

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2019. Т. 64, №3

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2019. Т. 64, №3

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР. Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1998 г. – современное название

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

А. П. Ласковнёв – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь (*заместитель главного редактора*)

И. А. Старостина (*ведущий редактор журнала*)

А. В. Белый – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

П. А. Витязь – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

А. Я. Григорьев – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

В. Г. Залесский – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

А. Ф. Ильющенко – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Беларусь
С. М. Костромицкий – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
Л. Г. Красневский – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. П. Крень – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. М. Малярович – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
Н. К. Мышкин – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь
О. Г. Пенязьков – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. М. Федосюк – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь
М. Л. Хейфец – Открытое акционерное общество «НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

С. Воденичаров – Болгарская академия наук, София, Болгария
Ю. Гавлик – Институт технологии машиностроения и автоматизации производства Краковской политехники (Технологический университет), Краков, Польша
Г. Жинтялис – Литовская академия наук, Вильнюс, Литва
Б. Каталинич – Международная инженерная академия, Технический университет Вены, Вена, Австрия
А. А. Михалевич – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. Г. Наумовец – Национальная академия наук Украины, Киев, Украина
К. А. Солнцев – Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова, Москва, Россия
Л. Танович – Белградский университет, Белград, Сербия
Б. М. Хрусталёв – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

*Адрес редакции:
ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 284-19-19; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2019. Т. 64, №3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*
Компьютерная верстка *А. В. Новик*

Подписано в печать 24.09.2019. Выход в свет 27.09.2019. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 82 экз. Заказ 227.
Цена номера: индивидуальная подписка – 11,81 руб., ведомственная подписка – 28,27 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013. ЛП №02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2019

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2019, vol. 64, no. 3

The Journal was founded in 1956 under the titles
“Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series”,
since 1992 – “Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series”,
since 1998 – it comes under its actual title

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 391

*The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

E d i t o r - i n - C h i e f

Sergey A. Chizhik – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l B o a r d

Aleksandr P. Laskovnev – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
(Associate Editor-in-Chief)

Irina A. Starostsina (lead editor)

Aleksei V. Byeli – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Pyotr A. Vityaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Andrei Ya. Grigoriev – V. A. Bielyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Vitaliy G. Zalesky – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Aleksandr F. Ilyuschenko – State Scientific and Production Amalgamation of Powder Metallurgy, Minsk, Belarus

Sergey M. Kostromitsky – Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Leonid G. Krasnevski – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Aleksandr P. Kren – Institute of Applied Physics of National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus

Aleksandr M. Maliarevich – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Nikolai K. Myshkin – V. A. Bielyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Oleg G. Penyazkov – A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Valeri M. Fedosyuk – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Mikhail L. Kheifets – Open Joint Stock Company “NPO Center” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l C o u n c i l

Stephan Vodenicharov – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Jozef Gawlik – Institute for Manufacturing Engineering and Automation of Cracow University of Technology, Poland
Gintautas Žintelis – Lithuanian Academy of Sciences, Vilnius, Lithuania
Branko Katalinic – TU Wien, Wien, Austria
Aleksandr A. Mikhalevich – Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Anton G. Naumovets – National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
Konstantsin A. Solntsev – A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Lyubodrag Tanovich – University of Belgrade, Belgrade, Serbia
Boris M. Khrustal'ov – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Address of the Editorial Office:
1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: + 375 17 284-19-19; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2019, vol. 64, no. 3

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*
Computer imposition *A. V. Novik*

It is sent of the press 24.09.2019. Appearance 27.09.2019. Format 60×84 1/8. Offset paper. The press digital.

Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 82 copies. Order 227.

Number price: individual subscription – 11,81 byn., departmental subscription – 28,27 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise “Publishing House “Belaruskaya Navuka”

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina Str., Minsk, 220141, Republic of Belarus.

