии с использованием порошковых материалов, которые позволяют получать точные изделия сложных конфигураций.

Однако порошковый строительный материал значительно усложняет процесс и повышает стоимость производимых изделий вследствие необходимости использования специального дорогостоящего оборудования, рабочей камеры, а также установки для создания вакуума.

Кроме того, стоимость порошковых материалов превышает стоимость проволоочных присадочных материалов как минимум в 10 раз. В связи с этим широкое распространение получили способы электродуговой наплавки проволоочного материала (за счет относительной простоты процесса и применяемого оборудования).

Отличительными чертами электродуговой наплавки проволоочным материалом являются высокая производительность, сравнительно высокое качество поверхности наплавляемого слоя и отсутствие несплавлений в структуре материала и межслойной зоне. Механическая обработка рабочих и присоединительных поверхностей обеспечивает требуемый эксплуатационный уровень точности размеров и формы поверхности.

Для внедрения технологии послойного синтеза металлических заготовок с использованием послойной электродуговой наплавки в защитном газе с присадочным материалом в виде проволоки необходимо решить ряд задач, в частности, исследовать изменение структуры и свойств различных металлических сплавов при многократном термическом цикле. Картина распределения внутренних напряжений в изделии также заслуживает внимания. Особый интерес вызывают металлургические процессы при многослойной наплавке, управление которыми обеспечит получение упрочняющих фаз в металле изделия с учетом эксплуатационных воздействий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла // *Библиотечка литейщика*. 2014. № 9. С. 14–71.
2. Жаткин С.С., Никитин К.В., Деев В.Б., Панкратов С.С., Дунаев Д.А. Применение электродуговой наплавки для создания трехмерных объектов из стали // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 6. С. 443–450.
3. Осколков А.А., Матвеев Е.В., Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Кротова Е.Л. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20. № 3. С. 90–104.
4. Залесский В.Г., Поболь И.Л., Бакиновский А.А., Губко А.Д. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2018. Т. 63. № 2. С. 169–180.
5. Килина П.Н., Морозов Е.А., Ханов А.М., Сиротенко Л.Д. Исследование режимов селективного лазерного плавления металлических порошков // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16035> (дата обращения: 28.05.2021).
6. Смулов И.Ю., Жирнов И.В., Дубенская М.А. Оптический мониторинг селективного лазерного плавления: влияние скорости сканирования и мощности лазерного излучения на геометрию ванны расплава на поверхности слоя металлического порошка INOX 316 L // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2015. № 3. С. 52–56.
7. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // *Известия Тульского государственного университета. Серия: «Технические науки»*. 2016. Вып. 8. Ч. 2. С. 210–217.

**Для цитирования:** Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю. Способы послойного синтеза металлических изделий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 3 (11). С. 24–33.

## METHODS OF LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS OF METAL PRODUCTS

D.D. Kakorin, undergraduate, A.Yu. Lavrentev, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: lavr\_ay@mail.ru

The article describes the most widely used methods of layer-by-layer synthesis of metal parts. The technology of layer-by-layer synthesis using electric arc surfacing with a wire additive is considered. The possibilities of electron-beam and laser layer-by-layer synthesis of the product are shown. Comparative characteristics of various methods of producing parts by layer-by-layer surfacing are given. The use of wire additives as a starting material for the serial production of parts in production is recommended. Such technologies will reduce the cost of the product despite the need to use mechanical processing of the most precise surfaces.

*Keywords:* additive technologies, layer-by-layer synthesis, surfacing, sintering of metals.

### REFERENCES

1. Dovbysh V.M., Zabednov P.V., Zlenko M.A. Additive technologies and metal products. *Bibliotekha liteyshchika*. 2014. No 9, pp. 14–71. (In Russian).
2. Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Deev V.B., Pankratov S.S., Dunaev D.A. The use of electric arc surfacing for the creation of three-dimensional objects from steel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2020. V. 63. No 6, pp. 443–450. (In Russian).
3. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Advanced technologies for the additive production of metal products. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. 2018. V. 20. No 3, pp. 90–104. (In Russian).
4. Zalessky V.G., Pobol I.L., Bakinovskiy A.A., Gubko A.D. Obtaining metal products using electron-beam additive technologies. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*. 2018. V. 63. No 2, pp. 169–180. (In Russian).
5. Kilina P.N., Morozov E.A., Khanov A.M., Sirotenko L.D. Investigation of modes of selective laser melting of metal powders. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. No 6. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16035> (date accessed: 28.05.2021). (In Russian).
6. Smurov I.Yu., Zhirnov I.V., Dubenskaya M.A. Optical monitoring of selective laser melting: the effect of scanning speed and laser radiation power on the geometry of the melt pool on the surface of a layer of INOX 316 L metal powder *Vestnik MGTU Stankin*. 2015. No 3, pp. 52–56. (In Russian).
7. Chemodurov A.N. Application of additive technologies in the manufacture of mechanical engineering products. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskkiye nauki"*. 2016. Is. 8., Part 2, pp. 210–217. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 24.05.2021; после рецензирования/revised: 17.06.2021;  
принята/accepted: 21.06.2021

## ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ИНСТРУМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ

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

В статье проведены аналитические расчеты и установлен характер распределения тепловых потоков в зоне резания при применении износостойких покрытий. Смоделированы теплофизические явления в зоне резания при использовании композиционных износостойких покрытий на режущем инструменте с эффектом самоорганизации при трении. Для подтверждения явления самоорганизации и перераспределения тепловых потоков в контактной зоне проведены серии адгезионных, износостойкостных, температурных и силовых исследований при точении различных марок сталей и сплавов. Повышение износостойкости режущего инструмента с многослойным композиционным покрытием достигается путем перераспределения теплового потока в зоне резания за счет образования защитных экранирующих вторичных структур.

*Ключевые слова:* резание металлов, трение, износ, износостойкие покрытия, термодинамика, трибосистема, самоорганизация, вторичные структуры, теплопроводность, температура резания, износостойкость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-34-43**

### ВВЕДЕНИЕ

Создание и внедрение современных материалов с уникальными физико-механическими свойствами и инновационных конструкций деталей, необходимость управления жизненным циклом изделия (проектирование, производство, эксплуатация и ремонт) при минимизации энерго- и ресурсозатрат определяют совершенствование технологии обработки резанием в направлении интенсификации на основе использования современного высокопроизводительного станочного оборудования [1–3]. Производительность операций резания металлов может быть увеличена за счет увеличения скорости обработки. Ограничивающим фактором при этом является снижение износостойкости режущего инструмента. Поэтому важно понимать, что приводит к разрушению материала инструмента, для того чтобы создать такие условия, при которых данные негативные факторы оказывали бы наименьшее влияние на износ режущего инструмента. Важнейшими из таких факторов являются термическое воздействие на режущий инструмент и тепловой режим в процессе резания [1].

Известно [3–7], что нанесение покрытия на инструментальные материалы позволяет значительно повлиять на контактные процессы в зоне резания. Особенно это характерно для наиболее термодинамически неустойчивых покрытий в виде оксидов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных 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. Кроме того, повышение температуры способствует разрушению поверхностных пленок и образованию химически чистых, «ювенильных» поверхностей с последующим образованием вторичных структур вследствие интенсивного окисления. Эти обстоятельства зачастую приводят к снижению сил трения и перераспределению тепловых потоков.

Согласно второму принципу термодинамики в открытых системах при определенных соотношениях потоков энергии и вещества можно наблюдать процессы упорядочения. Данный процесс соответствует уменьшению энтропии и появлению самоорганизующихся рассеивающихся структур [4–7]. Именно в этом заключается отличие открытых систем от закрытых, где энтропия может только увеличиваться. Для явления самоорганизации характерен принцип экранирования, состоящий во взаимосвязи процессов разрушения и регенерации (восстановления) в зоне трения. Другими словами, существует динамическое равновесие между процессами активации и пассивации на поверхностных слоях. Когда это равновесие нарушается, начинается разрушение материала поверхности. Таким образом, эффект экранирования при трении препятствует всем видам непосредственного взаимодействия поверхностей трибопары и разрушению основного металла. Контакт трибопары осуществляется с помощью вторичных структур, образующихся в зоне трения. Рассеивание энергии во время трения связано с формированием устойчивых рассеивающих структур на контактной поверхности. Этот процесс можно рассматривать как пример использования самоорганизующихся явлений в технике.

В процессе лезвийной обработки резанием практически вся механическая энергия превращается в тепловую. При этом устойчивость инструмента к изнашиванию во многом определяется температурными режимами системы резания. Вместе с тем для пары «инструмент – деталь» существует оптимальная температура резания, которая соответствует минимальному износу инструмента независимо от режимов резания [3]. Это означает, что если в процессе обработки температура резания меньше оптимальной, то необходимо ее увеличить. Если температура резания больше оптимальной, нужно создать условия для ее снижения. Управление температурой резания и поддержание на заданном уровне исключает фактор отрицательного влияния температуры на износ инструмента. Этого можно достичь регулированием тепловых потоков в системе «инструмент – заготовка – стружка – среда» с использованием современных композиционных покрытий, способных адаптироваться к внешним воздействиям. Композиционные многослойные покрытия на режущем инструменте обладают двойными функциями, поскольку могут существенно изменять как поверхностные характеристики материала инструмента (фрикционные свойства, теплопроводность, склонность к физическому и химическому взаимодействию с обрабатываемым материалом и т.д.), так и одновременно влиять на контактные процессы. Таким образом, многофункциональность промежуточной технологической среды, какой является покрытие, позволяет прогнозировать возможность направленного управления температурой резания [3, 6]. С одной стороны, покрытие может существенно снизить коэффициент трения в системе резания металлов и уменьшить мощность фрикционных источников тепла. С другой стороны, оно обладает экранирующей функцией и способно значительно уменьшить интенсивность тепловых потоков в режущем клине инструмента и тем самым повысить температурный порог начала адгезионного взаимодействия в системе «заготовка – инструмент», уменьшая интенсивность диффузии между ними.

Целью данной работы является аналитический расчет тепловых потоков и моделирование теплофизических явлений при резании металлов инструментом с

различными композиционными износостойкими покрытиями, что в целом позволит прогнозировать образование вторичных структур с экранирующим, смазывающим и другими эффектами при определенных температурно-силовых условиях в результате самоорганизации, а также повысить эффективность лезвийной обработки резанием.

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Тепловые процессы при резании металлов являются своеобразным индикатором, отражающим характер протекания целого ряда явлений, определяющих работоспособность режущего инструмента и качество формируемых поверхностей обрабатываемых деталей. С повышением температуры инициируются процессы макро- и микроразрушения контактных площадок инструмента [7, 8]. При наличии на контактных площадках инструмента износостойких покрытий снижаются работа деформации и силы резания. Это свидетельствует об уменьшении интенсивности основных источников тепла в зоне резания – деформационного и фрикционного по передней и задней поверхностям. Износостойкие покрытия, отличаясь по своим теплофизическим свойствам 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. Использование известных методик теоретического анализа теплового и напряженного состояний материала режущего клина, где его тонкие слои характеризуются большим градиентом теплопроводности, затруднительно в связи со значительным объемом вычислений. Разработанная методика основана на принципиально новом подходе к решению задачи теплопереноса на базе сведения задачи с переменными коэффициентами к последовательному решению уравнений с постоянными коэффициентами.

При разработке методики были приняты следующие допущения:

теплопроводность, удельная теплоемкость инструментального и обрабатываемого материалов не зависят от температуры;

источники теплообразования распределены в контактных поверхностях и в плоскости скалывания;

плоскость скалывания расположена перпендикулярно к передней поверхности резца;

теплообмен с окружающей средой отсутствует;

коэффициенты трения, силы резания, коэффициент усадки стружки, длины контактных поверхностей для режущих инструментов с покрытием и без покрытия одинаковы;

скорость движения элементов материала стружки одинакова по ее толщине.

Интенсивности тепловыделения приняты по работе [1]. При анализе зона резания разделена на три прямоугольные области (рис. 1):  $T$  – инструмент,  $S$  – стружка,  $D$  – деталь;  $T_1$  и  $T_2$  – однородная и неоднородная части инструмента, содержащие покрытие. В зонах  $T$ ,  $S$  и  $D$  задача теплопроводности решается отдельно. При этом через контактные поверхности происходит теплообмен по закону Стефана – Больцмана [1–3]. Так как размеры рассматриваемой зоны резания очень малы, причем время стабилизации температуры в этой зоне тоже невелико, то влияние естественных границ тел проявиться не успевают (за исключением внешней стороны стружки). Поэтому зону  $S$  можно считать неограниченной в направлении оси  $O_x$ , зону  $D$  – в направлениях  $O_z$ ,  $O_y$  и  $O_2$ , зону  $I$  – в направлениях  $O$  и  $O_2$ .

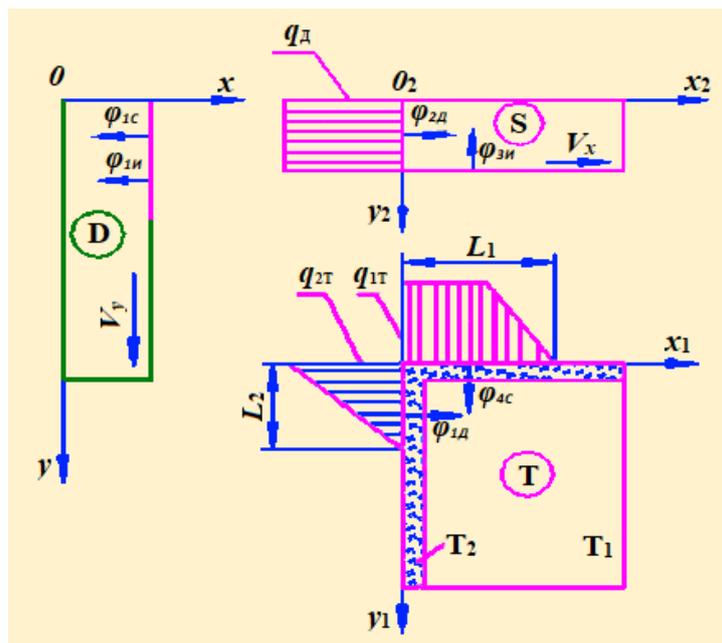


Рис. 1. Расчетная схема тепловых полей в зоне резания:  $L_1$ ,  $L_2$  – длина контактов по передним и задним площадкам;  $q_{1T}$ ,  $q_{2T}$ ,  $q_d$  – интенсивности тепловыделения

На основании разработанного алгоритма составлена компьютерная программа. Расчеты выводятся на печать в матричной форме для зоны резания в целом и отдельно для режущего клина в зависимости от времени вплоть до стабилизации теплового поля. Построением изотерм непосредственно на распечатках получаем температурное поле в зоне резания.

Расчеты выполнялись при условиях:

обрабатываемый материал – сталь 40Х с пределом прочности  $\sigma_B = 500$  МПа, температуропроводностью  $a_1 = 670$  м<sup>2</sup>/с, удельной теплоемкостью  $cp = 5,03 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К);

режущий инструмент ТТ8К6 с температуропроводностью основы  $a_2 = 300$  м<sup>2</sup>/с, насыщенного слоя  $a_3 = 1500 \dots 300$  м<sup>2</sup>/с (меняющейся по глубине, определена линейной интерполяцией согласно концентрационных кривых), удельной теплоемкостью  $cp = 2,51 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К);

режимы резания: скорость  $v = 450$  м/мин, подача  $s = 0,11$  мм/об, глубина  $t = 0,5$  мм.

Использовано износостойкое покрытие TiN толщиной 5 мкм.

По результатам расчетных данных получены температурные поля в режущем клине и контактных поверхностях (рис. 2), анализ которых показал, что при применении композиционных износостойких покрытий максимальная температура резания уменьшается на 16...31 %, расстояние между изотермами возрастает в 1,5...1,7 раза, что в свою очередь приводит к снижению градиента температур и термонапряжений. Как известно [9–11], с уменьшением темпа роста контактных температур в момент врезания  $\Delta\theta/\Delta t$  увеличивается динамическая прочность рабочей части инструмента, что очень важно при обработке со значительными колебаниями сил резания.

Качественным подтверждением теоретических исследований являются изотермы цветовых переходов. Некоторое отклонение экспериментальных и расчетных значений температур связано, во-первых, с увеличением фактической площадки контакта по мере износа инструмента, а во-вторых, с отдельными допущениями теоретической методики. Необходимо отметить, что незначительные отклонения результатов

расчета и эксперимента подтверждают правомерность принятых допущений и верность разработанной методики в целом.

Анализ полученных алгоритмов и результатов проведенных расчетов выявил ряд существенных недостатков, в частности:

«идеализированность» модели и, как следствие, сложность учета всех факторов, влияющих на теплонапряженность зоны резания в реальных производственных условиях;

длительность и динамичность контактных процессов по времени при лезвийной обработке резанием;

многовариантность полученных данных при изменении нескольких параметров процесса резания и т.д.

Положительным моментом таких расчетов является возможность теоретической оценки распределения тепловых потоков и качественной оценки влияния основных параметров процесса резания на теплонапряженность контактной зоны.

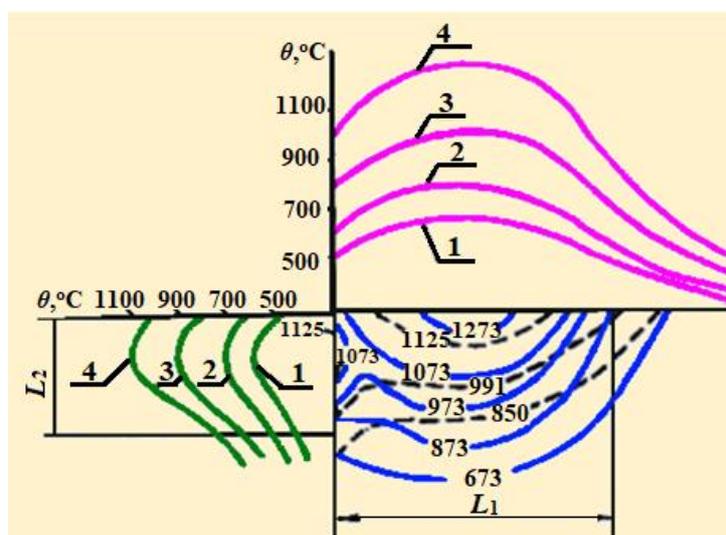


Рис. 2. Температурное поле в режущем клине и распределение температур на контактных поверхностях инструмента ТТ8К6 с покрытием TiN при точении при  $\tau$ , равном: 1 – 60 с; 2 – 120 с; 3 – 240 с; 4 – 960 с;  
— — расчетные изотермы; - - - - - экспериментальные изотермы

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СРЕДЕ DEFORM 3D

Моделирование процесса резания может существенно сократить сроки разработки технологии в связи с подготовкой производства, особенно при использовании инновационных инструментальных материалов и покрытий. Существует потребность в математических моделях, которые достоверно описывают термомеханические явления, сопровождающие процесс резания, и позволяют прогнозировать свойства материалов при резании, а также износостойкость и другие эксплуатационные характеристики режущего инструмента и разработанных композиционных многослойных покрытий уже на стадии технологической подготовки производства. Для моделирования процесса резания использовалась программная среда DeForm-3D. При этом принята следующая условность: при продольном точении движения сообщаются твердому телу, имитирующему режущий инструмент, а к заготовке прикладываются только силы, поэтому инструмент перемещается относительно заготовки (рис. 3). На основе предварительно проведенных натурных экспериментов при продольном точении были определены

основные параметры резания: режимы обработки, марка, геометрия инструмента и размеры заготовки, параметры инструментальных покрытий и т.д. В качестве заготовки использовался цилиндрический вал диаметром 120 мм и длиной 600 мм из сталей и сплавов: 40Х; 12Х18Н10Т; ХН73МБТЮ и др. Режимы резания соответствовали следующим параметрам:

частота вращения шпинделя 1 600 об/мин,  
скорость подачи 0,11 мм/об,  
глубина резания 0,5 мм.

В качестве инструментального материала использовались твердосплавные четырехгранные пластины и фрезы групп ВК, ТК и ТТК.

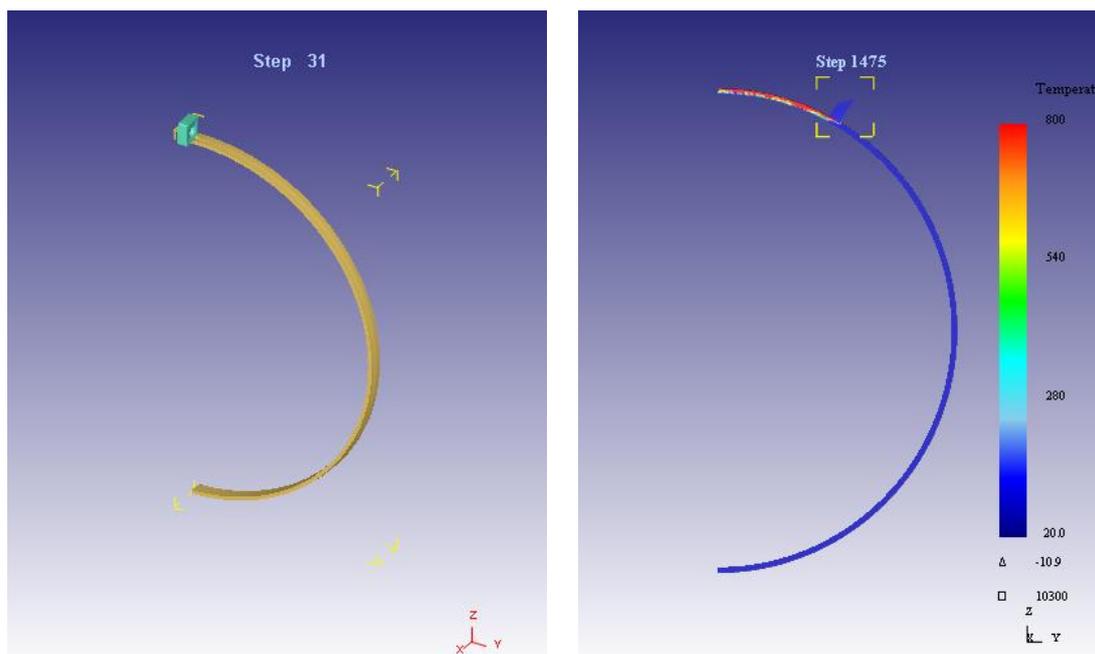


Рис. 3. Условная схема резания при моделировании

Применение компьютерного моделирования позволяет варьировать теплофизические параметры и трибологические свойства зоны контакта, моделируя характеристики износостойких покрытий на границе «инструмент – деталь». Таким параметром может быть не только теплопроводность покрытия, но и начальные условия контактной зоны (например, коэффициент трения, наличие смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) и т.д.), которые в свою очередь влияют на формирование источников тепла и их интенсивность. На рис. 4 показаны результаты расчетов в программе «DeForm 3D» при использовании различных композиционных износостойких покрытий, как по химическому составу, так и по толщине слоя. Представленные результаты наглядно и информативно показывают явление перераспределения теплового потока в зоне резания при использовании различных износостойких покрытий. На рис. 4 в качестве примера показана тепловая нагруженность режущего клина с различными покрытиями при одинаковом времени работы (для всех шаг 800). Так, на рис. 4(а), (б) видно при резании инструментом без покрытия и с покрытием  $TiN$  существенную тепловую нагруженность самого режущего клина и по задней поверхности. При этом из-за высокой температуры в зоне резания и адгезионного схватывания единичного пятна контакта будет интенсифицироваться радиальный износ режущего клина, определяющий размеры обрабатываемой детали и

показатели качества поверхностного слоя. Вместе с тем при использовании других покрытий (рис. 4(в)–(е)) происходит пере-распределение (переход) теплового потока с задней на переднюю поверхность инструмента, т.е. большая часть тепла уходит в стружку, что более благоприятно с точки зрения адгезии и уменьшения размерного износа [10].

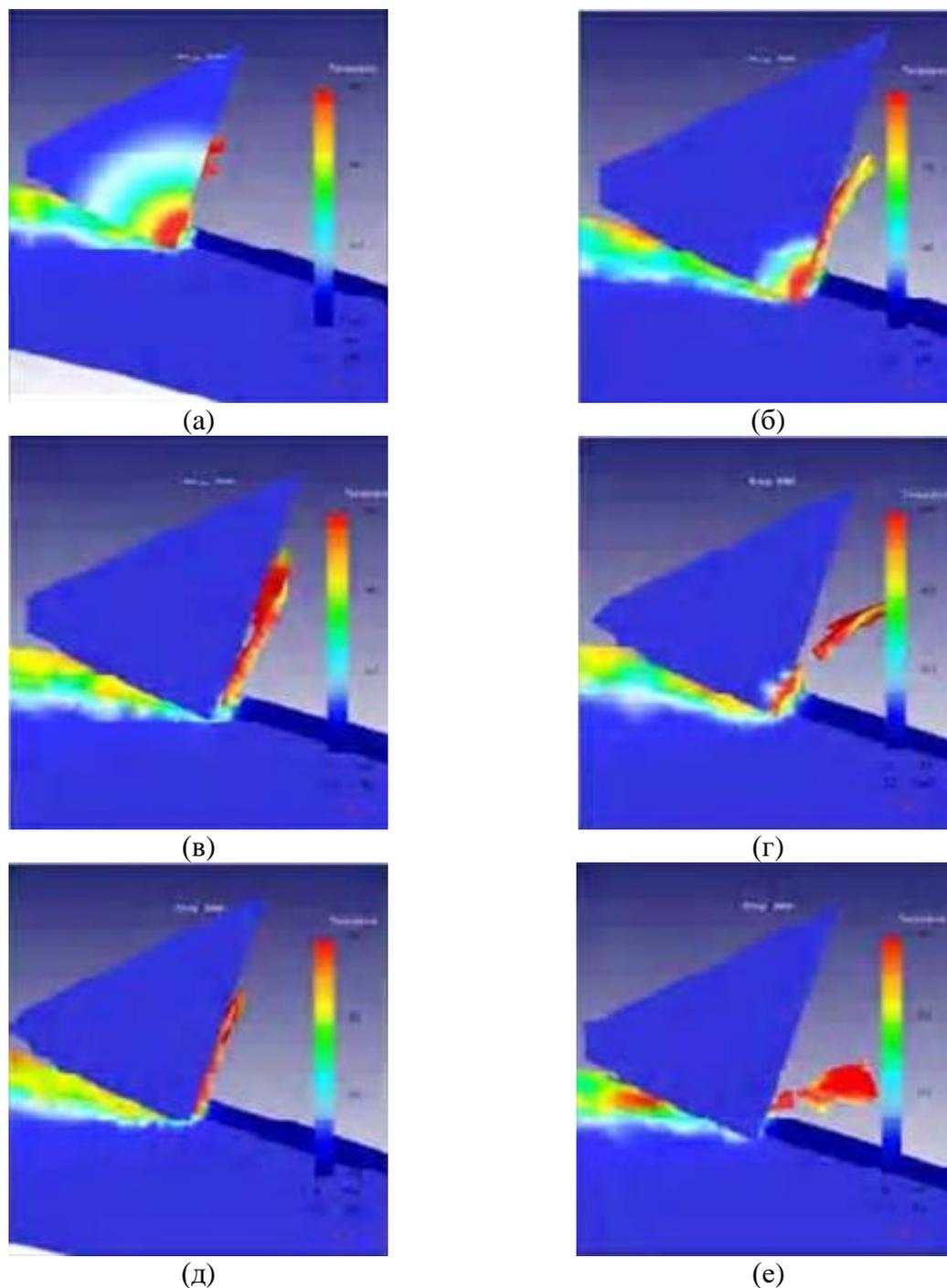


Рис. 4. Расчет температурных полей в среде Deform 3D: без покрытия (а); TiN толщиной 5 мкм (б); TiCN толщиной 5 мкм (в); слой TiN толщиной 5 мкм и слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 5 мкм (г); слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 5 мкм и слой TiCN толщиной 5 мкм (д); слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 5 мкм и слой TiN толщиной 5 мкм (е)

Проводилось моделирование при различных коэффициентах теплопроводности износостойкого покрытия и образовавшихся на поверхности инструмента вторичных структур. В целом сравнительный анализ результатов расчета значений температур по тепловым потокам (см. рис. 2), по моделированию (см. рис. 3, 4) и данных натуральных экспериментов показал, что расхождение составляет 4...9 % и является достаточно объективной оценкой температурного поля в зоне резания; моделирование в данной среде позволяет наряду с теплофизическими параметрами дополнительно учитывать технологические (скорость резания, наличие покрытия или СОТС, а также износа режущего инструмента) и их влияние на распределение тепловых потоков, что имеет большое значение при использовании этой методики в условиях реального машиностроительного производства.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫВОДЫ**

Для подтверждения теоретических зависимостей и гипотез были проведены триботехнические испытания и серии экспериментальных исследований влияния на износостойкость, температуру и усилие резания при точении и фрезеровании инструментальными материалами групп ВК, ТК и ТТК с многослойными покрытиями (TiCr)N, (TiAl)N, (AlTi)N, (TiAlCr)N, (AlTiCr)N различных обрабатываемых материалов в широком диапазоне изменения элементов режима резания.