© RUE “Publishing House “Belaruskaya Navuka”,
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Чижик С.А., Хейфец М.Л., Бородавко В.И., Клименко С.А., Мельничук Ю.А., Колмаков А.Г., Панин А.В., Чугуй Ю.В., Батаев А.А., Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Премент Г.Б., Алексеева Т.А.** Обеспечение качества поверхностного слоя изделий с гетерогенными покрытиями при механической обработке 263
- Клубович В.В., Кулак М.М., Самолетов В.Г., Хина Б.Б.** Получение износостойких материалов методом СВС-лития с применением центробежных сил 275
- Урбанович В.С., Маликина Т.Д., Лавыш Е.О., Шлома Е.Н., Карась С.М.** Влияние электроэрозионной обработки поверхности твердосплавных пластин на их фазовый состав и пайку режущих элементов из нитридной керамики 286

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Нисс В.С.** Электролитно-плазменное полирование кобальт-хромовых сплавов медицинского назначения 296
- Менжинский А.Б.** Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем и электрическим генератором возвратно-поступательного типа 304

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

- Малько М.В., Василевич С.В.** Кинетика пиролиза древесной биомассы в изотермических условиях 321

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Тузлуков В.П.** Пространственно-временное разнесение сигналов в системах с широкополосным множественным доступом и кодовым разделением каналов 332

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Кульбак Л.И., Чиж О.П., Парамонов Н.Н., Рымарчук А.Г., Мартинович Т.С.** Оценка надежности кластерной суперкомпьютерной конфигурации 347
- Рыбальский О.В., Соловьев В.И., Чернявский С.С., Журавель В.В., Железняк В.К.** Вероятностный подход к принятию экспертных решений по анализу сложных объектов 359

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

- Витязь П.А., Головатый И.И., Прушак В.Я., Диулин Д.А.** Технология устройства ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов на примере объектов Петриковского ГОКа 366
- Кузьмин А.В., Радкевич А.В., Петрушкевич В.П., Кузьмина Н.Д.** Вероятностный анализ дозовых нагрузок на персонал при выводе из эксплуатации пункта хранения отработавшего ядерного топлива передвижной АЭС «Памир-630Д» 378

CONTENTS**MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY**

- Chizhik S. A., Kheifetz M. L., Borodavko V. I., Klimenko S. A., Melniychuk Yu. A., Kolmakov A. G., Panin A. V., Chugui Yu. V., Bataev A. A., Blumenstein V. Yu., Krechetov A. A., Prement G. B., Alekseeva T. A.** Surface quality of products with heterogeneous coatings during mechanical processing 263
- Klubovich V. V., Kulak M. M., Samolyotov V. G., Khina B. B.** Producing wear-resistant materials by SHS-casting with application of centrifugal forces 275
- Urbanovich V. S., Malikina T. D., Lavysh E. O., Shloma E. N., Karas S. M.** The effect of electro-erosion treatment of the surface of hard alloy plates on their phase composition and soldering of nitride ceramics cutting elements ... 286

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

- Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S.** Electrolytic-plasma polishing of cobalt-chromium alloys for medical products 296
- Menzhinski A. B.** Coordination of forces of mechanical and electric subsystems of power plant with free piston engine and electric generator of reciprocating type 304

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Malko M. V., Vasilevich S. V.** Kinetics of pyrolysis of wood biomass under isothermal conditions 321

RADIO ELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

- Tuzlukov V. P.** Space-time diversity signal processing employed by W-CDMA systems 332

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Kulbak L. I., Tchij O. P., Paramonov N. N., Rymarchuk A. G., Martinovich T. S.** Reliability assessment of cluster supercomputer configuration 347
- Rybalskiy O. V., Solovyov V. I., Chernyavskiy S. S., Zhuravel V. V., Zheleznyak V. K.** Probabilistic approach to acceptance of expert decisions on examinations of difficult objects 359

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

- Vityaz P. A., Golovaty I. I., Prushak V. Ya., Diulin D. A.** Technology of performance of ice wall when sinking shafts at the example of the objects of the Petrikov mining 366
- Kuzmin A. V., Radkevich A. V., Petrushkevich V. P., Kuzmina N. D.** Probabilistic dose assessment for personnel during decommissioning of spent nuclear fuel storage facility of transportable npp "Pamir 630D" 378

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 621.91.01
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-263-274>

Поступила в редакцию 29.07.2019
Received 29.07.2019

**С. А. Чижик^{1,2}, М. Л. Хейфец^{1,3}, В. И. Бородавко³, С. А. Клименко⁴, Ю. А. Мельничук⁴,
А. Г. Колмаков^{5,6}, А. В. Панин⁶, Ю. В. Чугуй⁷, А. А. Батаев⁸, В. Ю. Блюменштейн⁹,
А. А. Кречетов⁹, Г. Б. Премент¹⁰, Т. А. Алексеева¹¹**

¹*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь*

³*ОАО «НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

⁴*Институт сверхтвёрдых материалов имени В. Н. Бакуля Национальной академии наук Украины,
Киев, Украина*

⁵*Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова Российской академии наук,
Москва, Россия*

⁶*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
Томск, Россия*

⁷*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

⁸*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

⁹*Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия*

¹⁰*ООО «Фелокт-сервис», Минск, Беларусь*

¹¹*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ С ГЕТЕРОГЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. Показано, что при механической обработке изделий из материалов с гетерогенной структурой возможности управления состоянием поверхностного слоя существенно ограничиваются. В качестве примера управления рассмотрена лезвийная обработка изделий из материалов с гетерогенной структурой – точение высокопрочных покрытий, нанесенных газопламенным напылением.

В связи с тем что для аморфной составляющей гетерогенных покрытий свойственно отсутствие деформационного упрочнения, при их обработке наблюдается значительная деформация срезаемого материала и образуется характерная стружка. Высокоинтенсивное термобарическое воздействие на обрабатываемый гетерогенный материал приводит к частичной кристаллизации в тонком поверхностном слое с высоким содержанием аморфной фазы.

Предложен критерий, количественно оценивающий статистические показатели, которые комплексно характеризуют однородность структуры материалов, разброс их свойств по величине. Критерий позволяет определить способность материалов подвергаться резанию без проведения длительных экспериментов.

Ключевые слова: обеспечение качества, поверхностный слой изделия, гетерогенные покрытия, аморфно-кристаллическая структура, механическая обработка, управление процессом резания, поликристаллический сверхтвёрдый материал, фрактальный формализм

Для цитирования: Обеспечение качества поверхностного слоя изделий с гетерогенными покрытиями при механической обработке / С. А. Чижик [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 263–274. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-263-274>

S. A. Chizhik^{1,2}, M. L. Kheifetz^{1,3}, V. I. Borodavko³, S. A. Klimenko⁴, Yu. A. Melniychuk⁴, A. G. Kolmakov^{5,6}, A. V. Panin⁶, Yu. V. Chugui⁷, A. A. Bataev⁸, V. Yu. Blumenstein⁹, A. A. Krechetov⁹, G. B. Prement¹⁰, T. A. Alekseeva¹¹

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³Open Joint Stock Company “NPO Center” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

⁴V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

⁵A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁶Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

⁷Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁸Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

⁹T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

¹⁰Limited Liability Company “Felokt-servis”, Minsk, Belarus

¹¹Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus

SURFACE QUALITY OF PRODUCTS WITH HETEROGENEOUS COATINGS DURING MECHANICAL PROCESSING

Abstract. It is shown that when machining products from materials with heterogeneous structure, possibilities of management of a condition of a blanket are significantly limited. As an example of management, cutting processing of products from materials with heterogeneous structure – turning of high-strength flame evaporated coverings is considered.

Because for an amorphous component of heterogeneous coverings the lack of deformation hardening is peculiar considerable deformation of the cut-off material is observed at their processing and characteristic shaving is formed. High-intensity thermobaric impact on the processed heterogeneous material leads to partial crystallization in a thin blanket with the high content of an amorphous phase.

As a result of researches the criterion which quantitatively estimates the statistics, which complexly characterize uniformity of structure of materials and dispersion of their properties, is offered. The criterion allows defining ability of materials to be exposed to cutting without carrying out long experiments.

Keywords: quality assurance, product blanket, heterogeneous coverings, amorphous and crystal structure, machining, management of cutting process, polycrystalline superhard material, fractal formalism

For citation: Chizhik S. A., Kheifetz M. L., Borodavko V. I., Klimenko S. A., Melniychuk Yu. A., Kolmakov A. G., Panin A. V., Chugui Yu. V., Bataev A. A., Blumenstein V. Yu., Krechetov A. A., Prement G. B., Alekseeva T. A. Surface quality of products with heterogeneous coatings during mechanical processing. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 263–274 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-263-274>

Введение. Разработка новых материалов требует проведения исследований особенностей процессов и условий их обработки. Эта проблема особенно актуальна для материалов с гетерогенной структурой и неоднородными свойствами, а также изделий, в которых они используются.