Путем экспериментальных исследований установлено:

1) результаты натуральных экспериментальных исследований при точении и компьютерного моделирования теплофизических явлений при изменении температуры резания сопоставимы;

2) применение многослойных покрытий для металлорежущего инструмента позволяет существенно увеличить его износостойкость и период стойкости и, как следствие, повысить эффективность всего процесса при снижении температурно-силовой напряженности зоны резания за счет снижения прочности на срез адгезионных связей практически во всем исследованном диапазоне температур контакта; смещения (исключения) зоны приработочного износа; проявления эффекта перераспределения теплового потока и запаздывания тепловых явлений в зоне пластической деформации. Износостойкость твердосплавных пластин с покрытиями при точении, в сравнении с основой в исследуемом диапазоне режимов обработки, увеличилась в среднем в 2...2,5 раза.

Лучшие показатели эксплуатационных свойств многослойных покрытий характерны для (TiAl)N, (AlTi)N, (AlTiCr)N, причем с ростом подачи увеличивается вероятность хрупкого разрушения покрытия. При скоростях активного наростообразования разница в стойкости инструмента с покрытием и без покрытия предельно уменьшается. Покрытие принципиально не изменяет механизмы изнашивания твердых сплавов, сдвигая их в область более высоких скоростей резания за счет снижения уровня термомеханической напряженности в зоне резания.

Работоспособность покрытия резко возрастает при скоростях резания более 150 м/мин, когда оно повышает сопротивляемость твердосплавной матрицы диффузионному растворению в обрабатываемом материале и способствует смещению уровня оптимальных скоростей резания в сторону их увеличения.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.

2. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Минск: Вышэйш. шк., 1990. 512 с.
3. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
4. Исаев С.И. Термодинамика: учеб. для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 412 с.
5. Кабалдин Ю.Г., Семibrатова М.В., Кириченко В.В. Самоорганизация в процессах трения при резании // *Известия Томского политехнического университета*. 2002. Т. 305. № 1. С. 95–100.
6. Постнов В.В. Термодинамическое описание синхронизма механических и тепловых процессов при нестационарном резании металлов // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2009. Т. 12. № 4. С. 5–10.
7. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
8. Артамонов Е.В. О взаимосвязи внутренних напряжений в инструментальных твердых сплавах с работоспособностью сборных инструментов. Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. 161 с.
9. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Садыков А.Ф., Хусаенов И.И. Моделирование теплофизических явлений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 13–21.
10. Григорьев С.Н., Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Сеиткулов А.Р. Термодинамическая модель интенсивности износа режущего инструмента с покрытиями. Моделирование нелинейных процессов и систем: материалы Пятой Международной конференции. М.: Янус-К, 2021. С. 155–163.
11. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрyтия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 326 с.

**Для цитирования:** Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р. Температура резания при применении инструмента с многослойным покрытием // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 34–43.

## **CUTTING TEMPERATURE WHEN USING A MULTI-COATED TOOL**

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

In the work, analytical calculations are carried out and the nature of the distribution of heat fluxes in the cutting zone when using wear-resistant coatings is established. Thermophysical phenomena in the cutting zone are modeled when using composite wear-resistant coatings on a cutting tool with the effect of self-organization under friction conditions. To confirm the phenomenon of self-organization and redistribution of heat fluxes in the contact zone, a series of adhesive, wear-resistant, temperature and force studies were

carried out when turning various grades of steels and alloys. An increase in the wear resistance of a cutting tool with a multilayer composite coating is established by redistributing the heat flux in the cutting zone due to the formation of protective shielding secondary structures.

*Keywords:* metal cutting, friction, wear, wear-resistant coatings, thermodynamics, tribosystem, self-organization, secondary structures, thermal conductivity, cutting temperature, wear resistance.

## REFERENCES

1. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 288 p.
2. Yashcheritsyn P.I., Yeremenko M.L., Feldshteyn Ye.E. *Teoriya rezaniya. Fizicheskiye i teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Cutting theory. Physical and thermal processes in technological systems]. Minsk: Vysheysh. shk., 1990. 512 p.
3. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 278 p.
4. Isaev S.I. *Termodinamika: uchebnik* [Thermodynamics: textbook]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2000. 412 p.
5. Kabaldin Yu.G., Semibratova M.V., Kirichenko V.V. Self-organization in cutting friction processes. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2002. V. 305. No 1, pp. 95–100. (In Russian).
6. Postnov V.V. Thermodynamic description of synchronism of mechanical and thermal processes in non-stationary cutting of metals. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. V. 12. No 4, pp. 5–10. (In Russian).
7. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezaniye materialov. Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii* [Cutting materials. Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2001. 448 p.
8. Artamonov E.V. *O vzaimosvyazi vnutrennikh napryazheniy v instrumentalnykh tverdykh splavakh s rabotosposobnostyu sbornykh instrumentov* [On the relationship of internal stresses in tool hard alloys with the performance of prefabricated tools]. Tyumen: TyumGNGU, 2014. 161 p.
9. Migranov M.Sh., Migranov A.M., Sadykov A.F., Khusaenov I.I. Modeling of thermophysical phenomena. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki»*. 2020. No 3 (7), pp. 13–21. (In Russian).
10. Grigoriev S.N., Migranov M.Sh., Migranov A.M., Seitkulov A.R. Thermodynamic model of the wear rate of a coated cutting tool. Modeling of nonlinear processes and systems. *Materials of the V international conference*. Moscow: Janus-K. 2021, pp. 155–163. (In Russian).
11. Krioni N.K., Migranov M.Sh. *Pokrytiya i smazki dlya vysokotemperaturnykh tribosopryazheniy* [Coatings and greases for high temperature tribo conjugation]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2016. 326 p.

Поступила в редакцию/received: 01.06.2021; после рецензирования/revised: 17.06.2021;  
принята/accepted: 21.06.2021

# ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОВШОВОГО ЭЛЕВАТОРА СКРЕПЕРНО-БУНКЕРНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ УБОРКИ ФРЕЗЕРНОГО ТОРФА

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, А.И. НЕКРАСОВА, аспирант

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Некрасова А.И., 2021

Проанализированы случаи отказов торфяных скреперно-бункерных уборочных машин. Доказано, что основной причиной отказов является пнистость торфяной залежи. При взаимодействии с пнем происходит резкое увеличение нагрузки на все элементы трансмиссии машины, что приводит к их временному выходу из работоспособного состояния. Первый элемент, с которым встречается пень, – ковш элеватора машины. В результате взаимодействия ковш получает повреждения в виде разрывов, зародившихся и развившихся трещин. Сформулированы предложения по увеличению надежности и эффективности скреперно-бункерной торфоуборочной машины путем установки простейшего устройства слежения за работой ковшového элеватора и улучшения конструкции самого ковша элеватора. Отмечено, что вследствие зарождения и развития трещин в зоне сварных швов ковша необходимо хотя бы один раз в год, во время проведения предсезонного технического обслуживания, подвергать дефектоскопии.

*Ключевые слова:* скреперно-бункерная уборочная машина, фрезерный торф, ковш, ковшовый элеватор, зарождение и развитие трещин, пнистость, ультразвуковая дефектоскопия.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-44-51**

### ВВЕДЕНИЕ

Добыча фрезерного торфа, как многостадийный процесс, находится в прямой зависимости от надежности техники, используемой в производстве. Операции по уборке и транспортированию торфа машинами МТФ-43, будучи конечными в цикле добычи фрезерного торфа и уборке его скреперно-бункерным методом, во многом определяют эффективность и надежность всего производства, а также обуславливают качество конечной продукции [1, 2].

Статистические модели отказов уборочных машин достаточно полно описаны многими исследователями. Определены законы распределения времени безотказной работы и продолжительности устранения неисправностей машин, подсчитаны коэффициенты готовности машин. Выявлено, что надежность машин МТФ-41, 43 зависит от пнистости залежи.

Статистические данные времени безотказной работы уборочных машин классифицированы на три группы. В первую группу выборки включены наблюдения за

работой машин на беспнистой залежи, во вторую – на залежи с пнистостью 1–2 %. Третья группа представлена наблюдениями за работой машин на залежах с пнистостью разрабатываемого слоя 3 %. Данные наблюдений и статистических расчетов сведены в табл. 1, составленную по материалам исследований В.Г. Васильева и А.Н. Волкова [3].

Таблица 1. Статистические характеристики надежности скреперно-бункерных машин

Группа выборки	Среднее время безотказной работы $t_б$ , ч	Среднее квадратическое отклонение $\sigma_б$	Коэффициент асимметрии $A_s$	Эксцесс $E_x$	Коэффициент готовности машин $K_g$
1	24,2	18,2	1,5	2,9	0,83
2	19,2	19,7	1,9	3,6	0,79
3	11,2	10,0	2,2	7,0	0,69

Коэффициент готовности, характеризующий долю рабочего времени, в течение которого система выполняет производственные функции, подсчитывался по формуле [3]:

$$K_r = t_б / (t_б + t_в), \quad (1)$$

где  $t_в$  – среднее время восстановления оборудования, ч.

А.Н. Васильев, исследуя надежность технологического оборудования на верховой, низинной, переходной и смешанной залежах степенью разложения 19–21 % и пнистостью разрабатываемого слоя 1,0...1,6 %, определил параметры эмпирических распределений наработки на отказ и времени восстановления машин МТФ-41 и МТФ-43А [4]. Результаты этого исследования приведены в табл. 2.

Таблица 2. Нарботка на отказ и время восстановления скреперно-бункерных машин

Марка машины	Объем выборки, шт.	Среднее время наработки на отказ $t_б$ , ч	Среднее квадратическое отклонение от среднего времени наработки на отказ $\sigma_б$ , ч	Среднее время восстановления $t_в$ , ч	Среднее квадратическое отклонение от среднего времени восстановления $\sigma_в$ , ч
МТФ-41	104	46,7	42,8	4,8	5,5
МТФ-43	76	15,9	12,8	4,2	2,4

Вероятность пребывания машины в работоспособном состоянии в уборочные дни А.Н. Васильев оценивал коэффициентом использования  $K_u$ , диапазон изменений которого составил 0,734–0,984:

$$K_u = \sum t_0 / \sum x t_{сут}, \quad (2)$$

где  $t_0$  – продолжительность работы машины за уборочный промежуток сезона, ч;  $x$  – продолжительность уборочного промежутка, сут;  $t_{сут}$  – нормативная суточная продолжительность работы машины, ч.

Однако наблюдения за причинами выхода из работоспособного состояния машин в перечисленных источниках не приведены. Кроме того, из методики фиксации продолжительности работы и простоев оборудования следует, что отказы (простои) продолжительностью менее 1 ч не учитывались.

Поскольку перевод бункерной уборочной машины с гусеничного на пневмоколесный ход, свойственный современному производству, сопряжен с повышением скорости ее работы [5], необходимо тщательно проанализировать опыт эксплуатации этих машин и причины их выхода из строя, так как убытки от простоев машин будут значительно больше.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования характера простоев и фиксации времени на устранение причин простоев проводились на торфопредприятии «Оршинское-1» (производственный участок № 5) в 1987 г. Объем выборок был представлен двумя комплектами машин (по 4 шт.) МТФ-43 и МТФ-41 с увеличенным бункером, эксплуатировавшихся на залежах с пнистостью поверхностного слоя  $P = 1,5\%$  и  $P = 3\%$  [6]. Из анализа хронометражного журнала фиксации простоев исключались неисправности, не связанные непосредственно с условиями работы машины и являющиеся следствием производственного дефекта, который имелся на одной из машин (искривление передней правой части рамы, что вызывало неоднократное слетание правой гусеничной ленты с направляющего переднего колеса) и негативно отражался на ее работе. Обработка материалов велась стандартными статистическими методами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перечни наблюдавшихся в ходе исследований неисправностей для обеих выборок, и их статистическая обработка (среднее время наработки на отказ  $t_0$ , среднее время восстановления  $t_в$ , среднее квадратическое отклонение от среднего времени наработки на отказ  $\sigma_0$  и среднего времени восстановления  $\sigma_в$ ) приведены в табл. 3 ( $P = 1,5\% / P = 4\%$ ). Сам метод расчета статистических характеристик не представлен ввиду отсутствия новизны, его однотипности и универсальности [7].

Анализ приведенных данных показывает следующее. Такие неисправности, как заклинивание ковшového элеватора, поломка и деформация ковшей, разрыв цепи ковшového элеватора и неисправности предохранительной муфты включения ковшového элеватора, могут быть отнесены к отдельной группе неисправностей, вызванных резким увеличением нагрузок в приводе ковшového элеватора из-за застрявших пней между ковшами элеватора и металлоконструкцией машины в области скрепера. При исследовании работы первого комплекта машин на залежи с пнистостью  $P = 1,5\%$  эти неисправности составили в сумме 73 %, или 103 из 141 неисправности. Второй комплект машин, работая на залежи с пнистостью  $P = 3\%$ , подвергался большим нагрузкам, и эта группа неисправностей составила здесь 78 %, или 127 из 163 неисправностей. Таким образом, наибольшее количество неисправностей скреперно-бункерной машины типа МТФ-43 вызвано попаданием в скрепер пней и заклиниванием их между ковшами элеватора и металлоконструкцией машины, что, без сомнения, даже при однократном случае может привести к значительной деформации ковшей, сопровождающейся зарождением и развитием трещин в их теле (рис. 1).

С другой стороны, расчет среднего времени на восстановление и среднего квадратического отклонения от среднего времени восстановления на уровне десятых долей не показал отличий для машин, работающих на залежах с пнистостью 1,5 и 3 %.

Таблица 3. Распределение отказов скреперно-бункерных машин, работающих на торфяной залежи с пнистостью  $\Pi = 1,5\%$  /  $\Pi = 3\%$

Неисправность	Количество неисправностей	$t_6$ , ч	$\sigma_6$ , ч	$t_B$ , ч	$\sigma_B$ , ч
Заклинивание ковшového элеватора застрявшим пнем	<u>70</u>	<u>5,5</u>	<u>2,5</u>	<u>0,3</u>	<u>0,22</u>
	87	4,3	2,1	0,3	0,22
Поломка муфты и привода включения механизма выгрузки	<u>10</u>	<u>38,2</u>	<u>10,1</u>	<u>0,8</u>	<u>0,4</u>
	8	42,7	11,4	0,8	0,4
Поломка и деформация ковшей	<u>6</u>	<u>50,4</u>	<u>12,3</u>	<u>2,2</u>	<u>1,5</u>
	8	46,7	10,2	2,2	1,5
Неисправности гидросистемы привода включения механизма выгрузки	<u>6</u>	<u>51,6</u>	<u>18,4</u>	<u>1,0</u>	<u>0,6</u>
	4	64,3	23,1	1,0	0,6
Поломка карданной передачи привода машины	<u>10</u>	<u>32,1</u>	<u>8,0</u>	<u>1,5</u>	<u>0,8</u>
	11	31,5	8,3	1,5	0,8
Поломка редуктора привода ковшového элеватора и механизма выгрузки	<u>7</u>	<u>56,4</u>	<u>23,3</u>	<u>2,5</u>	<u>1,7</u>
	10	44,5	17,2	2,5	1,7
Разрыв цепи привода ковшového элеватора	<u>6</u>	<u>50,6</u>	<u>35,7</u>	<u>1,8</u>	<u>1,0</u>
	6	50,6	35,7	1,8	1,0
Неисправности предохранительной муфты включения ковшového элеватора	<u>21</u>	<u>12,3</u>	<u>4,6</u>	<u>0,4</u>	<u>0,3</u>
	26	10,0	3,6	0,4	0,3
Поломка металлоконструкции	<u>5</u>	<u>70,6</u>	<u>25,4</u>	<u>4,2</u>	<u>4,0</u>
	3	90,3	34,4	4,2	4,0

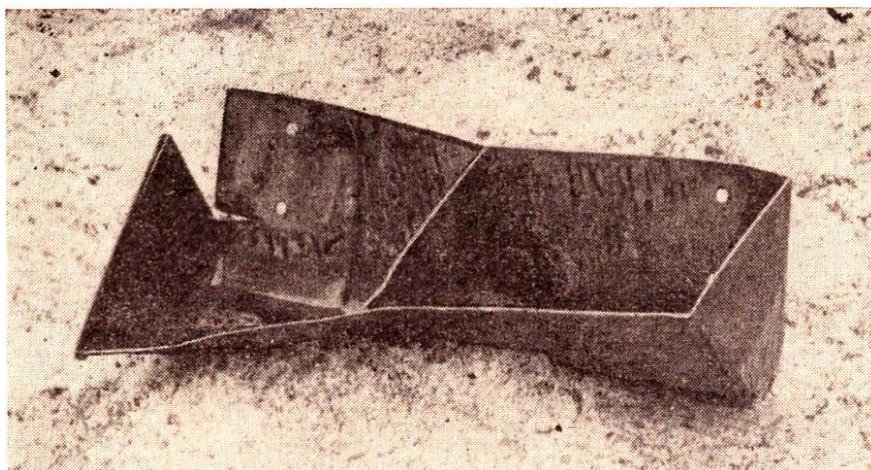


Рис. 1. Деформация ковша скреперно-бункерной машины с разрывом и развитием трещин вследствие однократного попадания на пень

Специфика конструкции машин и особенности их эксплуатации заключаются в том, что оператор, сидящий за пультом управления тягача, не в состоянии определить, работает ли ковшовый элеватор или нет, так как бункер машины закрывает весь обзор сзади, а никаких следящих устройств на машинах нет. О работе ковшового элеватора можно было судить лишь по количеству торфа, выгружаемого из бункера при разгрузке. Именно на приштабельных полосах происходит обычно визуальный осмотр ковшового элеватора при малом количестве выгруженного торфа или отсутствии такового вообще. Если заклинивание элеватора пнем происходит в начале валка, то потери торфа достигают до  $20 \text{ м}^3$  за один проход. При этом время обнаружения неисправности при скорости движения машины  $2,97 \text{ м/с}$  составляет до 200 с. Более точные данные о статистическом распределении характеристик неисправности получить не представлялось возможным ввиду невозможности определения момента заклинивания.

Не убранный из валка торф при неработающем ковшом элеваторе растаскивается скрепером по карте и образует потери. Кроме того, на холостой пробег трактора с бункерной машиной тратятся горючесмазочные материалы, что увеличивает себестоимость фрезерного торфа. Непроизводительный расход рабочего времени на холостой пробег машины, учитывая ярко выраженную сезонность производства, еще больше повышает себестоимость произведенной продукции.

Для решения этой проблемы две машины МТФ-43 и МТФ-41 с увеличенным бункером были оснащены крыльчатками, установленными на верхнем ведомом валу привода ковшового элеватора (рис. 2) [8].



Рис. 2. Скреперно-бункерная машина с ковшовым элеватором, оборудованная крыльчаткой слежения

При работе ковшового элеватора крыльчатка совершала вращательное движение, и машинист трактора-тягача, обернувшись назад, мог видеть это. При заклинивании ковшового элеватора крыльчатка останавливалась, и машинист, заметив это, должен был остановиться, выйти из кабины трактора и ликвидировать неисправность. Проведенное исследование работы машин с крыльчаткой контрольного слежения показало, что среднее время обнаружения заклинивания ковшового элеватора составляет 18 с со среднеквадратическим отклонением от математического ожида-

ния  $\sigma = 10$  с. При этом потери торфа в среднем составляют  $2,2 \text{ м}^3$  от одного заклинивания со среднеквадратическим отклонением от математического ожидания  $\sigma = 1,05 \text{ м}^3$  [4].

Требовалось увеличить прочность ковшей элеватора, что значительно позже было сделано специалистами ООО «Росторфинвест» (ныне – ООО «Пиндstrup») [9]. В качестве основного материала при изготовлении ковша был использован рифленый настил толщиной 4 мм из горячекатаной стали марки Ст3, а вдоль зачерпывающей грани ковша приварено усилительное ребро гнутого профиля из этого же рифленого настила (рис. 3).



Рис. 3. Ковши элеватора, изготовленные из рифленого настила на ООО «Пиндstrup»

Тем не менее анализ работы машин показывает, что, поскольку в сварочных швах ковшей все-таки зарождаются и развиваются трещины, которые необходимо своевременно ликвидировать, конструкция ковша должна быть подвергнута дальнейшей модернизации с периодическим контролем (хотя бы один раз в сезон, во время предсезонного обслуживания) с использованием ультразвукового дефектоскопа [10, 11].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования было наглядно проиллюстрировано, что основной причиной неработоспособного состояния скреперно-бункерных машин являются столкновения ковшей элеватора с пнем, которые случаются тем чаще, чем выше пнистость залежи. Увеличить надежность машин оказалось возможным благодаря установке простейшего устройства слежения на верхнем валу звездочек ковшового элеватора. Внесли свой вклад в улучшение конструкции ковшей и специалисты ООО «Пиндstrup». Однако факт зарождения и развития трещин в сварочных швах ковшей требует продолжения работ по усилению конструкций ковшей с использованием приборов ультразвукового контроля, способных обнаружить наличие трещин в сварочных швах ковшей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев А.В., Корчунов С.С. Справочник по торфу. М.: Недра, 1982. 760 с.
2. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
3. Васильев В.Г., Волков А.Н. Статистические модели отказов скреперно-бункерных торфоуборочных машин // *Машины и технология торфяного производства*. 1979. № 9. С. 34–38.
4. Васильев А.Н. Совершенствование процессов фрезерного торфа: монография. Тверь: ТГТУ, 2003. 172 с.
5. Яблонев А.Л. Пневматический колесный ход и особенности его взаимодействия с торфяной залежью: монография. Тверь: ТГТУ, 2011. 168 с.
6. Яблонев А.Л. Исследование отказов торфоуборочных машин типа МТФ-43 и МТФ-41 с целью повышения их надежности при переводе на пневматический колесный ход // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2012. № 20. С. 56–60.
7. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. М.: Недра, 1991. 240 с.
8. Патент РФ № 98473. *Элеватор для торфоуборочной машины* / Синицын В.Ф., Авдейчик Е.И., Яблонев А.Л. Заявл. 07.05.2010. Опубл. 20.10.2010, Бюл. № 29.
9. Гейлер В.Л., Дубовиков С.Л. Опыт работы ЗАО «Росторфинвест» // *Торф и Бизнес*. 2006. № 1 (3). С. 18–21.
10. Андреева Л.И. Применение методов оценки технического состояния горной техники на горнодобывающем предприятии // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*, 2018. № 5. С. 136–143. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-136-143.
11. Герике Б.Л., Хорешок А.А., Герике П.Б. Диагностика горных машин и оборудования. Кемерово: КузГТУ, 2012. 310 с.

**Для цитирования:** Яблонев А.Л., Некрасова А.И. Повышение эффективности и надежности ковшового элеватора скреперно-бункерной машины для уборки фрезерного торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2021. № 3 (11). С. 44–51.

### **INCREASING THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF THE BUCKET ELEVATOR OF THE SCRAPER-HOPPER MACHINE FOR HARVESTING MILLED PEAT**

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., A.I. NEKRASOVA, postgraduate

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

Cases of failures of peat scraper-bunker harvesting machines are analyzed. It has been proven that the main cause of failures is the stumpiness of the peat deposit. When interacting with the stump, there is a sharp increase in the load on all elements of the transmission of the machine, which leads to their temporary exit from the working state. The first element that the stump encounters is the machine's elevator bucket. As a result of interaction, the ladle is damaged in the form of ruptures, incipient and developed cracks. Proposals are formulated to

*Вестник Тверского государственного технического университета.*  
*Серия «Технические науки». № 3 (11), 2021*

increase the reliability and efficiency of the scraper-bunker peat harvesting machine by installing a simple tracking device for the operation of the bucket elevator and improving the design of the elevator bucket itself. It is noted that due to the initiation and development of cracks in the zone of welded seams, buckets must be subjected to flaw detection at least once a year, during pre-season maintenance.

*Keywords:* scraper-bunker harvester, milled peat, bucket, bucket elevator, crack initiation and development, stumpiness, ultrasonic flaw detection.

## REFERENCES

1. Lazarev A.V., Korchunov S.S. *Spravochnik po torfu [Peat Handbook]*. Moscow: Nedra, 1982. 760 p.
2. Panov V.V., Misnikov O.S., Kuporova A.V. Problems and prospects for the development of peat production in the Russian Federation. *Gorniy Informatsionno-analitichesky byulleten*. 2017. No 5, pp. 105–117. (In Russian).
3. Vasilyev V.G., Volkov A.N. Statistical models of scraper-bunker peat harvesters failures. *Peat production machinery and technology*. Minsk: Visheishaya shkola, 1979, pp. 34–38. (In Russian).
4. Vasilyev A.N. *Sovershenstvovaniye protsessov frezernogo torfa: monografiya [Improvement of milling peat processes: monograph]*. Tver: TGTU, 2003. 172 p.
5. Yablonev A.L. *Pnevmaticheskiy kolesniy hod i osobennosti yego vzaimodeystviya s torfianoy zalezhyu: monografiya [Pneumatic wheel running and features of its interaction with peat deposits: monograph]*. Tver: TGTU, 2011. 168 p.
6. Yablonev A.L. Investigation of failures of MTF-43 and MTF-41 peat harvesters in order to increase their reliability when converted to pneumatic wheel running. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2012. No 20, pp. 56–60. (In Russian).
7. Bogatov B.A., Kopenkin V.D. *Matematicheskiye metodi v torfianom proizvodstve [Mathematical methods in peat production]*. Moscow: Nedra. 1991. 240 p.
8. Patent RF 98473. *Elevator dlia torfouborochnoy mashini [Peat harvester elevator]*. Sinitsin V.F., Avdeychik Ye.I., Yablonev A.L. Declared 07.05.2010. Published 20.10.2010, Bulletin No 29. (In Russian).
9. Geiler V.L., Dubovikov S.L. Experience of CJSC "Rostorfinvest". *Torf i Biznes*. 2006. No 1(3), pp. 18–21. (In Russian).
10. Andreeva L.I. Application of methods for assessing the technical condition of mining equipment at a mining enterprise. *Gorniy Informatsionno-analitichesky byulleten*. 2018. No 5, pp. 136–143. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-136-143. (In Russian).
11. Gerike B.L., Horeshok A.A., Gerike P.B. *Diagnostika gornih mashin i oborudovaniya [Diagnostics of mining machines and equipment]*. Kemerovo: KuzSTU, 2012. 310 p.

Поступила в редакцию/received: 27.03.2021; после рецензирования/revised: 15.06.2021;  
принята/accepted: 21.06.2021

## СИСТЕМА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗНОС ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: gorloviv@yandex.ru

© Горлов И.В., 2021

В статье приведено описание системы анализа триботехнических испытаний, которая позволяет на основе объективных данных контроля оценивать состояние изучаемого объекта путем комплексной обработки информации, получаемой в процессе исследований. Использование предлагаемой динамически изменяемой системы обработки информации дает возможность легко корректировать процесс испытаний трибоузлов с целью получения требуемых параметров для анализа результатов измерений.

*Ключевые слова:* торфяные машины, эксплуатация, модернизация, надежность, ресурс, узлы трения, исследования.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-52-62**

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей эксплуатации торфяных машин (ТМ) является сезонность их использования. Следовательно, недопустимо, чтобы трудоемкие отказы приводили к простоем машин в весенне-летний период. Конструкция основных узлов трения торфяной машины должна обеспечивать необходимую долговечность, износостойкость, доступную взаимозаменяемость по деталям и обладать достаточно удобной сборкой.

Большинство деталей торфяных машин, особенно их рабочие органы и гусеничные механизмы, работают в тяжелых условиях и подвергаются статическим и динамическим нагрузкам, подвержены воздействию агрессивной окружающей среды. В процессе длительной эксплуатации торфяные машины неоднократно ремонтируются в связи с тяжелыми условиями эксплуатации (значительная влажность и высокая кислотность торфяной залежи, наличие абразивных частиц и древесных включений и т.п.). По статистическим данным эксплуатации ТМ известно, что с увеличением наработки затраты на текущий и аварийный ремонт машин значительно возрастают, а производительность снижается [1, 2]. Наступает такой момент, когда восстановление работоспособности машины становится экономически невыгодным, а дальнейшая ее эксплуатация принесет убытки. Следовательно, при конструировании и модернизации торфяных машин требуется добиваться существенного повышения ресурса трибоузлов, что обеспечит снижение затрат на эксплуатацию. Улучшение условий трения в узлах ТМ позволит активно влиять на основные факторы, определяющие характер взаимодействия трущихся поверхностей, что предотвратит их преждевременное разрушение.

Торфяную машину снимают с эксплуатации, когда стоимость выполняемых ею работ превышает некоторый установленный для конкретного предприятия минимум. При этом предельная наработка ТМ определяется исходя из экономических

соображений [3]. Основная цель производителей и эксплуатирующих организаций торфяных машин должна сводиться к максимальному повышению надежности [4], в том числе и за счет модернизации узлов трения агрегатов, что невозможно без современного измерительного оборудования.

В настоящее время для проведения триботехнических исследований используется широкий спектр испытательных машин, реализующих различные схемы трения [5–7]. Эти машины позволяют устанавливать большинство основных триботехнических характеристик узлов трения. Однако достаточно часто возникают проблемы, решение которых, вследствие особенностей исследуемых объектов, не может быть основано на применении типовых устройств. В этих случаях необходимо использовать оригинальные, специально разработанные устройства, моделирующие реальные узлы. Однако при использовании таких устройств не всегда удается получить достоверные результаты ввиду ограничений, связанных с конструктивными особенностями специальных испытательных машин. Так как для таких устройств не всегда возможна однозначная интерпретация получаемых результатов, то для их правильной оценки требуется контролировать более широкий спектр параметров.

Например, установка, используемая для определения фрикционных свойств материалов [8] позволяет измерять только один параметр – силу трения между образцами и скользящим. В ее конструкции применяется один датчик (тензобалка LPS-30) для измерения силы трения. Давление на образцы создавалось весовым способом с помощью грузов, системы рычагов и блоков. Считалось, что давление на контактную поверхность образцов было постоянным, однако в ходе исследования возникли некоторые сложности с интерпретацией полученных результатов в связи с нестабильностью коэффициента трения, которая может быть объяснена колебанием нагрузки на образцы. Проанализировав полученные результаты и конструкцию машины трения, выявили, что как нагрузка на образцы, так и параметры движения были нестабильны в силу деформации образцов при изменении направления скольжения и конструктивных особенностей установки. В связи с этим потребовалось дополнительно регистрировать нагрузку на образцы, а также скорость их скольжения. При наличии таких показателей появляется возможность для более достоверной интерпретации полученных данных.

## **ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

На сегодняшний день существуют различные подходы к решению задач триботехники с помощью информационных систем. Однако в основном предполагается жесткая привязка аппаратного и программного обеспечения к конкретной испытательной машине. Вследствие этого затруднено функциональное расширение системы регистрации, обработки и сохранения данных, что позволило бы с минимальными изменениями дополнить либо исключить тот или иной параметр исследования узла. С учетом этого обстоятельства потребовалось разработать динамически изменяемую и гибкую систему, позволяющую легко корректировать процесс исследования триботехнических узлов.

С опорой на имеющиеся технические и вычислительные возможности была создана система мониторинга, включающая в себя регистрацию, обработку, анализ и сохранение данных с датчиков трибоузлов и результатов исследования. Ключевой отличительной особенностью разрабатываемой системы является неограниченная и достаточно простая функциональная расширяемость процесса исследования трибоузлов, благодаря чему при необходимости можно добавлять или исключать

параметры исследования как при планировании исследования, так и во время его проведения. Кроме того, приложение такой системы дает возможность устанавливать взаимозависимости исследуемых параметров, осуществлять необходимые вычисления для получения требуемого результата исследования и проводить как визуальный, так и автоматизированный анализ с возможностью обратной связи. Кроме того, с помощью данной системы возможно измерение сложнопрогнозируемых параметров, которые могут быть получены не непосредственно с датчиков исследуемого трибоузла, а только при проведении анализа полученных данных. Например, при исследовании конкретного узла проводится виброакустический контроль с последующим анализом данных, результатом которого станет показатель зависимости силы трения от уровня вибраций или шума в трибоузле.

Система включает в себя подсистемы:

- исследуемый объект с датчиками, установленными на его узлах;
- преобразователь информации, получаемой с датчиков и отправляемой на ЭВМ (в частном случае – многоканальный аналогово-цифровой преобразователь);
- контроллер управления параметрами исследуемого объекта, который получает команды от ЭВМ и воздействует на параметры узлов или объекта в целом;
- ЭВМ с установленным на ней специально разработанным приложением.

С исследуемого объекта, находящегося в реальных эксплуатационных условиях, с помощью датчиков снимается информация о состоянии узлов. Затем полученная информация обрабатывается преобразователем, который конвертирует аналоговый сигнал датчиков в цифровые данные с последующей передачей в специально разработанное приложение, установленное на ЭВМ. Данные, полученные приложением со всех преобразователей информации, сохраняются в удобном для обработки и анализа виде. Кроме того, приложение может влиять на исследуемые параметры посредством передачи управляющих команд на контроллер управления, который в свою очередь будет воздействовать на исполнительные устройства исследуемого узла. Таким образом, оператор ЭВМ с помощью этого приложения может вести наблюдение и контролировать измеряемые параметры в исследуемом объекте в режиме реального времени. Кроме того, можно настроить приложение таким образом, что оно будет автоматически воздействовать на свойства исследуемого трибоузла посредством контроллера управления, и это также расширяет возможности исследования и повышает точность измерений.

Конструктивно измерительный блок состоит из корпуса, выполненного из листовой стали, на сторонах которого расположены разъемы и светоиндикация. Внутри корпуса смонтирована электронная схема преобразователя и контроллера, выполненная из однослойной печатной платы с размещенными на ней электронными компонентами. Периферия блока содержит:

- разъем для питания (12 В);
- коммуникационный порт (RS-232);
- разъем (DB-25F) для присоединения датчиков и исполнительных устройств и световую индикацию состояния (зеленый и красный светодиоды).

Питание блока осуществляется постоянным током с напряжением  $12 \pm 2$  В через разъем питания типа штырьковый 5,5x2,1. Сила тока, потребляемого блоком, должна быть не более 300 мА. Соединение и обмен данными блока с ЭВМ осуществляется по четырехпроводной схеме через коммуникационный разъем типа DB-9F по стандарту RS-232. Для получения аналогового сигнала с датчиков, а также осуществления питания промежуточных цепей измерения и выходов контроллера управления используется разъем аналогового интерфейса блока типа DB-15F. Напряжение питания

промежуточных цепей измерения на выходе аналогового интерфейса составляет  $5 \pm \pm 0,05$  В, а ток нагрузки внешних цепей не должен превышать 200 мА. Выходы контроллера управления (три линии) поддерживают уровни CMOS 5 В с током вытекания не более 40 мА, а втекания – не более 4 мА. Световая индикация включает в себя два светодиода: зеленый, который отображает нормальный режим работы блока и наличие синхронизации с ЭВМ, и красный, отображающий наличие ошибок при функционировании блока. На рис. 1 изображен электронный блок.

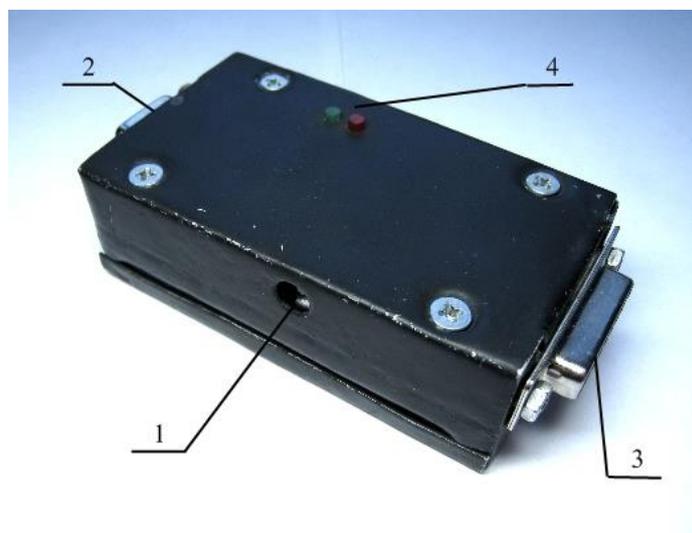


Рис. 1. Внешний вид электронного блока: 1 – разъем питания 12 В; 2 – разъем цифрового интерфейса RS-232; 3 – разъем аналогового интерфейса блока, 4 – световая индикация работы блока

Схема блока аналоговой части построена на основе аналогово-цифрового преобразователя AD7798 и прецизионного линейного стабилизатора 5 В для опорного питания, а цифровой части – на основе микроконтроллера серии STM8 и преобразователя уровней TTL – RS-232.

Для запуска блока необходимо подать питающее напряжение. После того как напряжение поступило на схему блока, происходит его подготовка к работе.

Подготовка блока к работе осуществляется следующим образом:

подается питание на микроконтроллер (МК) с последующим его рестартом;

подается питание на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП);

далее МК связывается с АЦП и инициализирует его;

после инициализации АЦП подается питание на аналоговые цепи питания 5 В и включается защита от перегрузки выхода опорного напряжения;

начинается синхронизирующая последовательность для связи с ЭВМ по RS-232;

если при подготовке блока не допущено никаких ошибок, начнет мигать зеленый светодиод, что означает готовность к синхронизации блока с ЭВМ;

при наличии ошибок в подготовке блока начнет мигать красный светодиод.

После подготовки блока, если он подключен к ЭВМ и запущено специальное приложение, осуществляется синхронизация, после которой блоком полностью можно управлять из этого приложения.

Встроенный АЦП блока поддерживает конвертирование с одного из трех входных аналоговых каналов, а также конвейерное сканирование входов (последовательное конвертирование со входов по очереди, устанавливаемой в параметрах

работы блока с помощью приложения). Входы АЦП являются дифференциальными, что обеспечивает максимальную универсальность применения данного блока. Наличие дифференциального входа на АЦП позволяет непосредственно подключать к аналоговым входам самые различные датчики (тензодатчики, измерительные мосты, датчики температуры, фотодатчики и т.п.). В блоке предусмотрено также переключение режима источника опорного напряжения от внутреннего опорного питания на 5 В или внешнего.

Разрядность АЦП составляет 16 бит, что подходит для большинства измерений, проводимых при испытаниях трибоузлов. Преобразование аналогового сигнала в цифровой код АЦП осуществляется по принципу  $\Sigma$ - $\Delta$  модуляции, что позволяет повысить помехоустойчивость измерений. Аналогово-цифровой преобразователь содержит встроенную систему подавления фона 50/60 Гц, индуктивно или кондуктивно наводимого в линиях связи измеряемого сигнала, благодаря чему блок может использоваться совместно с силовыми промышленными установками.

Три дискретных выхода блока позволяют управлять различными устройствами. При использовании выходов управления нужно применять усилители тока или оптронную гальваническую развязку, так как выходы управления являются слаботочными.

На рис. 2 представлена блок-схема устройства электронного блока с описанием цепей.

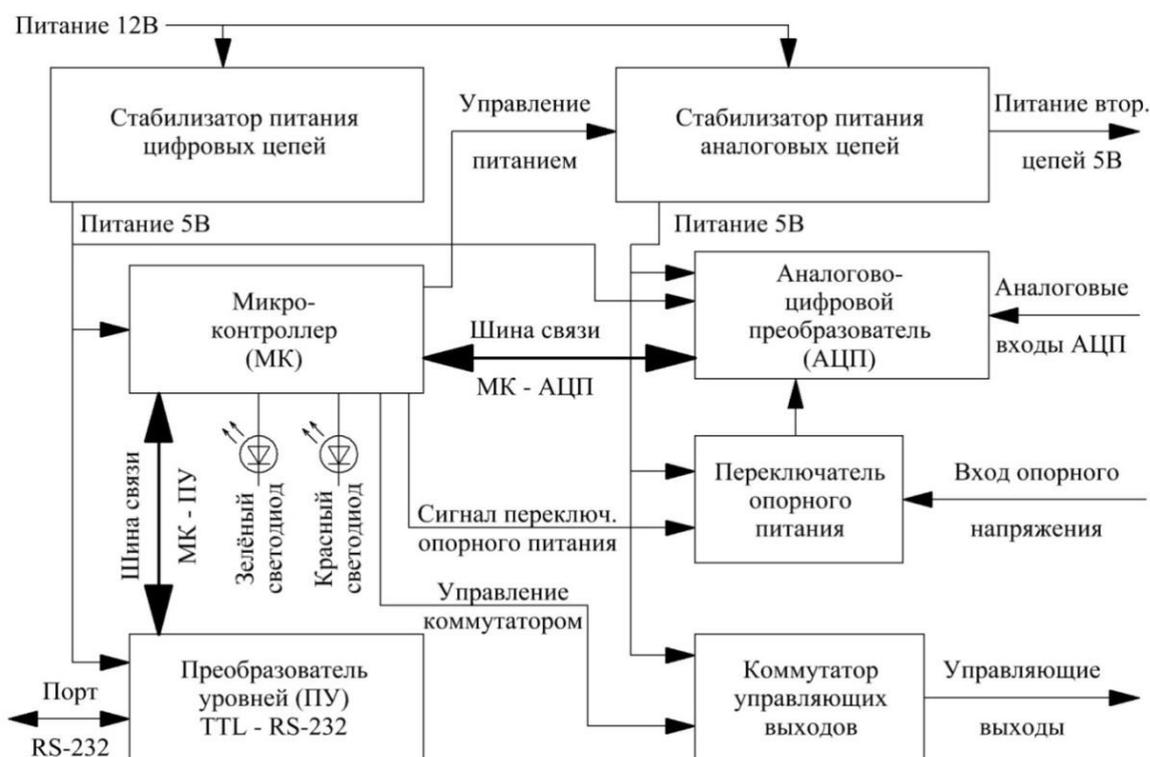


Рис. 2. Блок-схема измерительного устройства

Разработана обзорная версия специального приложения обработки данных. Приложение позволяет производить операции получения данных с контрольно-измерительного блока, производит необходимые вычисления с полученными данными, сохраняет результаты исследования на диск ЭВМ и осуществляет графическое отображение результатов.

Приложение построено с использованием среды .NET, хорошо зарекомендовавшей себя в системах обработки и организации баз данных. Промежуточным звеном между приложением и контрольно-измерительным блоком является драйвер устройства (блока), построенный в виде динамической библиотеки кода (.dll). Драйвер написан с использованием стандартных средств WinAPI ОС Windows на языке C++, что обеспечивает быстрдействие и оптимизированность программного кода.

При проектировании в приложение был заложен принцип потоков данных, заключающийся в построении динамических массивов данных, получаемых с внешних устройств измерительной системы или вычисляемых на основании первичных потоков данных. Такой принцип получения и хранения данных удобен как с точки зрения программного кода, так и для вычисления и отображения результатов исследования.

Возможности обзорной версии приложения:  
связь (синхронизация, получение данных измерения, управление функциями блока) с контрольно-измерительным блоком, осуществляемая через драйвер этого блока;  
сохранение полученных данных в потоки данных в памяти ЭВМ;  
создание дочерних потоков данных, выводимых из существующих;  
графическое отображение результатов исследования;  
удобная навигация при просмотре графиков результатов исследования;  
сохранение результатов исследования в энергонезависимую память ЭВМ в виде файлов с расширением «.dtf»;  
загрузка сохраненных на ЭВМ результатов исследования;  
сохранение графической информации результатов исследования в стандартных форматах векторных и растровых изображений.

Дальнейшее развитие приложения реализует множество других полезных функций, в том числе динамический анализ данных.

Графический интерфейс приложения организован по принципу многодокументного интерфейса MDI и состоит из главного окна приложения и дочерних функциональных окон, отображаемых в главном (рис. 3).

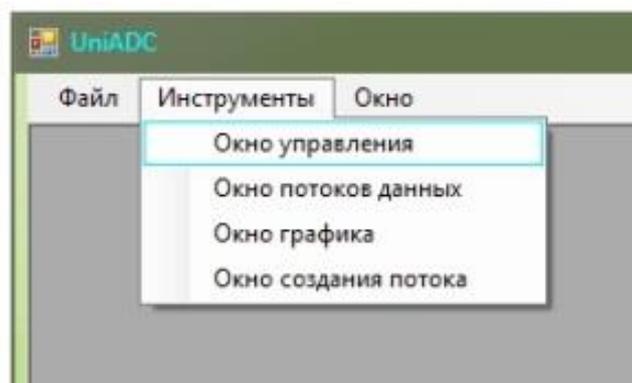


Рис. 3. Главное окно приложения

Меню главного окна содержит пункты, через которые осуществляется управление дочерними окнами. Для начала исследования необходимо открыть «Окно управления» в пункте меню приложения (см. рис. 3) и в нем осуществить подключение и настройки контрольно-измерительного блока. В окне управления на вкладке «Связь с устройством» производится поиск и синхронизация контрольно-измерительного блока (рис. 4).

После синхронизации блока с приложением можно осуществить настройку и запуск блока во вкладке «Ручное управление» как показано на рис. 5.

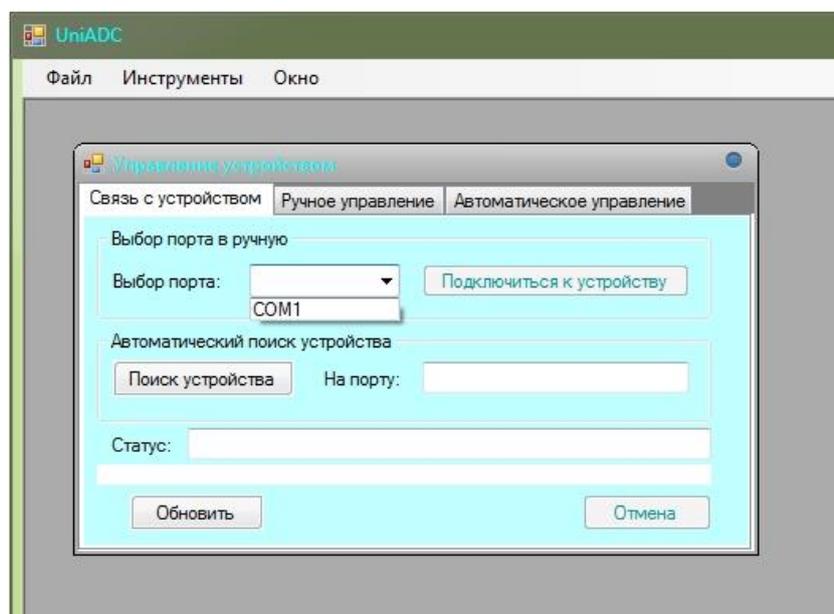


Рис. 4. Интерфейс окна управления контрольно-измерительным блоком, вкладка «Связь с устройством»

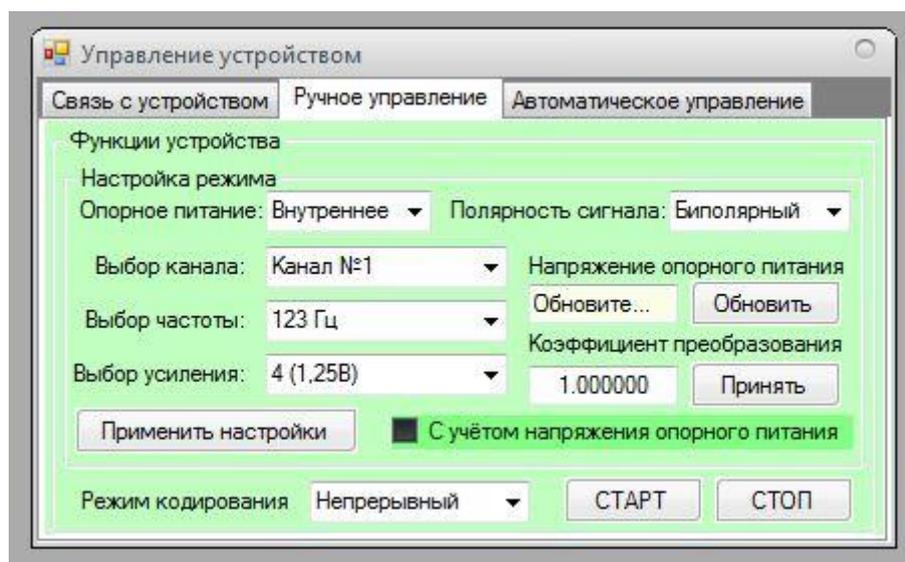


Рис. 5. Интерфейс окна управления контрольно-измерительным блоком, вкладка «Ручное управление»

Интерфейс вкладки «Автоматическое управление» и его функционал будет реализован в более поздних версиях приложения. Автоматическое управление позволит упростить процесс получения необходимых данных проводимого исследования, так как часть функций оператора приложения заменяется на автоматические функции приложения.

После запуска блока нажатием кнопки «Старт» создается первичный поток данных и начинается передача данных от блока в этот поток с выбранного канала с заданными параметрами. Созданный поток данных отобразится в окне «Потоки данных», где возможно управление данными, сохраняемыми в этом потоке, а также просмотр свойств, созданного потока данных (рис. 6).

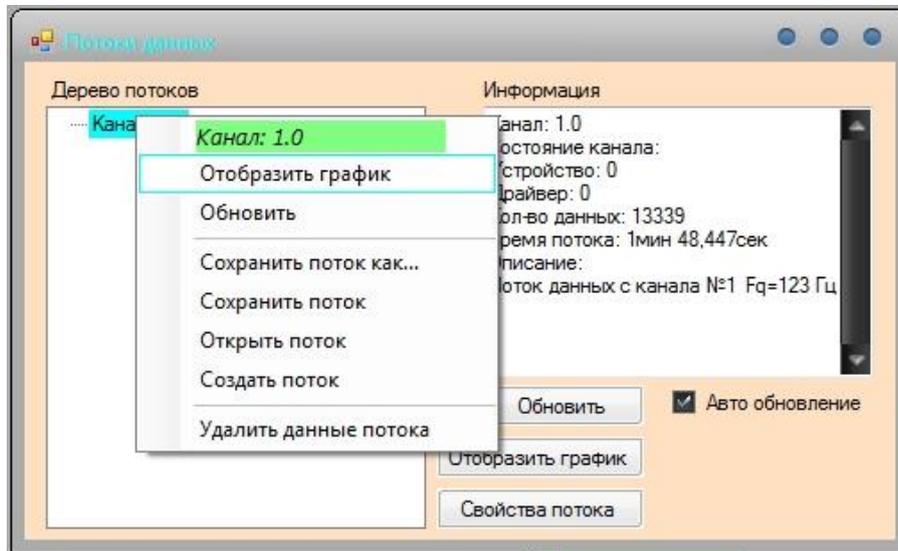


Рис. 6. Интерфейс окна «Потоки данных» с созданным потоком данных

Для просмотра информации, хранимой в потоке данных, нужно выбрать пункт контекстного меню «Отобразить график». Появится окно графического отображения выбранного потока данных, как показано на рис. 7.

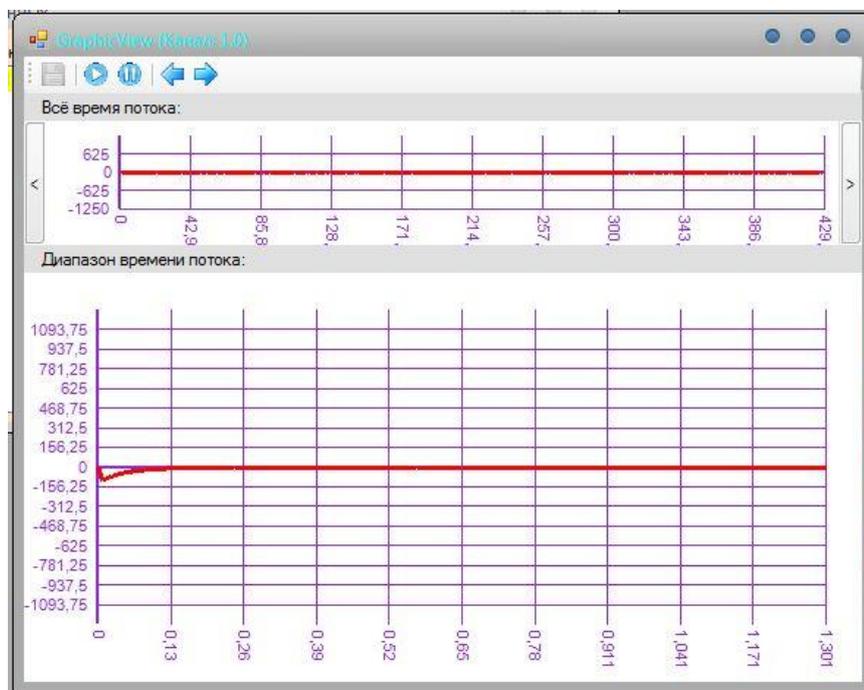


Рис. 7. Интерфейс окна «GraphicView» с графиком непрерывных данных, сохраненных в потоке данных

В окне графика есть как возможности навигации по всему потоку данных, так и по выделенному диапазону. Также возможно осуществлять масштабирование по осям графика и сохранять выделенный диапазон в графический файл.

Для создания нового потока данных производного (вычисляемого) из базового потока данных нужно в контекстном меню окна «Потоки данных» выбрать пункт «Создать поток». Откроется окно создания потока данных, интерфейс которого показан на рис. 8.

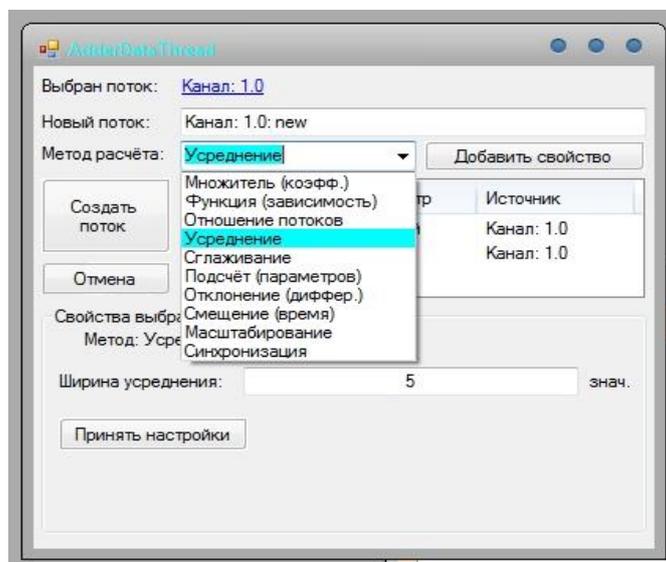


Рис. 8. Интерфейс окна «Создание потока данных»

В окне создания потока данных можно задать название нового потока, выбрать методы вычисления данных в раскрывающемся списке «Метод расчета». В нижней части окна расположена область, где осуществляется настройка методов вычисления данных нового потока. После создания нового потока данных он отобразится в дереве окна «Потоки данных» как дочерний элемент базового потока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной особенностью торфяных машин является сезонность их использования, а также относительно небольшой период эксплуатации, что обуславливает недопустимость длительных простоев машин в процессе добычи торфа. Несовершенство конструкции узлов трения и достаточно высокая металлоемкость агрегатов ТМ, а также тяжелые режимы эксплуатации требуют пристального внимания от инженерно-технического персонала машиностроительных предприятий с целью усовершенствования узлов трения, что позволит уменьшить затраты на ремонт и техническое обслуживание и тем самым обеспечить более высокую конкурентоспособность торфяной продукции. Модернизация узлов трения торфяных машин невозможна без использования самых современных технологий исследования. Созданная система мониторинга измеряемых параметров трибоузлов позволяет объективно оценивать состояние исследуемого объекта за счет комплексной обработки информации, получаемой в процессе исследования. Использование динамически изменяемой и гибкой системы дает возможность легко корректировать процесс исследования триботехнических узлов торфяных машин с целью получения необходимых параметров для анализа результатов.

Таким образом, более точная и достоверная информация, полученная в ходе анализа данных о состоянии конкретного трибоузла, позволяет качественно и быстро произвести оценку состояния исследуемого объекта и детально изучить трибологические процессы, протекающие на изучаемой поверхности трения. Использование модернизированных на основе глубоких исследований узлов трения может значительно увеличить ресурс трибоэлементов ТМ, что обеспечит снижение затрат на эксплуатацию и, следовательно, повысит эффективность использования машин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Бондарев Ю.Ю. Состояние технического перевооружения машинно-тракторного парка торфодобывающих компаний // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2014. № 3 (202). С. 229–235.
2. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В. Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия «Геология. Нефтегазовое и горное дело»*. 2015. № 14. С. 82–91.
3. Alhuraish I., Robledo C., Kobi A. Assessment of lean manufacturing and six sigma operation with decision making based on the analytic hierarchy process // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. № 12. P. 59–64.
4. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.
5. Pavlov V.G., Fishman R.I. Experimental and calculated estimate of wear rate of a rolling bearing lubricated with magnetic powder // *Journal of Friction and Wear*. 2002. V. 23. № 2. P. 49–54.
6. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: Инфра-М, 2014. 336 с.
7. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы (к 120-летию со дня рождения). М.: КРАСАНД, 2012. 512 с.
8. Горлов И.В., Болотов А.Н., Мешков В.В., Горлов А.И. Устройство для испытаний материалов для тяжело нагруженных узлов трения // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2014. № 7. С. 81–84.

**Для цитирования:** Горлов И.В. Система анализа результатов испытаний на износ трибоэлементов торфяных машин // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 52–62.

#### SYSTEM FOR RESULT ANALYSIS OF WEAR TEST FOR TRIBOELEMENTS OF PEAT MACHINES

I.V. GORLOV, Dr. Sc.

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

The article describes the system for the analysis of tribotechnical tests, which allows, on the basis of objective control data, to assess the state of the object under study on the basis of complex processing of information obtained in the process of research. The use of the

proposed dynamically variable information processing system makes it easy to correct the testing process of tribo assemblies in order to obtain the required parameters for analyzing the measurement results.

*Keywords:* peat machines, operation, modernization, reliability, resource, friction units, research.

## REFERENCES

1. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Bondarev Yu.Yu. The state of technical re-equipment of the machine and tractor fleet of peat mining companies. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2014. No 3 (202), pp. 229–235. (In Russian).

2. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Gabov V.V. Formation and efficient use of the machine park of peat mining companies. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya "Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo"*. 2015. No 14, pp. 82–91. (In Russian).

3. Alhuraish I., Robledo C., Kobi A. Assessment of lean manufacturing and six sigma operation with decision making based on the analytic hierarchy process. *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. No 12, pp. 59–64.

4. Bolotov A.N., Izmailov V.V., Novoselova M.V. Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya protsessov v tribotekhnicheskikh sistemakh: monografiya [Theoretical and experimental research of processes in tribotechnical systems: monograph]. Tver: TvSTU, 2019. 164 p.

5. Pavlov V.G., Fishman R.I. Experimental and calculated estimate of wear rate of a rolling bearing lubricated with magnetic powder. *Journal of Friction and Wear*. 2002. V. 23. No 2, pp. 49–54.

6. Dotsenko A.I., Buyanovskiy I.A. Osnovy tribotekhniki. Uchebnik [Basics of tribotechnics. Textbook]. Moscow: Infra-M, 2014. 336 p.

7. Khrushchov M.M. Treniye, iznos i mikrotvordost materialov: Izbrannyye raboty (k 120-letiyu so dnya rozhdeniya) [Friction, wear and microhardness of materials: Selected works (on the 120th anniversary of birth)]. Moscow: KRASAND, 2012. 512 p.

8. Gorlov I.V., Bolotov A.N., Meshkov V.V., Gorlov A.I. Material testing device for heavily loaded friction units. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2014. No 7, pp. 81–84. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 02.04.2021; после рецензирования/revised: 26.05.2021;  
принята/accepted: 01.06.2021

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.942

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО РАСКРОЯ СТАЛЬНОГО ПРОКАТА

Д.А. ЗОРЕНКО, канд. техн. наук

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

© Зоренко Д.А., 2021

В статье представлены основные результаты САЕ-моделирования процесса лазерного раскроя стального листового проката. Рассмотрены особенности создания расчетных моделей и полученных с их помощью параметров процесса. Получены картины температурных полей и распределения давления.

*Ключевые слова:* лазерный раскрой, температурное поле, метод конечных элементов, стальной листовой прокат, расчетная модель.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-63-68**

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерный раскрой металлов в современном машиностроении является одной из самых распространенных технологических операций заготовительного производства [1–6]. Луч лазера имеет ряд свойств, позволяющих остро сфокусировать его на обрабатываемой поверхности. Световой пучок несет энергетический заряд высокой плотности. Интенсивность излучения на поверхности обрабатываемого изделия при газолазерной резке достигает величины  $2 \cdot 10^6 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> [1–3]. Под его воздействием практически любой материал активно плавится и испаряется. Для эффективного удаления расплава осуществляют продувку канала реза вспомогательным газом. Используют кислород, воздух, азот, ряд инертных газов. Одним из основных видов лазерного раскроя является лазерный раскрой с продувкой струей азота под давлением, позволяющий интенсифицировать процесс, увеличить толщину раскраиваемого металла и защитить поверхность реза от окисления.

Целью работы является моделирование процесса лазерного раскроя в струе азота с помощью расчетных комплексов с использованием метода конечных элементов.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На сегодняшний день существует несколько САЕ-систем, позволяющих осуществлять моделирование различных этапов газолазерной резки. Для решения поставленной задачи была выбрана система прочностного анализа АРМ FEM, предназначенная для работы в интерфейсе российской САД-системы КОМПАС-3D. Расчетный комплекс работает на основе метода конечных элементов, который является численным методом решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого

твёрдого тела, теплообмена, газогидродинамики, электродинамики и топологической оптимизации.

Исходными данными являлись:

температура нагрева поверхности лучом 1 500 °С;

диаметр сфокусированного луча 0,3 мм;

диаметр струи азота 2 мм.

Давление азота в системе было принято равным 0,81 МПа. Толщина раскраиваемого листа 5 мм, соответственно, зазор между листом и торцом сопла был принят равным 3 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью упрощения моделирования процесс раскроя можно условно разделить на три составляющие, каждая из которых моделировалась отдельным этапом. На первом этапе производилось моделирование воздействия струи азота на поверхность раскраиваемого листа, представленное на рис. 1.

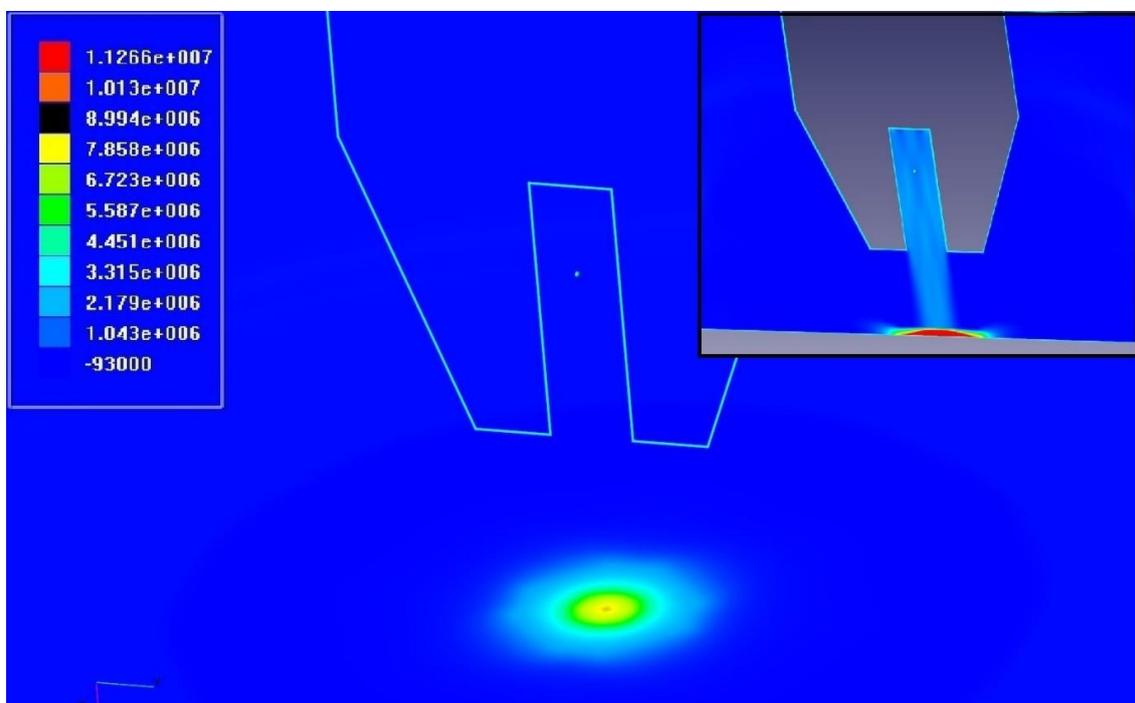


Рис. 1. Распределение давления струи азота по поверхности раскраиваемого листа

На втором этапе моделировался процесс нагрева листа лучом лазера. На рис. 2 представлено распределение температуры в массиве раскраиваемого материала при первоначальном контакте луча с поверхностью. Распределение температур по глубине листа показывает наибольшую температуру непосредственно в месте контакта с лучом, на глубине более 0,1 мм значение температуры падает ниже 1 100 °С. На следующих 0,1 мм глубины температура понижается еще на 400 °С. На глубине более 0,6 мм температура падает до значения 300 °С. Распределение температуры наблюдалось на временном интервале раскроя в 1 с (таблица). Температурное воздействие луча лазера на поверхность и давление струи азота являются основными факторами, определяю-

щими скоростные свойства процесса и технологические возможности, указывающие на наиболее эффективно раскраиваемые толщины стальных листов.

#### Распределение температуры по глубине металла в зоне нагрева

Расстояние от поверхности, мм	Температура, °С
0,01	1 450
0,05	1 380
0,1	1 010
0,15	720
0,2	630
0,25	580
0,3	510
0,35	470
0,4	430
0,45	370
0,5	310
0,7	260
0,9	220
1,0	190
3,0	80
6,0	40
10,0	20

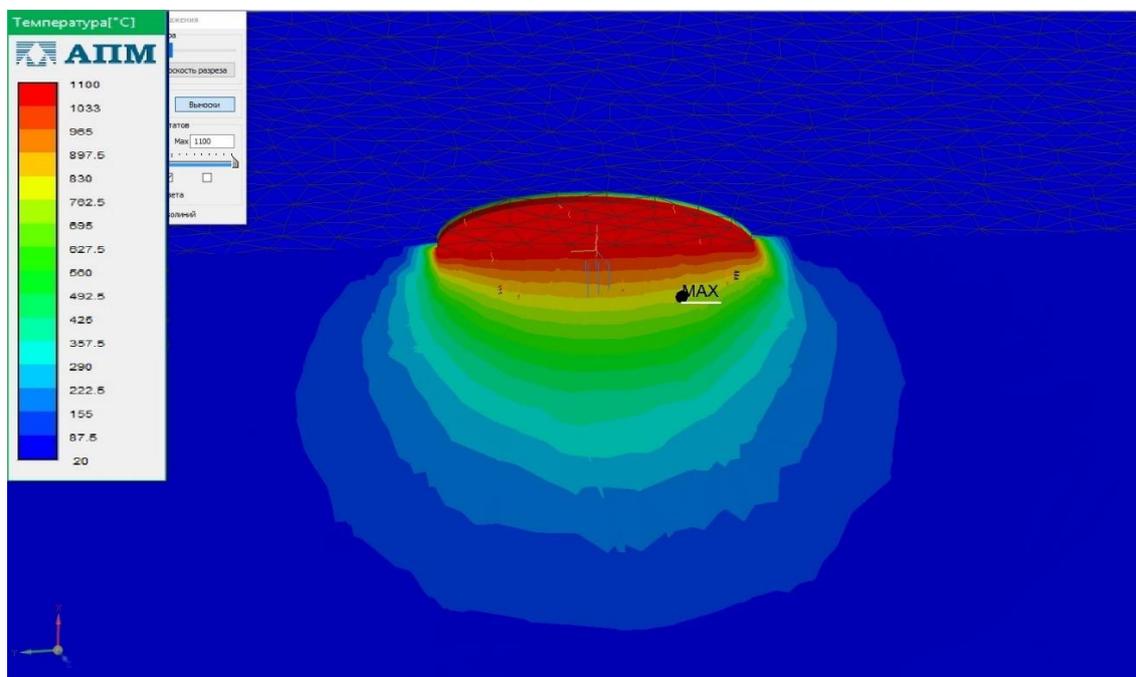


Рис. 2. Распределение температуры в зоне действия лазерного луча при его контакте с поверхностью (сечение)

Проверку результатов моделирования тепловых полей при газолазерной резке с продувкой азотом осуществляли по размерам зоны термического влияния образцов конструкционной стали, подвергнутых газолазерной резке [6]. Известно, что для каждой марки стали существуют критические температуры, при которых происходят фазовые превращения. Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов показало хорошее соответствие с точностью 5...10 %, что достаточно для практического использования по оценке протяженности зоны лазерного воздействия.

Имея представление о распределении температуры в объеме материала, производили моделирование напряженного состояния с учетом давления струи азота (рис. 3).

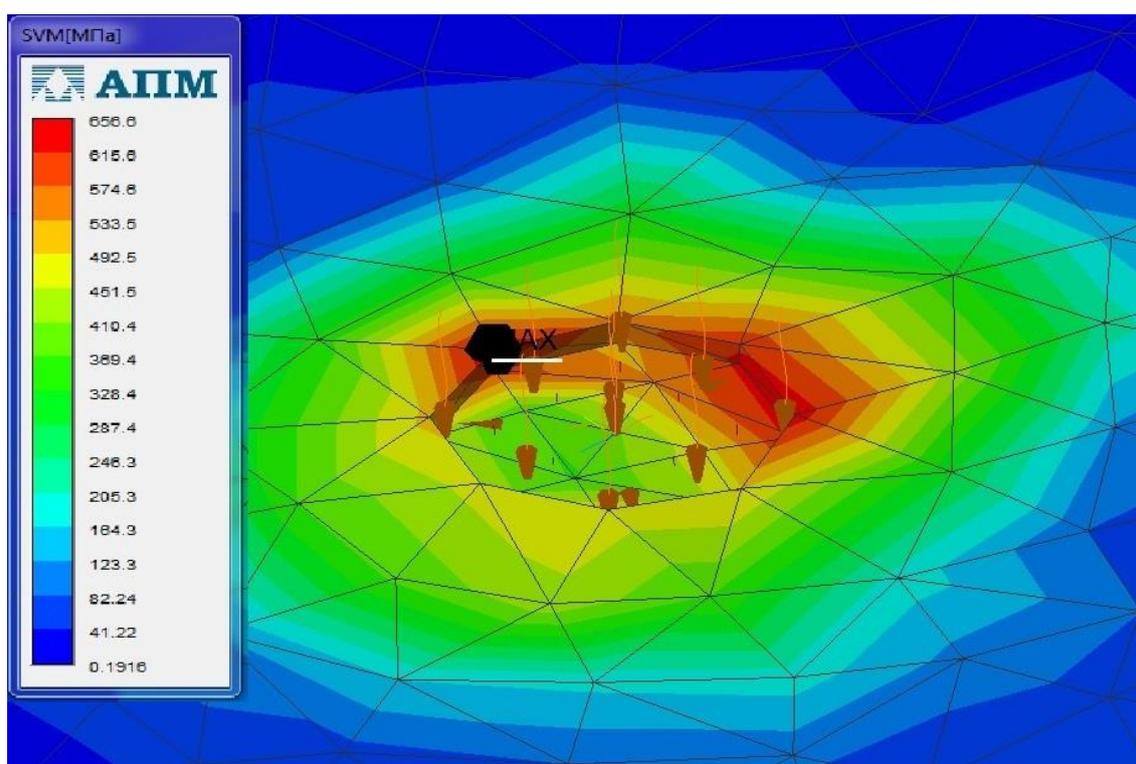


Рис. 3. Распределение механических напряжений в поверхностном слое нагретого стального листа под действием струи азота

Из распределения механических напряжений видно, что в зоне действия струи азота при рассматриваемых температурах они значительно превышают значение предела прочности стали 45 при сжатии. Из этого можно сделать вывод о гарантированном разрушении стали в зоне раскроя. Таким образом, показана возможность приближенного описания процесса без проведения сопряженных вычислений. Полученная модель позволяет отслеживать основные параметры процесса и их временные изменения. Результат представленного CAE-моделирования может служить основой для создания более точных расчетных моделей лазерного раскроя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода конечных элементов позволяет быстро, эффективно, а главное, достоверно смоделировать процесс лазерного раскроя стального листового металла. Результаты моделирования показали хорошую корреляцию с результатами реального технологического процесса. В дальнейшем возможно повышение точности моделирования за счет привлечения больших вычислительных мощностей. Кроме того, большего приближения моделирования к реальному процессу можно достичь применением сопряженных вычислений, одновременно учитывающих как температурное, так и механическое воздействие в процессе раскроя. Конечно-элементный модуль APM FEM фирмы «АСКОН» позволяет успешно решать задачи моделирования таких сложных процессов, как газолазерная резка стального листового проката.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические лазеры: справочник / под ред. Г.А. Абильсиитова. Т. 1. М: Машиностроение, 1991. 432 с.
2. Харанжевский Е.В., Кривилев М.Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество: учебное пособие. Ижевск: Удмуртский университет, 2011. 187 с.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
4. Petring D., Molitor T., Schneider F., Wolf N. Diagnostics, modeling and simulation: Three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers // *Physics Procedia*. 2012. V. 39. P. 186–196.
5. Зоренко Д.А. CAE-моделирование лазерно-кислородного раскроя стального листового проката // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2020. № 22. С. 5–8.
6. Макозюба Д.А., Ступина Т.М., Зоренко Д.А., Вареца Р.С., Афанасьева Л.Е. Влияние вспомогательных газов кислорода и азота на технологическую прочность зоны лазерного воздействия при раскрое стали 15пс // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2009. № 2. С. 142–145.

**Для цитирования:** Зоренко Д.А. Моделирование лазерного раскроя стального проката // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 3 (11). С. 63–68.

## SIMULATION OF LASER CUTTING OF ROLLED STEEL

D.A. ZORENKO, Cand. Sc.

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

The article presents the main results of CAE-modeling of the process of laser cutting of steel sheet products. The features of the creation of computational models and the process parameters obtained with their help are considered. The pictures of temperature fields and pressure distribution are obtained.

*Keywords:* laser cutting, temperature field, finite element method, steel sheet rolling, laser cutting, calculation model.

#### REFERENCES

1. Tekhnologicheskiye lazery: spravochnik [Technological lasers: directory]; Pod red. G.A. Abilsiitova. V. 1. Moscow: Mashinostroyeniye, 1991. 432 p.
2. Kharanzhevsky E.V., Krivilev M.D. Fizika lazerov, lazernyye tekhnologii i metody matematicheskogo modelirovaniya lazernogo vozdeystviya na veshchestvo: uchebnoye posobiye [Physics of lasers, laser technologies and methods of mathematical modeling of laser action on matter. Tutorial]. Izhevsk: Udmurtskiy universitet, 2011. 187 p.
3. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskiye protsessy lazernoy obrabotki [Technological processes of laser processing]. M: MGTU, 2006. 664 p.
4. Petring D., Molitor T., Schneider F., Wolf N. Diagnostics, modeling and simulation: Three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers. *Physics Procedia*. 2012. V. 39, pp. 186–196.
5. Zorenko D.A. CAE-modeling of laser-oxygen cutting of steel sheet products. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2020. No 22, pp. 5–8.
6. Makozyuba D.A., Stupina T.M., Zorenko D.A., Varetsa R.S., Afanasieva L.E. Influence of auxiliary gases oxygen and nitrogen on the technological strength of the zone of laser action during cutting of steel 15ps. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2009. No 2, pp. 142–145.

Поступила в редакцию/received: 07.04.2021; после рецензирования/revised: 20.05.2021;  
принята/accepted 01.06.2021

## УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ВЫСОКОГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

С.В. ЧЕРЕМНЫХ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: cheremnykh\_s.v@mail.ru

© Черемных С.В., 2021

Рассматривается вопрос применения инновационного оборудования, способного в режиме реального времени осуществлять контроль изменения состояния оснований и несущих конструкций зданий и сооружений. Оснащение объекта строительства системой мониторинга проводится впервые, при этом проработка узлов и деталей самой конструкции не выполняется. В качестве основы используются общие материалы запроектированного здания. Для системы мониторинга конструкций выделена цель ее использования и задачи, при решении которых обеспечивается сохранность и долговечность объекта строительства. Установка пунктов статистической диагностической системы выполняется на объектах тоннеля под горнолыжным склоном и металлической крыши пожарного депо и служит для предупреждения нарушения нормального состояния конструкций, а также потери их несущей способности. По результатам исследования выделяются критически важные несущие конструкции, на которые следует обратить внимание при эксплуатации объекта.

*Ключевые слова:* система мониторинга инженерных конструкций, несущая способность, напряженно-деформированное состояние, измерительные пункты статистической диагностической системы, мониторинг.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-69-78**

### ВВЕДЕНИЕ

В статье представлены инновационные технические решения по внедрению системы мониторинга инженерных (несущих) конструкций (СМИК) для объекта, расположенного на высокогорных территориях хребта Псехако Адлерского района города Сочи Краснодарского края, под названием «Совмещенный комплекс для проведения соревнований по лыжным гонкам и биатлону, горная олимпийская деревня».

Объект строительства представляет собой полностью автономный комплекс зданий, сооружений и инженерных сетей. Основные пассажирские и грузопотоки осуществляются посредством канатной дороги гондольного типа и проложенной через тоннель автомобильной дороги. Участок под строительство имеет многоугольную форму в плане и расположен на сложном рельефе с понижением местности с юга на север. Перепад рельефа позволяет комплексно использовать подземное пространство.

Согласно отчету по инженерно-геологическим изысканиям, основными инженерно-геологическими явлениями и процессами в пределах изучаемой площадки являются склоновые процессы и сейсмичность площадки. Однако на большей части проектируемого участка строительства при обследовании видимых следов опасных инженерно-геологических явлений и процессов не обнаружено.

Многофункциональный комплекс включает в себя главный корпус, в котором расположена инфраструктура для спортсменов и организаций соревнований; гостиничные корпуса, предназначенные для размещения 278 спортсменов; две встроенные автостоянки на 125 и 18 машиномест; трансформаторные подстанции; пожарное депо и тоннели (рис. 1).



Рис. 1. Совмещенный комплекс для проведения соревнований по лыжным гонкам и биатлону, горная олимпийская деревня: общий вид объекта

В качестве примера система мониторинга инженерных конструкций будет рассмотрена для тоннеля под горнолыжным склоном, сооруженного из сборных металлических гофрированных конструкций на заранее устроенных железобетонных фундаментах, и крыши пожарного депо, выполненной из металлических стропильных и подстропильных конструкций [1–6].

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Система мониторинга инженерных (несущих) конструкций рассмотренных объектов является средством контроля параметров (интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций, являющихся инвариантом по отношению к внешним воздействиям), состояния инженерных конструкций зданий и сооружений. Она служит для предупреждения нарушения нормального состояния конструкций и осуществляется с целями [7–10]:

обеспечения поддержания безопасности пребывания в зданиях и сооружениях посетителей, персонала путем автоматического мониторинга интегральных характеристик НДС инженерных конструкций зданий и сооружений объекта;

своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения НДС конструкций для фактического обследования состояния несущих конструкций здания, сооружения;

своевременного информирования персонала дежурно-диспетчерской службы (ДДС) через системы мониторинга и управления инженерными системами (СМИС) объекта и органов повседневного управления единой дежурной диспетчерской службы (ЕДДС) средствами СМИС о критическом изменении НДС конструкций зданий и сооружений объекта;

обеспечения формирования заключений о состоянии несущих конструкций зданий и сооружений.

Система СМИК выполняет ряд функций, главными из которых являются [7–10]:  
своевременное оповещение о критическом изменении состояния инженерных (несущих) конструкций персонала ДДС объекта и обеспечение принятия обоснованных решений по обеспечению безопасности посетителей и персонала, безопасная эксплуатация объекта;

мониторинг и регистрация в течение всего срока эксплуатации изменений состояния инженерных (несущих) конструкций;

информирование персонала ДДС объекта и ЕДДС о возможных изменениях состояния контролируемых инженерных (несущих) конструкций объекта.

Основными задачами СМИК являются следующие [7–10]:

обеспечение безопасности персонала, посетителей путем автоматического, осуществляемого в режиме реального времени мониторинга интегральных характеристик НДС несущих конструкций, своевременное информирование ДДС объекта и ЕДДС об их критическом изменении;

снижение риска утраты несущей конструкцией свойств, определяющих ее надежность, посредством своевременного обнаружения негативного изменения состояния несущих конструкций, которое может привести к их разрушению и повлечь человеческие жертвы;

организация автоматического и автоматизированного контроля и учета состояния несущих конструкций объекта.

#### *Структура СМИК объекта*

Система мониторинга инженерных (несущих) конструкций состоит из сигнальной и периодической систем мониторинга, представляющих собой автоматизированную систему, в состав которой входят технические средства, осуществляющие сбор, хранение, обработку и отображение измерений состояния несущих конструкций объекта, а именно [11–13]:

измерительные пункты статистической диагностической системы (ИП СДС);

программно-технический комплекс мониторинга состояния несущих конструкций.

Измерительные пункты статистической диагностической системы (ИП СДС) предназначены для контроля отклонений пространственной устойчивости и геометрической неизменяемости несущих конструкций. Программно-технический комплекс мониторинга состояния несущих конструкций сегмента (ПТК СМИК) служит для непрерывного автоматического мониторинга в режиме реального времени изменения значений параметров состояния несущих конструкций зданий и сооружений объекта путем получения данных от измерительных пунктов и выполняет при этом функции сигнальной и периодической подсистемы.

Функционально система мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений объекта включает в себя две подсистемы:

сигнальную подсистему;

подсистему периодического мониторинга.

Сигнальная подсистема мониторинга предназначена для осуществления в режиме реального времени непрерывного автоматического контроля параметров состояния несущих конструкций зданий и сооружений объекта через стационарные измерительные пункты с целью оповещения ДДС объекта и ЕДДС средствами СМИС в случае превышения значений измерения установочных параметров (предельно допустимых величин отклонения).

Основными задачами для сигнальной подсистемы являются:

сбор данных от датчиков, установленных в критически важных точках инженерных (несущих) конструкций здания, сооружения;

обработка и хранение полученных данных, определение интегральных характеристик и показателей изменения состояния инженерных (несущих) конструкций здания, сооружения;

информирование ДДС объекта и ЕДДС (посредством СМИС) о превышении значений установочных параметров.

В системе мониторинга состояния несущих конструкций различается два основных предельных состояния показаний измерения:

предаварийное;

нарушение нормального состояния.

Подсистема периодического мониторинга состояния инженерных (несущих) конструкций осуществляет контроль и обработку показаний измерений с целью предупреждения ситуаций, при которых значения регистрируемых параметров превысят установленные проектом предельно допустимые величины. Одним из результатов периодического мониторинга является оценка надежности здания, сооружения, т.е. возможность выполнения заданных функций в течение промежутка времени до следующего этапа периодического мониторинга [14–16].

Ввиду того, что мониторинг состояния несущих конструкций имеет, как правило, комплексный характер, включающий визуальный контроль, приборное (инструментальное) обследование и (при необходимости) автоматизированный мониторинг и его периодичность, а задачи решаются в каждом из этих видов контроля и определяются в регламенте работ периодического (внеочередного) мониторинга, основными задачами для подсистемы периодического мониторинга являются:

сбор и обработка измерений от датчиков сигнальной подсистемы, требуемых для своевременного прогнозирования изменений состояния несущих конструкций;

обеспечение выдачи заключений о состоянии несущих конструкций здания;

Обеспечение выдачи заключений о состоянии инженерных (несущих) конструкций здания, сооружения выполняется методом обработки данных от сигнальной подсистемы мониторинга для прогнозирования динамики изменения измерений к граничным (установочным) значениям за определенный период времени, тем самым сигнализируя о необходимости обратить внимание на фактическое состояние инженерной (несущей) конструкции здания, сооружения заблаговременно до момента выхода значений измерений за предельные состояния показаний измерения [17].

*Измерительный пункт статистической диагностической системы*

Для контроля отклонений пространственной устойчивости и геометрической неизменяемости инженерных (несущих) конструкций предусмотрены ИП СДС.

Измерительный пункт статистической диагностической системы состоит из следующих основных частей:

защитного кожуха (шкафа укрытия);

монтажной площадки (платформы);

крепежного комплекта;

измерителя наклона (датчика);

разветвителя.

Измеритель наклона предназначен для измерений малых углов наклона и наклонных перемещений объекта по двум координатам. Он применяется в системах мониторинга строительных конструкций, природных объектов, горных выработок, а также при проведении исследований изгибных деформаций элементов строительных конструкций и в системах контроля углового положения объектов.

Для установки измерительных пунктов используются соединенные с несущими конструкциями здания специальные монтажные площадки. Они монтируются на предварительно подготовленных (т.е. очищенных от коррозии) местах ранее демонтированного модернизируемого оборудования. Крепление оборудования на площадке осуществляется с помощью соединений, предусмотренных техническим паспортом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из конструктивных особенностей конструкции тоннеля и пожарного депо, можно выделить следующие критически важные несущие конструкции, элементы которых подлежат оснащению средствами СМИК [18, 19].

### 1. Тоннель под горнолыжным склоном

Контроль кренов и неравномерность осадок монолитного фундамента тоннеля под горнолыжным склоном осуществляется с помощью измерительных пунктов статической диагностики, устанавливаемых изнутри на монолитные железобетонные фундаменты по обеим сторонам тоннеля с шагом 18 м (рис. 2). Схема расположения металлических конструкций покрытия представлена на рис. 3.

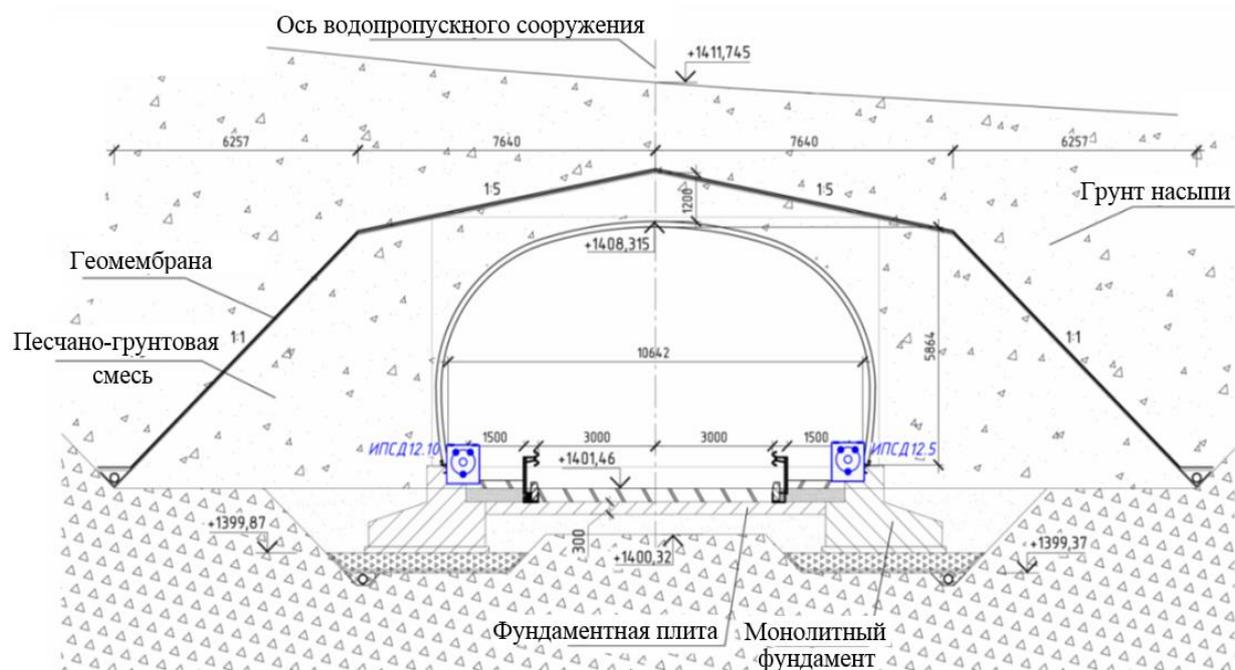


Рис. 2. Тоннель под горнолыжным склоном

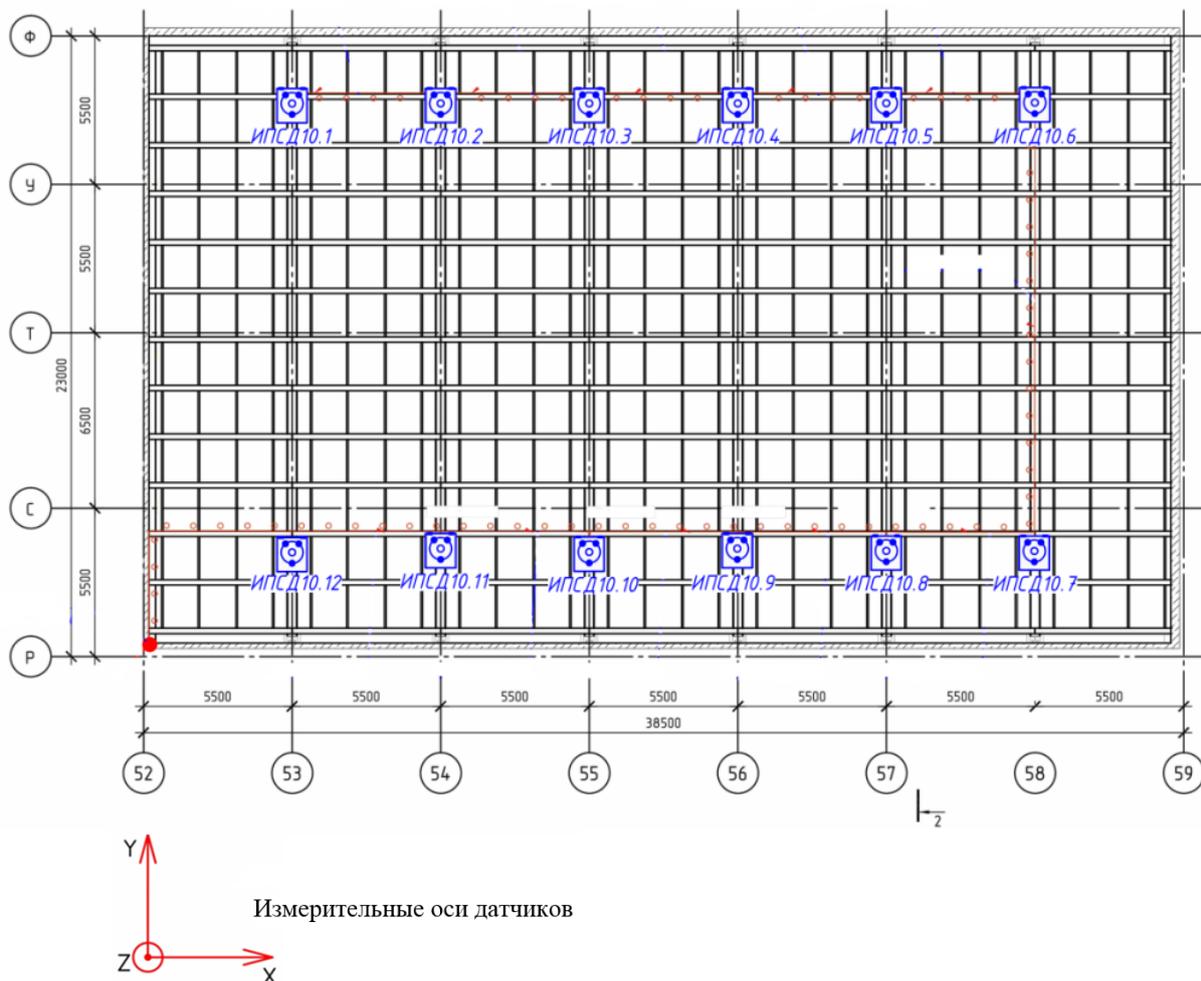


Рис. 3. Схема расположения металлических конструкций покрытия

## 2. Крыша пожарного депо

Контроль углов наклона и прогибов металлических ферм покрытия осуществляется с помощью измерительных пунктов статистической диагностики, устанавливаемых по два в нижнем поясе на каждой металлической ферме покрытия. Проводится для определения кренов и неравномерности осадок монолитного фундамента (рис. 4).

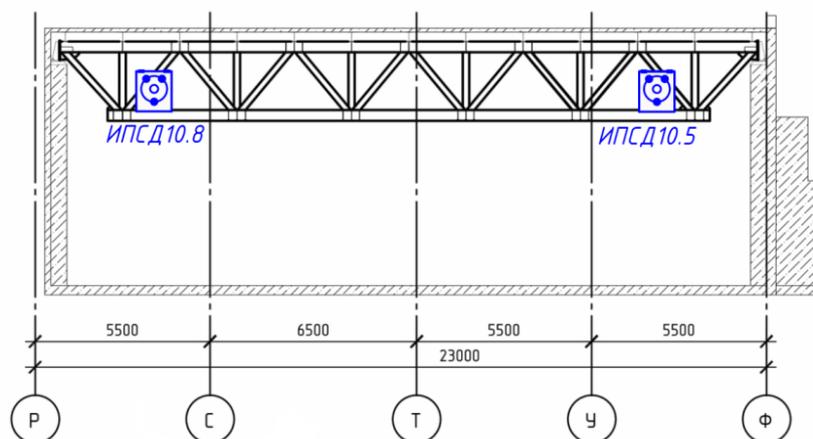


Рис. 4. Схема расположения измерительных пунктов (ИПСД) системы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка СМИК объекта обеспечивает:

- автоматический мониторинг подлежащих контролю параметров несущих конструкций здания, сооружения;
- автоматический сбор и хранение результатов мониторинга подлежащих контролю параметров несущих конструкций;
- автоматическую обработку результатов мониторинга подлежащих контролю параметров несущих конструкций для своевременного прогнозирования изменений состояния сооружения;
- визуальное отображение результатов мониторинга подлежащих контролю параметров несущих конструкций и сооружений;
- автоматическое информирование ДДС объекта и ЕДДС о превышении значений установочных параметров состояния несущих конструкций зданий и сооружений (посредством СМИС);
- автоматическое информирование ДДС объекта о превышении значений установочных параметров состояния несущих конструкций здания и сооружений (посредством СМИК, СМИС);
- обеспечение персонала объекта необходимой информацией для своевременного принятия эффективных мер по устранению инцидентов, аварий с целью предотвращения или локализации нештатной (аварийной/чрезвычайной) ситуации во избежание людских и материальных потерь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Кайтуков Т.Б., Петряшев Н.О., Петряшев С.О. О состоянии и развитии системы мониторинга инженерных конструкций башни «Эволюция» // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 1. С. 111–117.
2. Белый А.А., Долинский К.Ю., Осадчий Г.В. Система мониторинга инженерных конструкций при строительстве тоннеля под рекой Смоленка (г. Санкт-Петербург) // *Геотехника*. 2016. № 2. С. 18–27.
3. Рубцов И.В. Постановка задачи проектирования системы мониторинга большепролетных и уникальных объектов // *Технологии строительства*. 2008. № 1. С. 15.
4. Грабовый П.Г., Трухин Ю.Г., Трухина Н.И. Monitoring the stress state of frame structures of buildings and structures under the influence of operational load on construction sites // *Недвижимость: экономика, управление*. 2019. № 2. С. 46–52.
5. Jun T.A.O., Lei M.U., Ping D.U. Application of optical fiber sensors using linear ingaas spectral imaging technique to seepage monitoring of dam // *Acta Photonica Sinica*. 2010. V. 39. № 1. P. 42–46.
6. Идиатуллин Д.Р. Задачи минимизации ложных срабатываний систем мониторинга инженерных (несущих) конструкций (СМИК) // *Мониторинг. Наука и безопасность*. 2013. № 3. С. 36–43.
7. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Быковский В.А., Туляков Ю.А., Шерстюк С.П. Автоматизированная система мониторинга инженерных конструкций. Практика применения // *Датчики и системы*. 2014. № 11 (186). С. 71–78.
8. Ni N. Safety monitoring and evaluation of construction projects based on multi-sensor fusion // *Instrumentation, Measures, Métrologies*. 2020. V. 19. № 6. P. 431–441.
9. Grebenets V.I. Monitoring changes in geocryological conditions during the engineering preparation, construction, and occupancy of buildings and structures // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1999. V 36. № 5. P. 191–194.

10. Grecheneva A.V., Kuzichkin O.R., Mikhaleva E.S., Romanov R.V. The results of joint processing of geotechnical and geodynamic monitoring data of karst processes // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. V. 12. № S3. P. 6628–6634.
11. Xu Y. Mathematical modeling and numerical analysis of force monitoring of foundation pit support structure based on vibration response sensor system // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2019. V. 1. № 6. P. 134–144.
12. Muttillio M., Stornelli V., Paolucci R., de Rubeis T., Ferri G., Alaggio R., Di Battista L. Structural health monitoring: an iot sensor system for structural damage indicator evaluation // *Sensors*. 2020. V. 20. № 17. P. 1–15.
13. Bai Sh., Zhou Zh., Ou J. Design and testing of a novel wireless intelligent fatigue monitoring system // *Pacific Science Review*. 2011. V. 13. № 3. P. 186–189.
14. Vitola J., Pozo F., Tibaduiza D.A., Anaya M. Distributed piezoelectric sensor system for damage identification in structures subjected to temperature changes // *Sensors*. 2017. V. 17. № 6. P. 1252.
15. Il'in V.V., Shevlyagin Yu.S., Yudkevich A.I. Experience in the use of modern computer-aided technologies in the engineering-geology feasibility analysis of hydraulic structures // *Power Technology and Engineering*. 2003. V. 37. № 2. P. 69–73.
16. Cai L., Wu K., Yu Q., Feng J. A new method of equivalent material model deformation observation // *International Journal of Modern Education and Computer Science*. 2011. V. 3. № 5. P. 40–46.
17. Weng X., Sun Y., Niu H., Liu X., Dong Y., Zhang Y. Physical modeling of wetting-induced collapse of shield tunneling in loess strata // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. V. 90. P. 208–219.
18. Yang P., Qin W., Yang Y., Wang T. Study of feedback analysis and safety control of large-section tunnel excavation under intensive buildings // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2010. V. 29. № 4. P. 795–803.
19. Orlando A. On line monitoring of the power control and engineering parameters systems of the nemo phase-2 tower // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009. V. 602. № 1. P. 180–182.

**Для цитирования:** Черемных С.В. Устройство системы мониторинга инженерных конструкций для строительных объектов на высокогорных территориях // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 3 (11). С. 69–78.

## **INSTALLATION OF A MONITORING SYSTEM FOR ENGINEERING STRUCTURES FOR CONSTRUCTION PROJECTS IN HIGH-ALTITUDE AREAS**

S.V. CHEREMNYKH, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: cheremnykh\_s.v@mail.ru

The article considers the use of innovative equipment capable of monitoring changes in the state of the foundations and supporting structures of buildings and structures in real time. Equipping the construction site with a monitoring system is carried out for the first time,

while the study of the components and details of the structure itself is not carried out. The general materials of the designed building are used as the basis. For the structure monitoring system, the purpose of its use and the tasks that ensure the safety and durability of the construction object are highlighted. The installation of the points of the statistical diagnostic system is carried out on the objects of the tunnel under the ski slope and the metal roof of the fire station and serves to prevent violations of the normal state of the structures, as well as the loss of their load-bearing capacity. According to the results of the study, critical load-bearing structures are identified, which should be paid attention to when operating the object.

*Keywords:* monitoring system of engineering structures, load-bearing capacity, stress-strain state, measuring points of statistical diagnostic system, monitoring.

## REFERENCES

1. Belostockij A.M., Akimov P.A., Kajtukov T.B., Petryashev N.O., Petryashev S.O. About the state and development of the monitoring system of engineering structures of the tower «Evolution». *Academia. Arhitektura i stroitelstvo*. 2020. No 1, pp. 111–117. (In Russian).
2. Belyj A.A., Dolinskij K.YU., Osadchij G.V. Monitoring system of engineering structures during the construction of a tunnel under the Smolenka River (St. Petersburg). *Geotekhnika*. 2016. No 2, pp. 18–27. (In Russian).
3. Rubcov I.V. Setting the task of designing a monitoring system for large-span and unique objects. *Tekhnologii stroitelstva*. 2008. No 1, p. 15. (In Russian).
4. Grabovoi P.G., Trukhin Yu.G., Trukhina N.I. Monitoring the stress state of frame structures of buildings and structures under the influence of operational load on construction sites. *Nedvizhimost: ekonomika, upravleniye*. 2019. No 2, pp. 46–52. (In Russian).
5. Jun T.A.O., Lei M.U., Ping D.U. Application of optical fiber sensors using linear ingaas spectral imaging technique to seepage monitoring of dam. *Acta Photonica Sinica*. 2010. V. 39. No 1, pp. 42–46.
6. Idiatullin D.R. Tasks of minimizing false positives of monitoring systems of engineering (load-bearing) structures (SMIC). *Monitoring. Nauka i bezopasnost*. 2013. No 3, pp. 36–43. (In Russian).
7. Egorov F.A., Neugodnikov A.P., Bykovskij V.A., Tulyakov Yu.A., Sherstyuk S.P. Automated system for monitoring engineering structures. Application practice. *Datchiki i sistemy*. 2014. No 11 (186), pp. 71–78. (In Russian).
8. Ni N. Safety monitoring and evaluation of construction projects based on multi-sensor fusion. *Instrumentation, Mesures, Métrologies*. 2020. V. 19. No 6, pp. 431–441.
9. Grebenets V.I. Monitoring changes in geocryological conditions during the engineering preparation, construction, and occupancy of buildings and structures. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1999. V 36. No 5, pp. 191–194.
10. Grecheneva A.V., Kuzichkin O.R., Mikhaleva E.S., Romanov R.V. The results of joint processing of geotechnical and geodynamic monitoring data of karst processes. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. V. 12. No S3, pp. 6628–6634.
11. Xu Y. Mathematical modeling and numerical analysis of force monitoring of foundation pit support structure based on vibration response sensor system. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2019. V. 1. No 6, pp. 134–144.

12. Muttillio M., Stornelli V., Paolucci R., de Rubeis T., Ferri G., Alaggio R., Di Battista L. Structural health monitoring: an iot sensor system for structural damage indicator evaluation. *Sensors*. 2020. V. 20. No 17, pp. 1–15.
13. Bai Sh., Zhou Zh., Ou J. Design and testing of a novel wireless intelligent fatigue monitoring system. *Pacific Science Review*. 2011. V. 13. No 3, pp. 186–189.
14. Vitola J., Pozo F., Tibaduiza D.A., Anaya M. Distributed piezoelectric sensor system for damage identification in structures subjected to temperature changes. *Sensors*. 2017. V. 17. No 6, 1252 p.
15. Il'in V.V., Shevlyagin Yu.S., Yudkevich A.I. Experience in the use of modern computer-aided technologies in the engineering-geology feasibility analysis of hydraulic structures. *Power Technology and Engineering*. 2003. V. 37. No 2, pp. 69–73.
16. Cai L., Wu K., Yu Q., Feng J. A new method of equivalent material model deformation observation. *International Journal of Modern Education and Computer Science*. 2011. V. 3. No 5, pp. 40–46.
17. Weng X., Sun Y., Niu H., Liu X., Dong Y., Zhang Y. Physical modeling of wetting-induced collapse of shield tunneling in loess strata. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. V. 90, pp. 208–219.
18. Yang P., Qin W., Yang Y., Wang T. Study of feedback analysis and safety control of large-section tunnel excavation under intensive buildings. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2010. V. 29. No 4, pp. 795–803.
19. Orlando A. On line monitoring of the power control and engineering parameters systems of the nemo phase-2 tower. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009. V. 602. No 1, pp. 180–182.

Поступила в редакцию/received: 21.04.2021; после рецензирования/revised: 12.05.2021;  
принята/accepted: 01.06.2021

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТИПОВЫХ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ УРОВНЕМ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ КАЛИНИНСКОЙ АЭС

О.Л. АХРЕМЧИК, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: axremchic@mail.ru

© Ахремчик О.Л., 2021

Выделяются функции системы управления уровнем воды в парогенераторе. Предлагается рассматривать две фазы управления в режимах нормальной эксплуатации и управления защитами. В системе автоматизации устанавливаются приоритеты работы систем стабилизации уровня и управления защитой парогенератора от превышения уровня, которые рассматриваются как базовые свойства сигналов. Модель сигнала является объединением множеств базового описания свойств, расширенного описания свойств и множества, отражающего специфику применения типовых средств. Первое множество включает имя параметра, текущее значение, метку времени, приоритет, признаки обновления и достоверности, уставку, границы диапазона изменения. Расширенное множество включает номер ГЕТ-плана, адресацию коммуникационного модуля для передачи сигнала, гистерезис для уставки, перечень событий при отклонениях в решении задачи управления. Свойствами, связанными с использованием типовых программно-технических средств, являются признак наличия помехи общего вида, свободно проектируемый признак, ошибка в памяти, отказ энергопитания, отказ АЦП.

*Ключевые слова:* автоматизация, модель, комплекс, уровень, управление, достоверность, функция, модуль, сигнал.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-79-90**

### ВВЕДЕНИЕ

Производство пара с заданными характеристиками является одним из основных этапов технологических циклов процесса выработки электроэнергии на атомных электрических станциях (АЭС). Решение задач анализа, выбора и совмещения с действующими системами управления нового программно-технического базиса для автоматизации управления режимными параметрами АЭС актуально. В сфере атомной энергетики в настоящее время используются технологии проектирования автоматизированных систем управления (АСУ) третьего поколения и ведутся НИОКР по разработке систем управления оборудованием АЭС четвертого поколения [1].

Калининская АЭС является ведущим производителем электроэнергии в Центральном федеральном округе и крупнейшим предприятием Тверской области. Станция постоянно обновляет средства и системы автоматизации. Автор, являясь руководителем подготовки технического персонала для АЭС в ТвГТУ, рассматривает задачу управления уровнем в парогенераторе (ПГ) типа ПГВ-1000, используемого в комплекте с реакторами ВВЭР 1000. В АСУ аппаратами, установленными на третьем и четвертом энергоблоках Калининской АЭС, применяются программно-технические комплексы (ПТК) типовых программно-технических средств (ТПТС) [2].

Система управления уровнем в ПГ является важной для безопасности АЭС. Жизненный цикл системы характеризуется функциональной полнотой и определяется каталогами типовых решений, таблиц и схем подключений измерительных преобразователей, интерфейсных и коммуникационных модулей, исполнительных устройств. В основе ПТК лежат типовые элементы, разработкой которых занимаются специализированные (не эксплуатационные) организации [3].

Особенностью модернизации АСУ на базе ТПТС является применение специализированного программного обеспечения (GET-R), что позволяет объединять соседние этапы классической модели жизненного цикла программного обеспечения [4]. К надежности средств автоматизации предъявляются повышенные требования исходя из специфики объекта. С учетом данных требований функции управления в режиме нормальной эксплуатации и функции защиты и блокировок могут реализовываться с использованием разных ПТК. Для обеспечения параллельной работы средств ПТК в АСУ происходит непрерывная идентификация контуров и различение сигналов, используемых для управления в каждый момент времени на основе анализа текущих значений контролируемых параметров.

Используемые в настоящее время АСУ ПГ представляют собой распределенные вычислительные системы. Их совершенствование базируется на систематизации и унификации решений по автоматизации управления режимными параметрами. Неохваченным с точки зрения систематизации технических решений является пространство сигналов, используемых для представления значений возмущающих и управляющих параметров. Применение распределенных вычислительных систем на АЭС определяет включение в состав АСУ интерфейсных и коммуникационных модулей, использующих расширение параметров аналоговых и дискретных сигналов. Свойства сигналов входов-выходов модулей ПТК являются одними из базовых в реляционной модели модуля АСУ [5]. Характеристики входов-выходов обязательны для включения в модели программно-технических средств для хранения описаний и поиска устройств в базах данных систем автоматизированного проектирования.

Учет свойств сигналов, обрабатываемых АСУ, уровнем в ПГ, наряду с расширением пространства свойств, является одной из целей статьи. Вторая цель состоит в декомпозиции задачи управления уровнем и оценке возможностей модулей ТПТС для реализации алгоритмов управления.

### **ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ**

Парогенератор типа ПГВ-1000 предназначен для выработки насыщенного пара давлением  $64 \text{ кгс/см}^2$  с влажностью  $0,2 \%$  при температуре питательной воды  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  и входит в состав циркуляционного контура станции. Питательная вода подается на «горячую» сторону трубного пучка в верхней части агрегата под погружной дырчатый лист через 16 раздающих коллекторов, каждый из которых соединен с 32 раздающими трубками, имеющими по своей длине отверстия для выхода питательной воды. Вода может подаваться через аварийный патрубок на днище ПГ, к которому присоединен раздающий коллектор, смонтированный над трубопроводом питательной воды.

Классическая трехимпульсная система управления уровнем воды в ПГ выполняет функции контроля, стабилизации заданного значения уровня и защиты ПГ при изменениях уровня. Система обеспечивает измерение уровня воды ( $L$ ) в барабане, расхода перегретого пара, подаваемого в турбину ( $D$ ), питательной воды в контуре подачи воды ( $G$ ) (рис. 1). Сигнал рассогласования на входе в регулятор формируется взвешенным суммированием сигналов заданного ( $L_{\text{зад}}$ ) и текущего ( $L$ ) значений уровня, а также расходов пара и питательной воды [8]. Система питания водой ПГ содержит

быстродействующий контур по расходу питательной воды, работающий по сигналу от датчика расхода воды ( $F_G$ ,  $ИП_G$ ), и инерционный контур, работающий по сигналу от датчика уровня воды ( $L$ ,  $ИП_L$ ). По команде регулятора  $P$  через трубопроводы обеспечивается изменение степени открытия клапана, рассчитываемого на основе выбранного закона регулирования. Цель стабилизации уровня воды заключается в поддержании материального баланса между отводом пара, оцениваемого на основе данных измерения ( $F_D$ ,  $ИП_D$ ), и подачей питательной воды ( $G$ ) во всех режимах работы энергоблока. Регулируемым параметром является уровень воды в ПГ, управляющим воздействием – расход питательной воды.

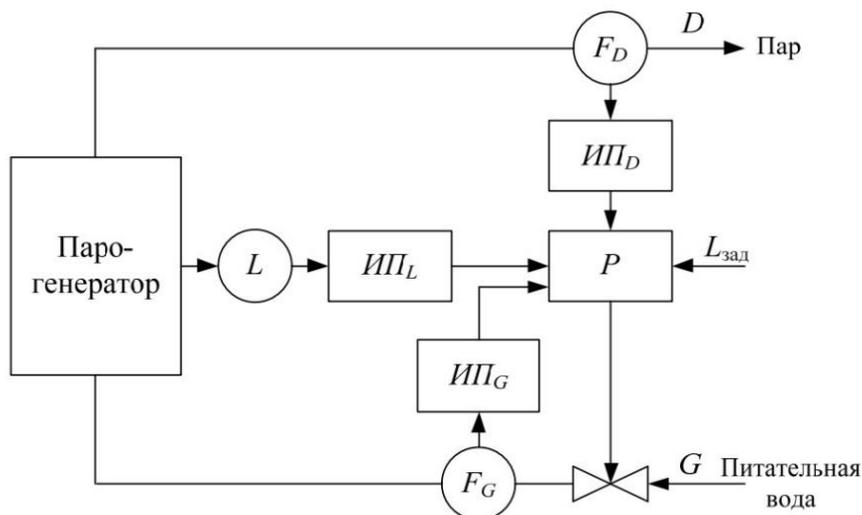


Рис. 1. Структура системы управления уровнем воды в ПГ Калининской АЭС

На основе оценки результатов измерений от нескольких датчиков ( $ИП_L$ ,  $ИП_G$ ,  $ИП_D$ ) в ходе управления уровнем система автоматизации должна идентифицировать реализуемую функцию (нормальной эксплуатации или управления защитой ПГ). Для этого в функционально-логических описаниях комплекса технических средств и GET-планах системы необходимо ввести дополнительный комплекс переменных, характеризующих применение измерительной и командно-управляющей информации при управлении уровнем.

Проведение функционального анализа задач автоматизации ПГ предполагает, что программно-технический базис для управления, сигнализации и блокировок параметрами объекта имеет модули, способные обеспечить автоматизацию управления уровнем [6, 7]. Функции системы управления уровнем в ПГ определяются множеством:

$$F = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7\}, \quad (1)$$

где  $F_1$  – контроль состояния ПГ;  $F_2$  – поддержание эксплуатационных режимов работы;  $F_3$  – автоматическое регулирование уровня;  $F_4$  – диагностика процесса парогенерации;  $F_5$  – диагностика оборудования и системы автоматизации;  $F_6$  – информационное обеспечение персонала об эксплуатационных состояниях и режимах работы для решения инженерных, технико-экономических, производственных и административных задач;  $F_7$  – передача данных для решения задачи автоматизации.

Программно-технический комплекс, выбираемый для реализации функций, определяемых по выражению (1), представляется совокупностью функциональных контуров, удовлетворяющих заданным требованиям по надежности функционирования, времени обработки информации, возможностям прерывания обработки информации, объему обрабатываемой информации, степени участия оператора при выполнении функции [7]. С учетом (1) и выделенных требований проведем декомпозицию задачи управления уровнем с применением подхода на основе методов событийного моделирования [8].

В качестве событий будем рассматривать повышение и понижение уровня, а также изменения состояния управляющих выходов.

Первой фазой решения является управление уровнем воды при понижении (на 160 мм меньше установленного предела):

$$L \leq L_n; \quad G = U_{op},$$

где  $L_n$  – предельное понижение уровня;  $U_{op}$  – команда на подачу воды  $G$  через основную питательную магистраль.

На данной фазе уровень воды при возмущении расходом питательной воды характеризуется отсутствием самовыравнивания, а при возмущении расходом перегретого пара возникает эффект «набухания уровня» [9].

На основе методов математического моделирования и теории управления в рассмотренной схеме регулирования уровня (см. рис. 1) рекомендуется использовать классические законы регулирования с учетом формирования управления открытия клапанов подачи воды с приводом от исполнительных механизмов постоянной скорости. Многие исследователи рекомендуют применение ПИ-регулятора с жесткой обратной связью [10]. При этом система управления состоит из двух контуров: внутреннего, включающего регулятор и устройство жесткой обратной связи, и внешнего, включающего объект регулирования и эквивалентный регулятор, состоящий из устройства жесткой обратной связи и регулятора. Численное значение коэффициента передачи ПИ-регулятора трехимпульсной системы автоматического регулирования обычно рассчитывают на основе передаточной функции в виде реального интегрирующего звена. Некоторые исследователи не включают в закон управления интегральную составляющую и рекомендуют ограничиваться пропорциональной частью в силу рассмотрения объекта в виде интегрирующего звена с запаздыванием [11]. По мнению автора, с учетом минимизации статической ошибки более рациональным является выбор ПИ-регулятора. С точки зрения вычислительных особенностей, требований к настройке принципиально нового в управлении уровнем воды в ПГ не выдвигается и поле для выбора программно-технического базиса достаточно широко.

Второй фазой решения задачи управления является функционирование системы автоматизации как системы сигнализации и защиты от превышения первого установленного значения уровня, который определяет открытие запорных задвижек на линии аварийного слива воды из барабана ПГ:

$$L \geq L_{в1}; \quad u = U_{сл}, \\ L \geq L_{в2}; \quad u = U_{сл}; \quad G = G_{max} - G_{min}; \quad G \leq G_{min},$$

где  $L_{в1}$  – первое предельное повышение уровня (до 180 мм);  $U_{сл}$  – команда на аварийный слив;  $L_{в2}$  – второе предельное повышение уровня (до 200 мм);  $G$  – команда на сброс нагрузки с максимального  $G_{max}$  до минимального  $G_{min}$  расходов воды.

При достижении уровнем воды второй предельной отметки действие защиты ПГ приводит к формированию стратегии по сбросу нагрузки через другой трубопровод. С уточнением уставок срабатывания технологической защиты по уровню воды осуществляется сброс нагрузки парогенератора ( $D$ ) от максимальной до минимальной с сохранением минимального расхода питательной воды ( $G_{\min}$ ).

Одновременно с управлением уровнем производится контроль технологических ограничений системы управления, которые связаны со значительными градиентами температур и давлений при производстве пара. При обесточивании агрегатов АЭС или падении уровня в ПГ по отдельной аварийной магистрали подается питательная вода из баков с температурой от 5 до 45 °С, что создает условия для расхолаживания до давления в первом контуре до 15 кгс/см<sup>2</sup>. Подача питательной воды по аварийной магистрали с температурой около 25 °С в ПГ с температурой около 280 °С вызывает воздействие «теплого удара». В условиях нормальной эксплуатации АСУ не вырабатывает воздействий на подпитку ПГ по аварийному трубопроводу питательной воды. В этом случае алгоритм управления дополняется:

$$\begin{aligned} L &\geq L_{в1}; \quad u = U_{сл}; \quad u \neq G_{авпв}; \\ L &\geq L_{в1}; \quad T_{в} \geq T_{ту}, \end{aligned}$$

где  $u \neq G_{авпв}$  недопустимость подпитки барабана ПГ по аварийной магистрали;  $T_{в}$  – ограничение на температуру подпиточной воды;  $T_{ту}$  – температура «теплого удара».

Представленное алгоритмическое описание отлаживается в ходе статического тестирования функций, описываемых выражением (1). После отладки и записи значений параметров в модули системы автоматизации управление уровнем проходит в известном временном цикле, длительность которого не зависит от значений измеренных параметров.

### **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ТИПОВЫХ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ**

Анализ алгоритмического обеспечения задачи управления уровнем показывает, что необходимо реализовать подсистемы: измерений возмущений, ПИ-регулирования, сигнализации и защиты, передачи данных. Включение в работу подсистем осуществляется на основе результатов контроля уровня. Ограничениями выбора ПТК выступают требования к преемственности решений и сопряжению с действующими системами, а также необходимость соответствия требованиям нормативных документов «Росатома». В ходе выбора ПТК учитывается иерархичность системы автоматизации и необходимость применения цифровых коммуникационных каналов передачи данных как на одном, так и между разными уровнями иерархии. В исследуемых модификациях АСУ на Калининской АЭС используются семейства решений на базе ПТК ТПТС51 (ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова), явившихся развитием платформы Teleperm ME и САПР GET-TM фирмы Siemens в РФ [12]. Комплекс ТПТС ориентирован на среду проектирования Graphic Engineering Tool-Russia (GET-R, GET-R1). За время, прошедшее с начала разработки первых проектных решений (2000 г.), до текущих модернизаций АСУ комплекс неоднократно модифицировался, и сейчас актуальна версия ТПТС-NT (среда проектирования GET-NT).

Комплекс ТПТС различных модификаций содержит процессор 80188 и модули памяти RAM, EPROM и EEPROM [13]. В EPROM хранятся программные блоки, выполняющие арифметические и логические функции, присущие всем модулям системы (сложение, умножение, дифференцирование, сравнение чисел и т.д.); программные блоки, реализующие функции, специфические для конкретного типа модулей (например, управляющие блоки для модулей управления или алгоритмы регулирования для модулей регуляторов); программные блоки, реализующие функции контроля, логику сигнализации, логику обработки прерывания и т.п. Программные блоки в EPROM не могут быть изменены пользователем. Данные в EEPROM записываются на этапе проектирования контуров управления и могут изменяться.

Комплекс ТПТС реализован в виде приборной стойки, отвечающей требованиям к управляющим приборам АЭС [13]. В состав стойки (на примере ТПТС51) входят функциональные и коммуникационные модули, клеммные панели и коммутаторы, шины передачи данных, блок питания (рис. 2). Исходя из преимущества технических решений, для системы управления уровнем выбирают измерительные преобразователи с аналоговым токовым выходным сигналом, подключение которых осуществляется к разным модулям ТПТС с целью решения задачи покрытия функций (1) средствами ПТК. При подключении используются установленные в приборной стойке соединители (SAE) клеммной панели, предназначенные для коммутации токовых цепей ( $I_{(50)}$ ) (рис. 3).



Рис. 2. Приборная стойка ТПТС51

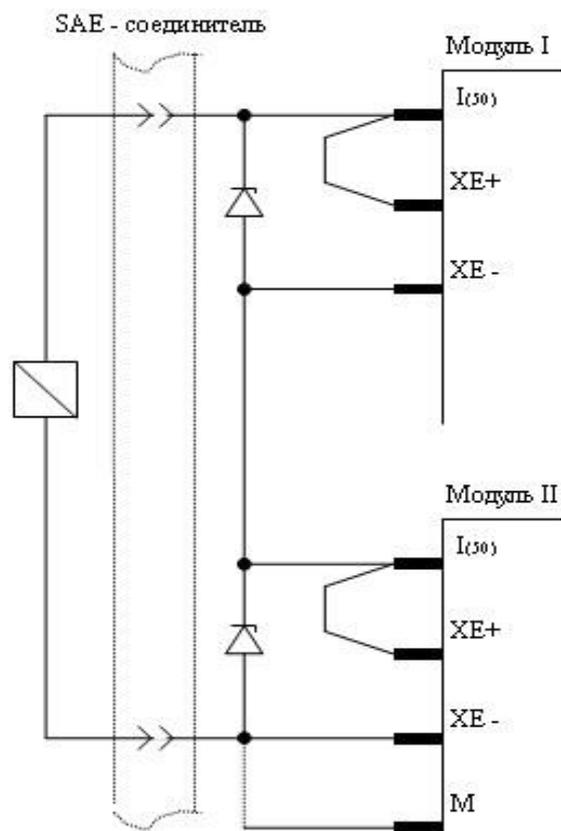


Рис. 3. Подключение датчика уровня

Основной отличительной особенностью модулей ТПТС является возможность записи в постоянной памяти набора готовых подпрограмм, выполняющих функции общего назначения (арифметические и логические), и специально разработанных для решения задач, встречающихся на электростанциях (функции: измерения, управления двигателем, управления задвижкой, регулирования, коррекции и т.п.).

Автором применительно к системе автоматизации уровня воды в качестве пространства выбора рассматриваются регуляторы (1411, 1412); модули управления (1717, 1719, 1723-01, 1725); устройства сбора и обработки аналоговых сигналов (1722, 1731, 1703); устройства сбора и обработки двоичных сигналов (1723, 1724). Имея схожее функциональное назначение, модули характеризуются сервисными возможностями, которые могут изменить решение задачи управления и будут отличаться описаниями реализуемых функций.

В схеме стандартной логики переключений в канале регулирования уровня реализуется комплекс логических функций, задающих:

- 1) прием и обработку команд «Закрыть/Открыть»;
- 2) прием и обработку команд защит, имеющих высший приоритет по отношению к другим командам и действующих в обход ограничивающих сигналов;
- 3) формирование команд ограничения/разрешения прохождения дискретных сигналов «Меньше/Больше».

В ходе решений по управлению уровнем воды в ПГ конфигурация приборной стойки определяется программой GET R(NT), функционирующей под ОС Linux. На сервере хранится проектная информация и размещены системные файлы. Клиентские рабочие места операторов устанавливаются как бездисковые клиенты, а связь с приборными стойками осуществляется с помощью интерфейсных и коммуникационных модулей АСУ.

## СВОЙСТВА СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТИПОВЫХ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Использование распределенной вычислительной системы для управления режимными параметрами ПГ определяет необходимость рассмотрения используемых для управления сигналов с точки зрения расширения их свойств в силу необходимости учета требований к надежности ПТК, межмодульного обмена данными, реализации режима переключения для разных фаз решения задачи управления в зависимости от значений параметров. При этом активизируется модуль приоритетов комплекса технических средств (типа 1716), который предназначен для управления исполнительными механизмами системы безопасности (СБ). Модуль приоритетов обеспечивает возможность управления исполнительными механизмами по командам, поступающим как от СБ, так и от системы нормальной эксплуатации (СНЭ), с приоритетом управления от СБ. Выделенный приоритет является свойством сигналов контуров измерения и управления, определяющим алгоритм работы.

Опыт использования модулей ТПТС51 (модификаций Е, ЕМ, NT) позволяет классифицировать передаваемые при межмодульном обмене сигналы на сигналы о состоянии, диагностические, команды управления. Соответственно, в свойствах сигнала необходимо выделить метку, отражающую принадлежность сигнала к одной из групп.

На основе теоретико-множественного подхода представление сигнала о состоянии уровня описывается множеством атрибутов:

$$L_b = \{Name, time, L, realT, NV, Pr, L_n, KBOG, KBUG\}, \quad (2)$$

где Name – имя параметра в системе; time – метка времени;  $L$  – текущее значение в канале; realT – признак обновления сигнала; NV – признак достоверности сигнала; Pr – приоритет;  $L_n$  – уставка; KBOG – выход за верхнюю границу диапазона изменения; KBUG – выход за нижнюю границу диапазона изменения.

Добавление признаков обновления и метки времени (как признаков своевременности) позволяет обеспечить своевременность передачи сигнала [14]. С точки зрения унификации данные признаки целесообразно рассматривать для всех сигналов, а не только сигналов состояния. Описание (2) позволяет рассматривать частные показатели достоверности, полноты, своевременности функционирования ПТК, не учитывавшиеся ранее при создании моделей технических средств [5, 6].

Проверка достоверности аналоговых сигналов в режиме реального времени является проверкой не только наличия сигнала, но и нахождения измеряемого значения в допустимом диапазоне. Выход за пределы диапазона приводит к изменению дискретного сигнала достоверности «NV» канала.

С учетом реализации функции информационного обеспечения персонала  $F_6$  по выражению (1) и выделенного приоритета работы СНЭ и СБ описание сигнала (2) имеет вид

$$L_a = \{Get, Com(NV), \Delta_L, Per, Add\}, \quad (3)$$

где Get – план для отображения прохождения сигнала в системе автоматизации; Com(NV) – адрес коммуникационного модуля для передачи сигнала;  $\Delta_L$  – гистерезис для уставки; Per – перечень событий при отклонениях в решении задачи управления; Add – добавление дополнительных свойств в описании параметра.

При решении задачи управления защитами при наличии достоверного сигнала (уровень «NV» высокий) в описании параметра значения  $L_n$ ,  $\Delta_L$ , Pr, Get, Com, Per

изменяются и система автоматизации отслеживает прохождение сигнала по другому GET-плану с другим уровнем приоритета. Задание приоритета становится одной из ключевых задач статического тестирования функций системы автоматизации. Связи между частями проекта автоматизации в различных режимах не отслеживаются инструментальной средой, что требует тщательного контроля и отладки системы при реализации функций  $F_6$  и  $F_7$  [15].

При понижении уровня используется базис модулей ТПТС нормальной эксплуатации с отсутствием команд управления от СБ. В случае сигналов запрета алгоритм управления исполнительным механизмом подачи воды по основной магистрали должен быть таким же, как алгоритм индивидуального управления в СНЭ.

Для набора функций базового множества при изучении описаний ТПТС выделяются дополнительные атрибуты, присущие комплексу ТПТС и активизируемые при управлении при единичном значении:

$$L_{\text{ТПТС}} = \{UCM, FEKF, PROM, BSV15, ADC\}, \quad (4)$$

где UCM – признак наличия помехи общего вида; FEKF – свободно проектируемый признак (по каналам измерения, управления, коммуникации, сигнализации); PROM – ошибка в памяти; BSV15 – отказ энергопитания модуля; ADC – отказ аналогово-цифрового преобразователя (АЦП).

Пространство свойств сигнала для системы управления уровнем воды в ПГ на базе ПТК ТПТС является объединением выражений (2)–(4).

Свойства (4) предлагается рассматривать для сигналов состояния и для команд управления (кроме отказа АЦП).

При приеме аналогового сигнала на верхнем уровне или другим модулем одновременно происходит оценка его достоверности «NV», которая передается по шине вместе с сигналом измерительного канала. С учетом наличия сигнала достоверности установим два уровня приоритета, изменяющих алгоритм управления на основе проведенной ранее декомпозиции. Первый (низкий – NV1) – для расхода воды по основному контуру. Второй (высокий – NV2) – для расхода пара при сбросе нагрузки с уточнением уставки при превышении уровня.

Для режима нормальной эксплуатации при понижении уровня

$$Pr = 1: L \leq L_n \text{ AND } NV = \langle \text{NV1} \rangle \rightarrow G = U_{op}; \text{ GET} = \text{GETНЭ}.$$

При выходе за верхнюю границу уровня и работе СБ

$$Pr = 2: L \geq L_{в2} \text{ AND } NV = \langle \text{NV2} \rangle \rightarrow u = U_{сл}; \text{ GET} = \text{GETСБ}.$$

Использование контроля по верхней границе измерительного диапазона для канала управления осуществляется с помощью установки маркера превышения в коммуникационном модуле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате декомпозиции задачи управления уровнем предложено разделение траектории управления на фазы, в ходе которых используются разные описания параметров при управлении и реализуются разные задачи (стабилизации уровня по основной магистрали или управления блокировкой и защитой с использованием аварийного слива). Применение комплекса ТПТС позволяет реализовать выделенные траектории и обеспечить стабилизацию уровня воды в ПГ со стабильно высокими

показателями надежности и длительным ресурсом эксплуатации на основе преимущественности в решениях по управлению в части использования классической многоимпульсной схемы регулирования и базового ПИ-алгоритма.

Расширить традиционные вопросы автоматизации многоимпульсного управления уровнем в ПГ с приемлемой стоимостью эксплуатации предлагаемых решений позволяет применение входящих в комплексные описания управляемых параметров свойств приоритета и достоверности параметров. В зависимости от приоритета задача управления рассматривается на фазах понижения или превышения уровня. Превышение уровня приводит к выработке имеющих высокий приоритет сигналов защиты ПГ по уровню воды с изменением комплекта описаний и сопровождением защиты сигналом достоверности, предотвращающим ложный переход от одной фазы управления к другой. Добавление к обрабатываемым при управлении сигналам признаков обновления и метки времени позволяет обеспечить своевременность реагирования на отклонения от уставки.

Представленные результаты по расширению пространства описания сигналов АСУ на базе ТПТС могут использоваться не только при управлении уровнем, но и как методологические основы формирования сигналов контроля и управления на базе комплекса ТПТС при применении многопроцессорных распределенных систем для автоматизации управления режимными параметрами технологических агрегатов АЭС. Предложенные теоретико-множественные описания сигналов предлагается рассматривать как основу при разработке реляционной модели базы данных систем автоматизированного проектирования контуров управления и активизировать при настройке модулей вне технологического оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Менгазетдинов Н.И., Полетыкин А.Г. Интеграция АСУ ТП и системы верхнего уровня АЭС – технологии и опыт ИПУ РАН // *Доклады БГУИР*. 2015. № 2 (88). С. 97–100.
2. Дунаев В., Медведовский Е. Системы автоматического управления и контроля для атомных станций // *Control Engineering Россия*. 2013. № 3 (45). С. 22–31.
3. Маликова Е.Ю., Купцов С.И. Особенности верификации и валидации прикладного программного обеспечения программно-технических комплексов на аппаратуре ТПТС для систем безопасности АЭС // *Доклады БГУИР*. 2015. № 2 (88). С. 52–55.
4. Ахремчик О.Л. Автоматизация управления уровнем в парогенераторе ПГВ-1000 // *Математические методы в технологиях и технике*. 2021. № 1. С. 29–35.
5. Ахремчик О.Л. Информационная база для автоматизированного проектирования схем систем управления технологическими объектами // *Информационные технологии*. 2009. № 8. С. 17–21.
6. Шдеев Д.А., Маликова Е.Ю. Модернизация САПР для проектирования аппаратуры ТПТС – новые решения. URL: <https://textarchive.ru/c-2360993.html> (дата обращения: 08.11.2020).
7. Акимов Н.Н., Бибииков В.В., Кольцов В.А., Лотов В.Н. Автоматизированная система управления технологическими процессами Белорусской АЭС // *Доклады БГУИР*. 2015. № 2 (88). С. 9–12.
8. Денисова Л.А., Раскин Е.М., Событийное моделирование системы автоматического регулирования питания парогенератора энергоблока АЭС // *Омский научный вестник*. 2010. № 3 (93). С. 204–209.
9. Ключев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И. Настройка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.

10. Кулаков Г.Т., Кухоренко А.Н. Оптимизация переходных процессов изменения уровня воды в барабане паровых котлов // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2014. № 4. С. 63–74.

11. Панферов С.В., Телегин А.И. Оценка качества регулирования уровня жидкости в системах теплоснабжения // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. 2009. № 15 (148). С. 39–44.

12. Нариц А.Д., Моисеев М.И., Карпов П.С., Новиков А.Н., Борзенко А.А., Рыжков А.В. Комплекс средств автоматизации ТПТС-НТ // *Доклады БГУИР*. 2015. № 2 (88). С. 33–37.

13. Атрошенко Ю.К., Иванова Е.В. Автоматизированные системы управления АЭС. Томск: ТПУ, 2014. 81 с.

14. Пантелеев А.Е., Гатчин Ю.А. Методы и алгоритмы создания системы верхнего (блочного) уровня АСУ ТП АЭС // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2006. № 6 (29). С. 3–6.

15. Кулаков Г.Т., Сацук С.М., Кухоренко А.Н. Система автоматического управления уровнем парогенераторов АЭС на базе контура регулирования со сглаживанием задающего сигнала // *Доклады БГУИР*. 2018. № 1 (111). С. 72–77.

**Для цитирования:** Ахремчик О.Л. Использование типовых программно-технических средств автоматизации при управлении уровнем в парогенераторе Калининской АЭС // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 79–90.

## **THE USING OF AUTOMATION TYPICAL SOFT AND HARDWARE TOOLS FOR LEVEL CONTROL IN STEAM GENERATOR OF KALININ NUCLEAR POWER PLANT**

O.L. AKHREMCHIK, Dr. Sc.

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

The functions of the water level control system in the steam generator are distinguished. It is proposed to consider two control phases in normal operation and protection control modes. The automation system sets priorities for the operation of the steam generator level stabilization and over-protection control systems, which are considered as basic properties of signals. The signal model is considered as a combination of sets of a basic property description, an extended property description, and a set reflecting the specifics of the unified means application. The first set includes parameter name, current value, time stamp, priority, update and validity signs, set point, change range boundaries. Extended set includes number of GET-plan, addressing of communication module for signal transmission, hysteresis for set point, list of events in case of deviations in control problem solution. Properties related to TPTS using are sign of presence of general type interference, freely designed feature, error in memory, power supply failure, ADC failure.

*Keywords:* automation, model, complex, level, control, reliability, function, module, signal.

## REFERENCES

1. Mengazetdinov N.I., Poletykin A.G. Integration of APCS and upper-level systems of nuclear power plants – technologies and experience of IPU RAS. *Doklady BGUIR*. 2015. No 2 (88), pp. 97–100. (In Russian)
2. Dunaev V., Medvedovskiy E. Systems of automatic control and monitoring for nuclear power plants. *Control Engineering Rossiya*. 2013. No 3 (45), pp. 22–31. (In Russian).
3. Malikova E.Yu., Kuptsov S.I. Features of verification and validation of applied software of software and hardware complexes on TPTS equipment for NPP safety systems. *Doklady BGUIR*. 2015. No (88), pp. 52–55. (In Russian).
4. Akhremchik O.L. Automation of level control in the PGV-1000 steam generator. *Matematicheskie metody v tekhnologiyah i tekhnike*. 2021. No 1, pp. 29–35. (In Russian)
5. Akhremchik O.L. Information base for computer-aided design of control systems for technological objects. *Informatsionnye tekhnologii*. 2009. No 8, pp. 17–21. (In Russian)
6. Shdeev D.A., Malikova E.Yu. CAD modernization for TPTS hardware design – new solutions. URL: <https://textarchive.ru/c-2360993.html> (date accessed: 08.11.2020). (In Russian).
7. Akimov N.N., Bibikov V.V., Koltsov V.A., Lotov V.N. Automated control system of technological processes of the Belarusian NPP. *Doklady BGUIR*. 2015. No 2 (88), pp. 9–12. (In Russian).
8. Denisova L.A., Raskin E.M. Event modeling of the automatic control system for the power supply of the steam generator of the NPP power unit. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2010. No 3 (93), pp. 204–209. (In Russian).
9. Klyuev A.S., Lebedev A.T., Novikov S.I. Naladka sistem avtomaticheskogo regulirovaniya barabannykh parovykh kotlov [Adjustment of automatic control systems for drum steam boilers]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 280 p.
10. Kulakov G.T., Kukhorenko A.N. Optimization of transient processes of water level change in the drum of steam boilers. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG*. 2014. No 4, pp. 63–74. (In Russian).
11. Panferov S.V., Telegin A.I. Assessment of the quality of liquid level regulation in heat supply systems. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika*. 2009. No 15 (148), pp. 39–44. (In Russian).
12. Narits A.D., Moiseev M.I., Karpov P.S., Novikov A.N., Borzenko A.A., Ryzhkov A.V. Complex of automation means TPTS-NT. *Doklady BGUIR*. No 2 (88), pp. 33–37. (In Russian).
13. Atroshenko Yu.K., Ivanova E.V. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya AES [Automated control systems for nuclear power plants]. Tomsk: Izdatelstvo TPU, 2014. 81 p.
14. Panteleev A.E., Gatchin Yu.A. Methods and algorithms for creating a system of the upper (block) level of the automated process control system of NPP. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2006. No 6 (29), pp. 3–6. (In Russian).
15. Kulakov G.T., Satsuk S.M., Kukhorenko A.N. Automatic control system for the level of steam generators of nuclear power plants based on a control loop with smoothing the reference signal. *Doklady BGUIR*. 2018. No 1 (111), pp. 72–77. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 28.04.2021; после рецензирования/revised: 05.05.2021;  
принята/accepted: 20.05.2021

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ БРАУНА В АНАЛИЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ (КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ)

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

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

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

В статье описывается опыт использования модели Брауна для анализа результатов эксперимента по исследованию технологического процесса сушки торфа. Приводится алгоритм построения модели Брауна по основным параметрам процесса сушки. Определяется степень адаптивности модели экспоненциального сглаживания в экспериментах и тип исследуемых процессов. Методологической основой анализа экспериментальных данных является системный подход.

*Ключевые слова:* торф, эксперимент, процесс сушки, системный подход, анализ временного ряда, нестационарный процесс, модель Брауна, модель случайного блуждания.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-91-102**

### ВВЕДЕНИЕ

Современное торфодобывающее производство представляет собой сложную техническую и динамическую систему, функционирующую в нестабильных и изменчивых горно-геологических, природно-климатических и экономических условиях [1, 2]. Как известно, особенность процесса добычи торфа состоит в сильной зависимости его от погодных условий сезона, который в разных регионах РФ длится 3–5 месяцев. В структуру технологического цикла большинства «традиционных» технологий добычи торфа и производства торфопродукции в полевых условиях входит операционный процесс сушки фрезерного торфа либо на поле добычи в тонком и толстом расстиле, либо на откосах валков.

Длительность операции сушки торфа различна, так как на скорость процесса высыхания влияют температура воздуха, скорость ветра, вероятность выпадения осадков и другие факторы. В случае плохих погодных условий сезона (температура ниже средней, частые дожди, туман и сильный ветер) продолжительность технологического цикла добычи торфа возрастает. Это, в свою очередь, приводит к нарушению цикличности производства, сокращению количества циклов добычи торфа, к снижению цикловых и сезонных объемов добычи товарного торфа, ухудшению качества готовой торфопродукции [3], замедлению скорости оборачиваемости оборотных средств торфяного предприятия, а также к возникновению сбоев поставок по договорам и увеличению риска потери экономической безопасности предприятия по добыче и переработке торфа. Следует отметить, что погодные условия последних четырех сезонов добычи торфа (2017–2020 гг.) характеризовались как неблагоприятные.

Ввиду этого технологическая операция полевой сушки торфа, как «слабое звено» в технологиях добычи торфа и производства торфопродукции в полевых условиях, требует пристального внимания. Поэтому для управления и прогнозирования

процесса сушки торфа в полевых условиях, а также в связи с наметившейся мировой тенденцией к внедрению на добывающих предприятиях идеологии «Mining 4.0» актуальной задачей является использование цифровых и информационных технологий [4–7].

### СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССА СУШКИ ТОРФА

Эксперимент – это важнейшая часть любого научного исследования, своеобразный способ изучения объекта, помещенного в искусственно имитируемую и управляемую среду. Как правило, эксперимент позволяет проверить научную гипотезу, определить причинно-следственные связи, влияющие на объект исследования. Результатом любого эксперимента является получение обширного массива данных, которые необходимо правильно интерпретировать, структурировать и анализировать. Поэтому для обработки информации часто используют принцип системного подхода, под которым понимается метод научного познания последовательности действий для определения структурных связей между исследуемым объектом (системой) и воздействующими на него переменными факторами.

Особенности использования системного подхода в обработке и анализе экспериментальных данных сводятся к следующему:

- объект исследуется как единичная система;
- объект исследования представляет собой элемент (часть) целостной системы;
- один и тот же объект может иметь разные особенности и функции в зависимости от способа его изучения;
- элементы системы (переменные факторы) ранжируются по значимости их влияния на состояние объекта исследования.

С точки зрения системного подхода в эксперименте по сушке фрезерного торфа в слоях различной толщины объектом исследования является процесс испарения влаги из расстила фрезерной торфяной крошки (рис. 1). Главную характеристику этого процесса – скорость удаления влаги из фрезерного торфа – в формализованном виде можно записать как функцию:

$$v_c = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где  $v_c$  – скорость (интенсивность) сушки торфа, кг/ч;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – факторы, влияющие на интенсивность процесса испарения влаги из расстила фрезерного торфа.



Рис. 1. Системные факторы, влияющие на скорость процесса полевой сушки фрезерного торфа

Согласно принципам системного подхода объектом экспериментального исследования является важный технологический процесс естественного обезвоживания фрезерного торфа (процесс сушки торфа). В естественных (полевых) условиях на сушку торфа воздействуют две группы переменных факторов: независимые от производственного процесса и зависящие от него. К первой группе относятся температура окружающей среды, атмосферное давление, интенсивность солнечного излучения, скорость ветра, вероятность выпадения осадков, природные свойства торфа и подстилающего минерального грунта. Во вторую группу факторов входят технологические параметры торфяного расстила, уровень грунтовых вод, степень переработки торфяной массы.

Как показывает схема, представленная на рис. 1, процесс сушки торфа – это сложная многофакторная и нестационарная система, состоянием которой можно частично управлять в границах регулируемых производственных факторов. Однако для анализа процесса сушки фрезерного торфа необходимо спланировать и провести эксперимент для получения массива информационных данных и их последующей интерпретации.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СУШКЕ ФРЕЗЕРНОГО ТОРФА. ТЕОРИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА**

Сушка торфа представляет собой процесс удаления влаги посредством ее испарения при добыче торфа и производстве торфяной продукции, который характеризуется величиной испаряемости, т.е. количеством влаги, удаленной с единицы площади за сутки. Полевая сушка торфа сопровождается процессами переноса тепла и влаги между сушимым торфом и воздухом, внутри торфа, между торфом и подстилающим грунтом. Фундаментальным механизмом переноса влаги является ее молекулярная диффузия [8].

Исследованием процесса полевой сушки фрезерного и кускового торфа занимались многие ученые и специалисты, такие как Л.М. Малков, В.Я. Антонов, А.Е. Афанасьев, Н.И. Гамаюнов, Г.Е. Столбикова, А.Н. Васильев, А.Н. Болтушкин и ряд других. Эксперименты такого типа являются классическими и обязательными в процессе обучения студентов специальности «Открытые горные работы».

Для оценки возможности разработки оптимальной технологии производства торфяной продукции на основе процесса сушки фрезерной крошки в тонких слоях в 2004 г. был спланирован и проведен в лабораторных условиях (в камере искусственного климата ТвГТУ) комплексный полнофакторный эксперимент, подробное описание и анализ которого приведены в работе [9].

Объектом экспериментального исследования был верховой торф со степенью разложения  $R = 30$  %. Значения параметра влагосодержания ( $W_n$ ) фрезерного торфа измерялись через каждый час. Для соответствия статистики экспериментальных данных заданной точности опыты длительностью от 5 до 30 ч проводились 25 раз. В пяти рамках имитировался расстил фрезерного торфа различной толщины (1, 2, 3, 4 и 5 см) и в каждом слое толщиной 2 мм определялась влажность, значения которой позволяли построить динамику движения влаги в толще расстила и тем самым определить зону испарения.

Камера искусственного климата имитировала полевые условия сушки торфа путем регулирования скорости работы вентилятора, температуры нагрева камеры, уровня стояния воды в емкости с фрагментом торфяной залежи объемом 1 куб. м.

В результате комплексного исследования были получены кривые сушки фрезерного торфа с различной удельной загрузкой по сухому веществу ( $P_c$ ) (рис. 2), кривые сушки в слоях торфяного расстила (послойной интенсивности испарения) (рис. 3), графические зависимости цикловых и сезонных сборов, а также зависимость длительности сушки от величины удельной загрузки ( $P_c$ ) и влагосодержания ( $W_n$ ). Экспериментальные зависимости кривых сушки при удельной загрузке 0,5 и 2,5 кг/м<sup>2</sup> показывают, что до условного влагосодержания  $W_{yc} = 0,67$  кг/кг тонкий слой (2 мм) высыхает в 10 раз быстрее обычного слоя, таким образом количество коротких циклов за это же время значительно увеличивается [9].

В заводских условиях процесс сушки торфа полностью автоматизирован и поэтому является контролируемым. Его можно описать как стационарный процесс, который можно анализировать с помощью ряда Фурье [10–11]. Тем не менее в полевых условиях, под действием нерегулируемых погодных факторов, процесс сушки торфа является нестационарным и описывается моделью случайного блуждания (random walk), характеризующей траекторию случайной переменной, в которой каждое последующее значение переменной не зависит от предыдущих, однако подчиняется идентичному распределению вероятностей.

Другими словами, изменение случайной величины в какой-либо момент времени не имеет никакого влияния на все последующие изменения и каждое из изменений подчиняется одному и тому же распределению вероятностей с одними и теми же параметрами, такими как средняя величина и среднее квадратическое отклонение. Графики, иллюстрирующие модель случайного блуждания представлены на рис. 2, 3.

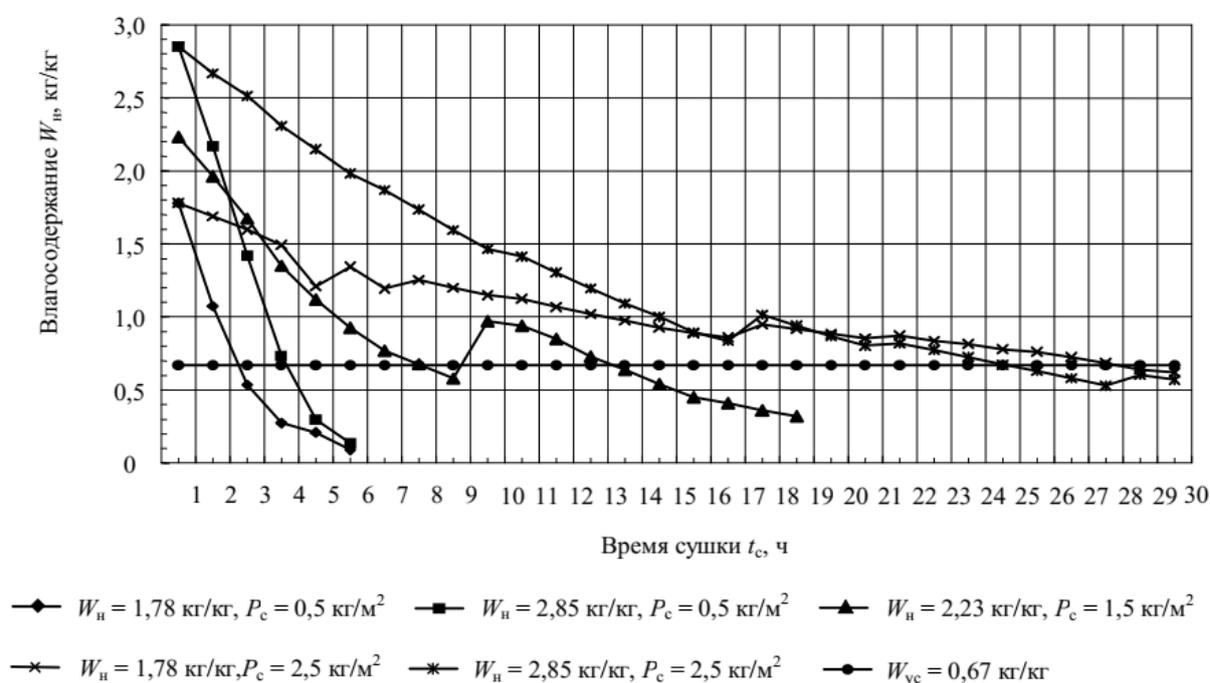


Рис. 2. Экспериментальная иллюстрация процесса сушки фрезерного торфа [9]

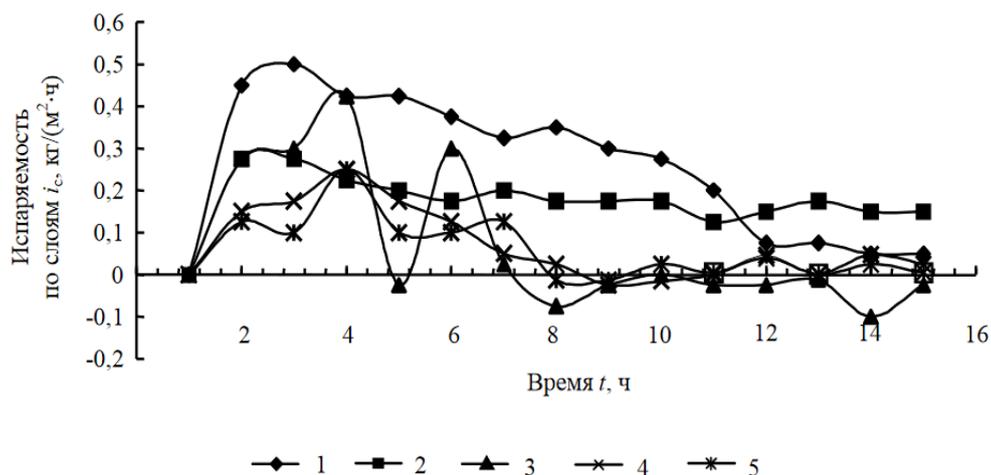


Рис. 3. Динамика интенсивности испарения в толще торфяного расстила 2 см (рамка с параметрами торфяного расстила:  $P_c = 2,5$  кг/кг;  $W_n = 1,78$  кг/кг) [9]

Модель случайного блуждания описывается уравнением

$$X_t = X_{t-1} + a_t = (X_{t-2} + a_{t-1}) + a_t = (X_{t-3} + a_{t-2}) + a_{t-1} + a_t = \dots \\ \dots = X_0 + (a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_t), \quad (2)$$

где  $X_t$  – последующее значение переменной;  $X_{t-1}$  – предыдущее значение переменной;  $X_0$  – начальное значение переменной (в случае описываемого эксперимента – начальное влагосодержание торфа  $W_n$ );  $a_t$  – «белый шум», т.е. временной ряд, в котором переменные независимы и одинаково распределены со средним значением нуля.

Отсюда получаем

$$E(X_t|X_0) = x_0, \\ D(X_t|X_0 = x_0) = D(a_1 + \dots + a_t) = D(a_1) + \dots \\ \dots + D(a_t) = tD(a_1) = t\sigma_a^2. \quad (3)$$

Ввиду того, что дисперсия процесса сушки фрезерного торфа (см. рис. 2) изменяется во времени, можно прийти к заключению, что модель случайного блуждания характеризуется как нестационарный процесс. Однако временной ряд (2) можно привести к стационарному виду, если взять первую разность, т.е.  $\Delta X_t = X_t - X_{t-1} = (1 - B) X_t$ . При этом уравнение (2) сводится к виду  $\Delta X_t = a_t$ . Таким образом, модель (2) в первых разностях становится стационарной.

В процессе эксперимента формируется довольно большой массив данных, четко распределенных по времени, которые необходимо объективно анализировать. Для адекватного исследования такого информационного потока можно воспользоваться теорией «временного ряда» и соответствующими адаптивными математическими моделями для его анализа, например, моделью экспоненциального сглаживания (модель Брауна).

### ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ БРАУНА ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ФРЕЗЕРНОГО ТОРФА

Изначально модель Брауна использовалась в экономическом прогнозировании прибыли предприятия, но этот инструмент можно применить и к анализу процесса сушки торфа. Модель Брауна позволяет учесть действие множества факторов,

влияющих на скорость процесса сушки торфа (см. рис. 2), в результате чего можно определить, когда готовая торфопродукция (фрезерный торф) достигнет кондиционного (качественного) состояния, соответствующего ГОСТу. Кроме того, используя полученные в результате моделирования прогнозы в условиях производства, можно выяснить, на каких производственных участках можно начать операцию уборки готового фрезерного торфа [12].

Для проведения анализа какого-либо процесса необходимо иметь динамическую статистику показателей параметра (информационных, экспериментальных данных), характеризующего процесс во времени, т.е. получить временной ряд, под которым понимается последовательно измеренные через равные отрезки времени значения показателя. Суть анализа временных рядов заключается в попытке понять природу экспериментальных данных и сделать прогноз.

Модель Брауна имеет ряд достоинств, основными из которых являются:  
 простота в использовании;  
 возможность применения для краткосрочного прогнозирования;  
 вариативность;  
 достаточно высокая точность прогноза.

Эта математическая модель чаще применяется для стационарных процессов, но может использоваться и для нестационарных, в случае приведения их к стационарному виду или с применением параметра сглаживания из заданного множества С.Г. Светулькова [13].

Концепция модели Брауна базируется на постулате о том, что последующее значение параметра можно вычислить с использованием предыдущего спрогнозированного значения, скорректированного на ошибку (величину отклонения факта от прогноза). Таким образом, может быть выделено несколько вариаций модели Брауна:

1. Нулевого порядка, или «наивная» (описывает процессы, не имеющие тенденции развития).
2. Первого порядка (описывает линейную тенденцию развития процесса).
3. Второго порядка (отражает развитие процесса в виде параболической тенденции).

Таким образом, в данном эксперименте временной ряд задан значением параметра влагосодержания (кг/кг) фрезерной торфяной крошки:

$$W_{n'}, \dots, W_t, W_n \in R \quad (4)$$

Нужно решить задачу прогнозирования заданного временного ряда (4) с использованием адаптивной модели Брауна. Математическое описание модели Брауна выглядит следующим образом [14]:

$$W_{t+d}^{\text{прогноз}} = \alpha y_t + (1 - \alpha) W_t^{\text{факт}},$$

$$\alpha \in (0 \div 1) - \text{стационарный процесс};$$

$$\alpha \in (0 \div 2) - \text{нестационарный процесс}, \quad (5)$$

где  $W_{t+d}^{\text{прогноз}}$ ,  $W_t^{\text{факт}}$  – соответственно прогнозное и фактическое (экспериментальное) значение параметра (влагосодержание фрезерного торфа, кг/кг);  $\alpha$  – ошибка модели Брауна (адаптация).

В случае краткосрочного прогноза необходимо быстро учитывать происходящие факторные изменения. Поэтому для модели Брауна важны новые экспериментальные

данные наблюдения, но для сглаживания случайных отклонений ошибку адаптации необходимо уменьшать. Эти два условия вступают в противоречие друг с другом, ввиду чего отыскание компромиссного решения для ошибки адаптации  $\alpha$  (или как его еще принято называть «параметр сглаживания») является главной задачей. Как правило, для стабильных стационарных и мало изменяющихся процессов  $\alpha$  выбирают из диапазона (0, ..., 1). В рассматриваемом случае процесс сушки нестабильный, нестационарный и, под воздействием природных факторов, сильно изменчивый, поэтому параметр сглаживания  $\alpha$  принимает значение из диапазона запредельного множества С.Г. Светунькова от 1 до 2. В этом выборе адаптационной ошибки  $\alpha$  и проявляется особенность практического применения данного типа модели.

### **РЕЗУЛЬТАТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ БРАУНА В АНАЛИЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ИХ КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ**

Согласно постулатам разработанной профессором А.Е. Афанасьевым теории сушки капиллярно-пористых тел, процесс естественного обезвоживания фрезерного торфа можно назвать нестационарным. Анализ экспериментальных данных с использованием адаптивных математических моделей и теории «временных рядов» позволит спрогнозировать характер процесса сушки торфа, определить оптимальные параметры торфяного расстила, а также обосновать выбор оптимальной технологии сушки и добычи торфа.

В процессе анализа и интерпретации информационных данных, полученных в результате эксперимента [9], использовался офисный пакет прикладного программного обеспечения Windows Office. Расчеты проводились с применением инструментария Excel. Компьютерная реализация модели Брауна предполагает использование электронных таблиц, корреляционно-регрессионного анализа и встроенного «Пакета анализа». Полученные в ходе эксперимента данные по влагосодержанию фрезерного торфа ( $W_n$ ) заносили в «Журнал ведения экспериментов» и дублировали в электронную таблицу Excel:

Эксперимент № 1		Эксперимент № 2	
Время сушки $t_c$ (ч)	Влагосодержание торфа $W$ (кг/кг)	Время $t$ (ч)	Влагосодержание торфа $W$ (кг/кг)
1	1,78	1	2,85
2	1,09	2	2,65
3	0,53	3	2,51
4	0,28	4	2,31
5	0,21	...	...
6	0,11	30	0,6

Для прогнозирования процесса сушки торфа были выбраны два эксперимента:  
**эксперимент № 1** – технология сушки торфа в тонких слоях (короткие циклы);  
 начальные параметры процесса:  
 влагосодержание  $W_n = 1,78$  кг/кг;  
 загрузка поля по сухому веществу торфа  $P_c = 0,5$  кг/м<sup>2</sup>;

**эксперимент № 2** – технология сушки торфа в толстых слоях (длинные циклы); начальные параметры процесса:

влажностное содержание  $W_n = 2,85$  кг/кг;

загрузка поля по сухому веществу торфа  $P_c = 2,5$  кг/м<sup>2</sup>.

Граница влажностного содержания, при достижении которой фрезерный торф становится кондиционным по качеству, предусмотренному ГОСТом, соответствует  $W_{yc} = 0,67$  кг/кг. При таком влажностном содержании процесс сушки торфа можно остановить и начать операцию уборки готовой торфяной продукции.

Алгоритм построения модели Брауна для анализа временного ряда, представленного в вышеприведенной таблице, показан на рис. 4.

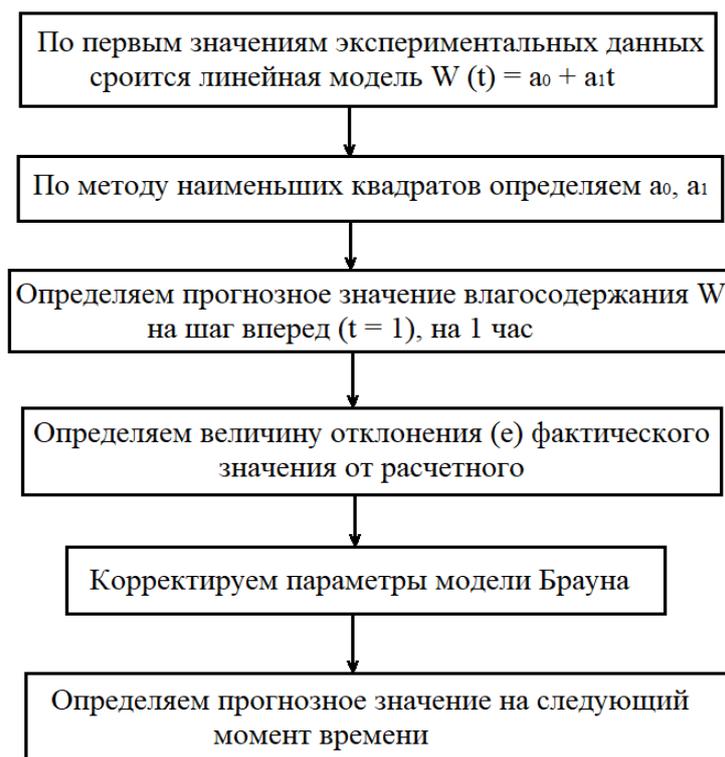


Рис. 4. Алгоритм компьютерной интерпретации модели Брауна

В результате интерпретации алгоритма построения модели Брауна (см. рис. 4) по данным представленных в таблице временных рядов были получены графики прогноза процесса сушки фрезерного торфа (рис. 5, 6). Интерпретация графического изображения процесса сушки фрезерного торфа показывает, что при равных условиях окружающей среды в эксперименте № 1 торф достигал кондиционного влажностного содержания за 1,5 ч, а в эксперименте № 2 – за 25 ч, т.е. в 16,6 раза дольше. Таким образом, скорость процесса сушки торфа в эксперименте № 1 выше, чем в эксперименте № 2, а значит, технология сушки торфа в тонких слоях имеет большую адаптивность к влияющим на процесс системным факторам (см. рис. 1). С учетом этого оптимальной можно считать технологию пневматической уборки фрезерного торфа в тонком расстиле. Адаптационная ошибка  $\alpha$  в модели Брауна для эксперимента № 1 была равна 1,12; для эксперимента № 2  $\alpha = 1,2$ .



Рис. 5. Модель Брауна для эксперимента № 1

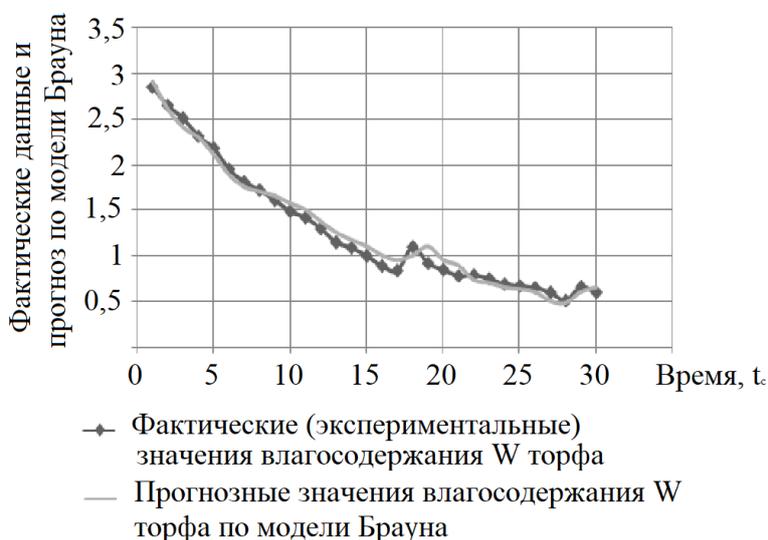


Рис. 6. Модель Брауна для эксперимента № 2

Чтобы оценить уровень достоверности модели Брауна, необходимо определить среднюю относительную ошибку аппроксимации. Если эта ошибка изменяется в диапазоне от 0 до 5 %, то прогноз по модели можно считать отличным. Если ошибка аппроксимации варьируется в пределах от 5 до 10 %, то прогноз хороший. Если среднее значение относительной ошибки попадает в интервал от 10 до 15 %, прогноз удовлетворительный. Если же среднее значение относительной ошибки больше 15 %, то в этом случае прогноз по модели Брауна признается неудовлетворительным. В эксперименте для каждого отдельного значения  $W$  относительная ошибка аппроксимации вычисляется по формуле

$$\text{ошибка аппроксимации} = \frac{(W_{\text{факт.}i} - W_{\text{прогноз.}i})}{W_{\text{факт.}i}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

где  $W_{\text{факт.}i}$ ,  $W_{\text{прогноз.}i}$  – соответственно экспериментальное и прогнозное (модельное) значение влагосодержания.

Получается, что средняя относительная ошибка аппроксимации вычисляется как среднее всех относительных ошибок. Для эксперимента № 1 было получено значение 4,5, т.е. прогноз по модели Брауна отличный, а для эксперимента № 2 – 6,75, таким образом, точность модели Брауна является хорошей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов, компьютерной интерпретации и анализа полученной информации с использованием модели Брауна были сделаны следующие выводы:

фрезерный торф быстрее достигает кондиционной влажности в тонком расстиле, при этом оптимально используются промежутки времени без осадков и сильных ветров;

длительность процесса сушки фрезерного торфа определяет тип модели, используемой для анализа временных рядов;

модель Брауна показывает хорошие результаты только для краткосрочных прогнозов, в связи с чем применима для прогнозирования технологических операций в цикле производства продукции;

процесс сушки торфа в полевых условиях является нестационарным, поэтому для использования модели Брауна требуется привести имеющийся временной ряд к стационарному виду с помощью метода первых разностей или скорректировать адаптационную ошибку  $\alpha$  в модели;

для нестационарных процессов адаптационная ошибка  $\alpha$  выбирается из диапазона значений, характеризуемого запредельным множеством С.Г. Светунькова от 1 до 2;

точность прогноза зависит от размера статистической выборки и количества факторов, влияющих на процесс моделирования.

Практическая ценность компьютерного прогнозирования операции сушки торфа заключается в том, что у предприятия появляется возможность планировать ход технологического процесса добычи торфа на разных участках месторождения, лучше использовать погодные условия сезона добычи и обосновать выбор оптимальной технологии уборки готовой торфяной продукции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., Жигульский М.А. Анализ инвестиционно-инновационной активности в торфяной отрасли // *Современное состояние экономических систем: экономика и управление*: сб. науч. тр. межд. науч. конф. Тверь: СКФ-офис, 2018. С. 148–153.

2. 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.

3. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Проблема оценки качества торфа и продукции на его основе: европейский и российский опыт // *Вестник ТвГТУ. Серия «Науки об обществе»*. 2021. № 3 (26).

4. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Особенности оценки экономической безопасности предприятий торфодобывающей отрасли Тверского региона России (обзор отрасли) // *Горные науки и технологии*. 2021. Т. 6. № 1. С. 5–15.

5. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Проблемы информатизации технологических процессов предприятий по добыче торфа // *Актуальные направления научных исследований: технологии, качество и безопасность*: сб. матер. Всерос. конф. Кемерово: КГУ, 2020. С. 112–113.

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 3 (11), 2021*

6. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Тенденции цифровизации в горно-добывающем секторе экономики РФ // *Вестник ТвГТУ. Серия «Науки об общ-ве»*. 2021. № 1 (24). С. 92–100.

7. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Торфодобывающее предприятие как информационный объект // *Современные технологии и инновации: мат. IV Всерос. науч.-практ. конф.* Тверь: ТвГТУ, 2020. С. 167–170.

8. Афанасьев А.Е. Исследование влияния начальной влажности и длительности сушки на сборы фрезерного торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. № 2 (26). С. 41–45.

9. Куликова Т.Б. Оптимизация технологических показателей производства фрезерного торфа // *Записки Горного института*. 2004. Т. 159. № 2. С. 55–58.

10. Наумович В.М. Сушка верхового торфа низкой степени разложения в виброкипящем слое // *Торфяная промышленность*, 1981. № 9. С. 18–20.

11. Лебедев В.В., Пухова О.В. Система автоматизированного управления технологическим процессом сушки торфа в камерах периодического действия // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2018. № 4. С. 29–35.

12. Михайлов А.В., Жигульская А.И., Яконовская Т.Б. Оценка этапов жизненного цикла разработки торфяного месторождения // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования: матер. межд. науч. конф.* Минск: ГНУ «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси», 2017. С. 196–199.

13. Светуных С.Г., Бутуханов А.В., Светуных И.С. Запредельные случаи метода Брауна в экономическом прогнозировании. СПб.: СПбГУЭФ, 2006. 71 с.

14. Кэмпбелл Д. Модели экспериментов в социальной психологии и прикладных исследованиях. М.: Прогресс, 1980. 11 с.

**Для цитирования:** Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Использование модели Брауна в анализе экспериментальных данных (компьютерная интерпретация) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 91–102.

## USE OF THE BROWN MODEL IN ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA (COMPUTER INTERPRETATION)

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

The article describes the experience of using Brown's model to analyze the results of an experiment to study the technological process of drying peat. An algorithm for constructing a Brown model based on the main parameters of the drying process is presented. The degree of adaptability of the exponential smoothing model in experiments and the type of the investigated processes are determined. The methodological basis for the analysis of experimental data is a systematic approach.

*Keywords:* peat, experiment, drying process, system approach, time series analysis, non-stationary process, Brown's model, random walk model.

## REFERENCES

1. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I., Zhigulsky M.A. Analysis of investment and innovation activity in the peat industry. *Current state of economic systems: economics and management: sb. nauch. tr. mezhd. nauch. konf.* Tver: SKF-ofis, 2018, pp. 148–153. (In Russian).
2. 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).
3. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I. The problem of assessing the quality of peat and products based on it: European and Russian experience. *Vestnik TvGTU. Series "Society sciences"*. 2021. No 3 (26), pp. (In Russian).
4. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I. Features of the assessment of the economic security of enterprises in the peat-extracting industry of the Tver region of Russia (an overview of the industry). *Gornye nauki i tekhnologii*. 2021.V. 6. No 1, pp. 5–15. (In Russian).
5. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I. Problems of informatization of technological processes of enterprises for the extraction of peat. *Actual directions of scientific research: technology, quality and safety: sb. mater. Vseros. konf.* Kemerovo: KGU, 2020, pp. 112–113. (In Russian).
6. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I. Trends in digitalization in the mining sector of the Russian economy. *Vestnik TvSTU. Series "Society sciences"*. 2021. No 1 (24), pp. 92–100 (In Russian).
7. Yakonovskaya T.B., Zhigulskaya A.I. Peat mining enterprise as an information object. *Modern technologies and innovations: mat. IV Vseros. nauch.-prakt. konf.* Tver: TvGTU, 2020, pp. 167–170. (In Russian).
8. Afanasyev A.E. Investigation of the influence of the initial moisture content and the duration of drying on the collection of milled peat. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. No 2 (26), pp. 41–45. (In Russian).
9. Kulikova T.B. Optimization of technological indicators of milled peat production. *Zapiski Gornogo instituta*. 2004. V. 159. No 2, pp. 55–58. (In Russian).
10. Naumovich V.M. Drying of high-moor peat with a low degree of decomposition in a vibro-boiling layer. *Torfyaniya promyshlennost*, 1981. No 9, pp. 18–20. (In Russian).
11. Lebedev V.V., Pukhova O.V. Automated control system for peat drying technological process in batch chambers. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2018. No 4, pp. 29–35. (In Russian).
12. Mikhailov A.V., Zhigulskaya A.I., Yakonovskaya T.B. 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: mater. mezhd. nauch. konf.* Minsk: GNU "Institut prirodopolzovaniya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi", 2017, pp. 196–199. (In Russian).
13. Svetunkov S.G., Butukhanov A.V., Svetunkov I.S. Zapredelnye sluchai metoda Brauna v ekonomicheskom prognozirovanii [Out-of-the-box cases of Brown's method in economic forecasting]. St. Petersburg: SPbGUEF, 2006. 71 p.
14. Campbell D. Modeli eksperimentov v sotsialnoy psikhologii i prikladnykh issledovaniyakh [Models of experiments in social psychology and applied research]. Moscow: Progress, 1980. 11 p.

Поступила в редакцию/received: 08.06.2021; после рецензирования/revised: 11.06.2021;  
принята/accepted: 15.06.2021

## **ВЫБОР СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОЙ В ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ИЕРАРХИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЕТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ**

В.К. КЕМАЙКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В.М. ЛАНЧЕВ<sup>2</sup>, канд. военных наук,  
А.А. СМЕЛОВСКАЯ<sup>1</sup>, студентка

<sup>1</sup>Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: vk-kem@mail.ru

<sup>2</sup>Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза  
Г.К. Жукова, 170100, Тверь, ул. Жигарева, д. 50, e-mail: vmlanchev@list.ru

© Кемайкин В.К., Ланчев В.М.,  
Смеловская А.А., 2021

В статье представлен выбор структуры автоматизированных систем резервирования. Отмечено, что на современном этапе развития и перевода сетей обмена данными на цифровое телекоммуникационное оборудование все большее значение приобретают вопросы, связанные с внедрением автоматизированных систем резервирования данных сетей и использованием технологии синхронной цифровой иерархии для повышения надежности данных сетей и обеспечения требуемой пропускной способности для передачи разного вида информации.

*Ключевые слова:* сеть обмена данными, асинхронный способ передачи данных, пропускная способность, повышения надежности данных сетей.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-103-109**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время достаточно большое внимание уделяется вопросам передачи информации по каналам связи. Выбор оптимальной автоматизированной системы резервирования цифровой сети обмена данными (СОД) на основе технологии синхронной цифровой иерархии (СЦИ) необходимо осуществлять в рамках имеющихся ресурсных ограничений по надежности с определением коэффициента готовности не одного звена, а всей цифровой сети обмена данными в целом. Это позволит обеспечить требуемую пропускную способность и надежность для передачи разного вида информации в СОД.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ**

Автоматизированные системы резервирования с применением технологии СЦИ, используемых при проектировании цифровой СОД, обладают рядом достоинств. Технология СЦИ позволяет создать на цифровой СОД универсальную систему, объединяющую сетевые ресурсы, которые выполняют функции передачи информации, контроля и управления (оперативного переключения, резервирования и др.). Информационной нагрузкой СОД на основе СЦИ могут быть сигналы любой из существующих систем плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ), потоки ячеек АТМ (асинхронный режим передачи) или дейтаграммы сети Интернет [1–2].

Циркулирующая информация в системе СЦИ передается в контейнерах. Контейнер представляет собой структурированные данные. Если система ПЦИ генерирует трафик, который нужно передать по системе СЦИ, то данные ПЦИ, как и

СЦИ, сначала формируются в виде контейнеров, а затем к контейнеру добавляется заголовок и указатели, в результате чего образуется синхронный транспортный модуль STM-1 [3]. По сети контейнеры STM-1 передаются в системе СЦИ разных уровней (STM-n), но во всех случаях единожды сформированный STM-1 [4] может складываться только с другим транспортным модулем, т.е. происходит мультиплексирование транспортных модулей, как показано на структурной схеме (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема сети передачи данных

С учетом того, что низкоскоростные сигналы ПЦИ мультиплексируются в структуру фрейма высокоскоростных сигналов СЦИ-ПЦИ с использованием метода побайтового мультиплексирования, их расположение во фрейме высокоскоростного сигнала постоянно и определено. Таким образом, низкоскоростной сигнал СЦИ, например 155 Мбит/с, может быть добавлен или выделен из высокоскоростного сигнала 2.5 Гбит/с. Это упрощает мультиплексирование и демultipлексирование сигнала и адаптирует СЦИ для высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи, обладающих высокой производительностью [4].

Технология СЦИ имеет собственные средства для управления и резервирования. Эти средства осуществляют операции переключения с помощью управляющих байтов, находящихся на определенных позициях в заголовке контейнеров СЦИ.

Таким образом, достаточная надежность в цифровых СОД на основе СЦИ может быть достигнута только с использованием сетевого резервирования. Однако применение в сети схем резервирования повышает затраты на резервные емкости. Поэтому следует использовать такие способы резервирования, которые позволили бы снизить затраты на резервирование, но при этом обеспечивали требуемый уровень надежности соединений.

Хотя ЦСП плезиохронной иерархии были значительным шагом в развитии связи по сравнению с аналоговыми системами, ЦСП ПЦИ все же имеет ряд недостатков. Во-первых, наличие трех различных иерархий (европейской, североамериканской и японской) усложняет, затрудняет организацию международной связи. Во-вторых, в ЦСП ПЦИ сложный процесс ввода/вывода цифровых потоков в промежуточных пунктах, в связи с чем для выделения низкоскоростного потока требуется непропорционально большое количество сложного оборудования. Этот недостаток становится особенно существенным при необходимости частого ввода/вывода цифровых потоков вдоль магистрали [5].

Плезиохронная цифровая иерархия – это цифровой способ передачи данных и голоса, основанный на временном разделении канала и технологии представления сигнала с помощью импульсно-кодовой модуляции. В технологии ПЦИ в качестве входного используется сигнал основного цифрового канала (ОЦК), а на выходе формируется поток данных со скоростями  $n \times 64$  Кбит/с. К группе ОЦК, несущих полезную нагрузку, добавляются служебные группы бит, используемые для проведения

процедур синхронизации и фазирования, сигнализации, контроля ошибок, в результате чего группа приобретает форму цикла.

Цифровая стационарная СОД в качестве среды передачи будет использовать в основном волоконно-оптический кабель, имеющий высокую пропускную способность. Объем информации, передаваемой по нему, чрезвычайно велик и становится все большим по мере совершенствования технологии производства волоконно-оптического кабеля. Повреждение линии цифровой стационарной опорной сети связи на основе технологии СЦИ приводит к значительной потере информации [1, 2]. Следовательно, при построении цифровой СОД на основе технологии СЦИ наиболее важной является задача повышения надежности [3, 4]. В то же время необходимо учесть затраты пропускной способности на резервирование с целью исключения неоправданных расходов пропускной способности цифровой сети связи (что выливается в излишние физические линии связи) [4].

Достаточная надежность в цифровых СОД на основе СЦИ может быть получена только с использованием сетевого резервирования [1]. Однако применение на сети любой схемы резервирования неизбежно связано с дополнительными затратами на резервные емкости. Поэтому следует использовать такие способы резервирования, которые позволили бы минимизировать затраты на резервирование при удовлетворении требуемого уровня надежности соединений.

В известных моделях надежности сетевых структур в качестве ненадежных элементов рассматривались звенья или участки сети. Однако в связи с повышением сложности аппаратуры СЦИ и надежности аппаратуры оптического линейного тракта соотношение в надежности изменилось и указывается, что отказы часто возникают не на линии, а в аппаратуре СЦИ [6]. Необходимо использовать нетрадиционный подход, рассматривающий и учитывающий все виды отказов аппаратуры и линий наряду с оценкой пропускной способности определенной системы резервирования при проектировании цифровой СОД. Применяя усовершенствованную методику при проектировании цифровой СОД, следует учитывать рекомендации по использованию конкретной системы резервирования СОД с учетом пропускной способности и надежности сети.

Кольцевые структуры подразумевают резервирование соединений подсети для сети произвольной структуры и носят название SNCP 1+1 (или, иначе, SNCP типа «точка-точка»). SNCP 1+1 производит резервирование трактов пользователей, проходящих по независимым путям, путем резервного переключения по их концам. Структура SNCP 1+1 может быть рекомендована также для взаиморезервирования трактов различных операторов любого, как нижнего, так и верхнего ранга. В этом случае в каждом из промежуточных узлов как основной, так и резервной трассы в мультиплексорах СЦИ аппаратура должна быть сконфигурирована как SNCP, что осуществляется программным способом [6].

Кольцо с резервированием мультиплексных секций Multiplex Section Shared Protection Ring (MS-SPRing) еще называют двунаправленным, так как в нем сигналы двусторонней связи идут по одному и тому же физическому пути, и каждый тракт направляется вдоль кольца по кратчайшему пути в обоих направлениях [2].

Трассы (маршруты) всех потоков приведены в табл. 1. При этом для кольцевого резервирования MS-SPRing в нормальном (неаварийном) режиме работы маршруты потоков проходят по более короткой трассе, обозначенной в табл. 1 как «Трасса 1». Резервные трассы каждого потока в кольце MS-SPRing различны при разных авариях, поэтому столбец со второй трассой для кольца MS-SPRing не используется [7]. Для кольцевого резервирования SNCP передача потока идет одновременно как по одной

стороне кольца («Трасса 1»), так и по другой («Трасса 2»). При использовании для каждого потока резервирования SNCP 1+1 «Трасса 1» – первая (основная) трасса, а «Трасса 2» – вторая (резервная) трасса. В табл. 2 приведены усредненные оценки затрат пропускной способности на организацию резервирования при различных способах резервирования. Сравнительная диаграмма усредненных оценок затрат пропускной способности на резервирование показана на рис. 2.

Таблица 1. Трассы потоков для случая центростремительного трафика

Поток	Трасса 1	Трасса 2
1-3	1-2-3	1-5-4-3
2-3	2-3	2-1-5-4-3
3-4	3-4	3-2-1-5-4
3-5	3-4-5	3-2-1-5

Таблица 2. Затраты пропускной способности на резервную емкость, получаемые при различных способах резервирования (усредненные)

Тип резервирования	Затраты пропускной способности на организацию резервирования
Резервирование SNCP 1+1	1+2,3
SNCP	1+2,5
MS-SPRing	1+1,7

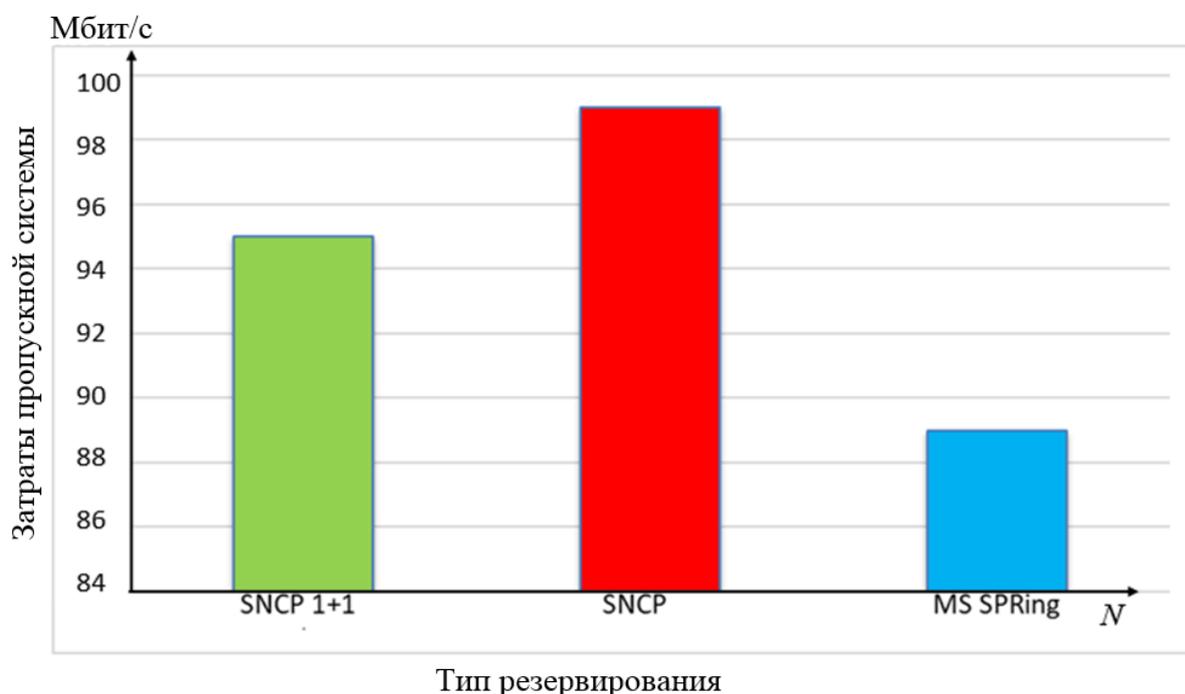


Рис. 2. Сравнительная диаграмма затрат пропускной способности на организацию резервирования

Расчеты (табл. 3) показывают, что превышение затрат пропускной способности достигает 60...80 % от пропускной способности без резервирования и, как следствие, происходит перерасход ресурсов на построение линий сети связи. Кроме пропускной способности, оценивается коэффициент готовности цифровой сети связи (табл. 3), из которой видно, что наиболее надежны кольца SNCP (для них время простоя при неисправностях может достигать 23 минут в год). Для кольца MS-SPRing коэффициент готовности несущественно ниже (разница времени простоя с кольцами SNCP – 5 минут в год). Худшие результаты у неколецевого резервирования SNCP 1+1 (время простоя при неисправности достигает 75 минут в год).

Таблица 3. Коэффициент готовности для SNCP 1+1 и колец SNCP и MS-SPRing

Вариант автоматизированной системы	Количество колец				
	3	4	5	7	10
MS-SPRing	0,9999810	0,9999760	0,9999710	0,9999611	0,9999461
SNCP	0,9999840	0,9999800	0,9999760	0,9999680	0,9999561
SNCP 1+1	0,9999751	0,9999642	0,9999513	0,9999196	0,9998576

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, требуемый уровень надежности цифровых СОД на основе СЦИ может быть достигнут только с использованием сетевого резервирования. Поскольку применение на сети любой схемы резервирования неизбежно связано с дополнительными затратами на резервные емкости, необходимо использовать такие способы резервирования, которые позволили бы минимизировать затраты на резервирование при удовлетворении требуемого уровня надежности соединений.

В настоящее время надежность автоматизированных систем резервирования при определении более эффективной определяется коэффициентом готовности одного звена цифровой СОД и не учитывает коэффициент готовности всей сети (сетевую надежность), что не позволяет более полно оценить степень надежности автоматизированной системы резервирования, применяемой в цифровой СОД.

Выбор конкретного метода резервирования всегда будет зависеть от существующей сети, ее возможностей, пропускной способности участков сети, и для каждого отдельного случая необходимо производить наиболее эффективный вариант на основе расчетов эффективности.

Кольцо SNCP обладает более высокой надежностью по сравнению с кольцом MS-SPRing, но для высоконадежных элементов сетей СЦИ эта разница незначительна. При любом распределении трафика кольца MS-SPRing требуют меньших затрат пропускной способности. При построении цифровой СОД на основе СЦИ применение автоматизированной системы MS-SPRing с топологией двунаправленных колец, связанных через звено, позволит получить значительный выигрыш в экономии пропускной способности и обеспечит более высокую надежность данной сети по сравнению с другими вариантами автоматизированных систем СЦИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буй П.М., Фомичев В.Н. Организация первичной цифровой сети связи железной дороги: учебник. Гомель: БелГУТ, 2017. 76 с.
2. Алексеев Е.Б. Транспортные сети СЦИ. Проектирование, техническая эксплуатация и управление: учебное пособие. М: ИПК при МТУСИ, 2003. 118 с.
3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник. СПб.: Питер, 2016. 996 с.
4. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH: учебное пособие. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1997. 148 с.
5. Ермишян А.Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях: учебник. Ч. 1. Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи. СПб.: Военная академия связи, 2005. 740 с.
6. Синхронная цифровая иерархия SDH. URL: <http://rtmv.kuban.ru/ptl/sdh.htm>. (дата обращения: 01.06.2021).
7. Гольдштейн Б.С. Системы коммутации. СПб.: БХВ Санкт-Петербург, 2003. 318 с.

**Для цитирования:** Кемайкин В.К., Ланчев В.М., Смеловская А.А. Выбор структуры автоматизированной системы резервирования, применяемой в технологии синхронной цифровой иерархии при проектировании сети обмена данными // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 3 (11). С. 103–109.

## SELECTION OF THE STRUCTURE OF THE AUTOMATED BACKUP SYSTEM USED IN THE SYNCHRONOUS DIGITAL HIERARCHY TECHNOLOGY IN THE DESIGN OF THE DATA EXCHANGE NETWORK

V.K. KEMAYKIN<sup>1</sup>, Cand. Sc., V.M. LANCHEV<sup>2</sup>, Cand. Sc.,  
A.A. SMELOVSKAYA<sup>1</sup>, student

<sup>1</sup>Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: vk-kem@mail.ru

<sup>2</sup>Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union  
G.K. Zhukov, 170100 Tver, 50, st. Zhigareva, e-mail: vmlanchev@list.ru

The article presents the choice of the structure of automated reservation systems. At the present stage of development and transfer of data exchange networks to digital telecommunications equipment, issues related to the introduction of automated systems for reserving network data using synchronous digital hierarchy technology are becoming increasingly important to improve the reliability of these networks and provide the required bandwidth for transmitting various types of information.

*Keywords:* asynchronous method of data transmission, throughput, improving the reliability of data networks.

## REFERENCES

1. Buy P.M., Fomichev V.N. Organizatsiya pervichnoy tsifrovoy seti svyazi zheleznoy dorogi: uchebnik. [Organization of the primary digital communication network of the railway. Textbook]. Gomel: BelGUT, 2017. 76 p.
2. Alekseyev Ye.B. Transportnye seti STSI. Proyektirovaniye, tekhnicheskaya ekspluatatsiya i upravleniye [SDH transport networks. Design, technical operation and management. Tutorial]. Uchebnoye posobiye. Moscow: IPK pri MTUSI, 2003. 118 p.
3. Olifer V.G., Olifer N.A. Kompyuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols]: uchebnik. St. Petersburg: Piter, 2016. 996 p.
4. Slepov N.N. Sinkhronnyye tsifrovye seti SDH: uchebnoye posobiye [Synchronous digital networks SDH]. Moscow: EKO-TRENDZ, 1997. 148 p.
5. Yermishyan A.G. Teoreticheskiye osnovy postroyeniya sistem voyennoy svyazi v ob'yedineniyakh i soyedineniyakh: uchebnik. Ch. 1. Metodologicheskiye osnovy postroyeniya organizatsionno-tekhnicheskikh sistem voyennoy svyazi [Theoretical foundations of building military communications systems in large formations and formations: textbook. Part 1. Methodological foundations for building organizational and technical systems of military communications]. St. Petersburg: Voyennaya akademiya svyazi, 2005. 740 p.
6. Sinkhronnaya tsifrovaya iyerarkhiya SDH. URL: <http://rtmv.kuban.ru/ptl/sdh.htm>. (date accessed: 01.06.2021) (In Russian).
7. Goldshteyn B.S. Sistemy kommutatsii [Switching systems]. St. Petersburg: BKHV Sankt-Peterburg, 2003. 318 p.

Поступила в редакцию/received: 09.06.2021; после рецензирования/revised: 11.06.2021;  
принята/accepted: 30.06.2021

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 3 (11), 2021**

**Print ISSN 2658-5030**

Редактор М.Б. Юдина  
Корректор А.С. Соломина

---

Подписано в печать 30.09.2021

Дата выхода в свет 15.11.2021

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 13,75

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 12,79

Цена свободная

Заказ № 223

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,96

С – 110

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22  
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»  
Центр инженерной печати  
170024, Тверь, ул. Академическая, д. 14