Контактное взаимодействие инструмента и заготовки в процессе формообразования изделия сопровождается комплексом силовых, тепловых, химических и других явлений, обусловленных особенностями структуры и свойств материала изделия. При этом важнейшими условиями обработки, наряду с режимами резания, шлифования или деформирования, являются параметры структуры и показатели свойств обрабатываемого материала.

В результате обработки на поверхности изделия формируется совокупность макро- и микро-неровностей, в поверхностных слоях обрабатываемого изделия происходят процессы упрочнения-разупрочнения, структурно-фазовые превращения и другие явления, приобретающие особое значение для обеспечения работоспособности деталей в условиях эксплуатационного нагружения [1, 2].

В случае обработки изделий из материалов с гетерогенной структурой особенности последней существенно ограничивают возможности управления состоянием поверхностного слоя изделий. Поэтому в качестве примера рассмотрим лезвийную обработку изделий из материалов с гетерогенной структурой – точение высокопрочных покрытий, напыленных газотермическими методами.

Стружкообразование при обработке гетерогенных покрытий. Условия обработки влияют на состояние поверхностного слоя изделий при точении газопламенных покрытий с аморфно-кристаллической структурой на основе железа, напыленных порошковой поволокой и порошком [3]. Особенности структуры таких покрытий обуславливают высокую степень их гетерогенности. Ограничение температуры, сопровождающей процесс обработки, связано с воз-

возможностью фазовых превращений в материале покрытия в определенных тепловых условиях. Общий вид стружки, ее строение, степень разрушения характеризуют процесс деформации срезаемого материала в процессе обработки. Деформация, в свою очередь, зависит от механических свойств обрабатываемого материала и его химического состава, величины переднего угла инструмента, скорости резания и других факторов.

В связи с относительно небольшой толщиной гетерогенных покрытий (обычно не более 1,0 мм) их обработка производится с достаточно малыми ($t = 0,1-0,6$ мм) глубинами резания. В большинстве случаев, за исключением удаления дефектного слоя покрытия, инструмент работает в условиях чистовой обработки, то есть в диапазоне минимальных подач, что обуславливает малую толщину слоя материала, удаляемого в процессе резания. Из-за небольших величин сечения среза на криволинейный участок лезвия приходится значительная часть общей рабочей длины режущей кромки инструмента. Это также уменьшает толщину среза, которая является величиной переменной вдоль режущей кромки и при постоянных условиях обработки снижается с увеличением радиуса при вершине инструмента.

При обработке пластичных кристаллических материалов со скоростью резания $v > 1$ м/с и сравнительно малых толщинах среза образуется сливная стружка. Аморфным металлическим материалам свойственна высокая пластичность, что связано с особым механизмом диссипации энергии, который обусловлен дисклинационными процессами, обеспечивающими таким материалам высокую прочность и твердость.

При обработке напыленных порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$ и порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ газопламенных покрытий, которые характеризуются высоким содержанием аморфной фазы, образуется стружка скалывания. Сторона стружки, контактирующая с резцом, вследствие дополнительной деформации поверхностного слоя из-за трения о переднюю поверхность инструмента имеет гладкую поверхность (рис. 1, *b*), а свободная поверхность стружки – ступенчатую (рис. 1, *a, c*). Такая стружка состоит из сильно деформированных элементов, которые соединены между собой (рис. 1, *d, g*), но в отличие от аналогичной стружки скалывания, образующейся при точении стали с невысокой скоростью резания, они сравнительно легко отделяются друг от друга (рис. 1, *e*). Низкая прочность соединения элементов такой стружки является следствием слоистой структуры напыленных покрытий, в которой прочность сцепления между слоями и отдельными частицами много ниже прочности отдельной частицы.

Процесс стружкообразования при точении покрытия с аморфно-кристаллической структурой происходит за счет большой деформации удаляемого слоя материала и сопровождается значительной усадкой стружки. Изменение усадки стружки коррелирует с изменением силы резания, стойкостью режущего инструмента и качеством обработанной поверхности [4].

Коэффициент усадки стружки, определенный весовым методом, при точении ($v = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм; $g = -10^\circ$) покрытия, напыленного из порошковой проволоки $Fe_{80}B_{20}$, составляет $K_l = 3,5$. При увеличении скорости резания до 1,7 м/с коэффициент усадки стружки снижается до $K_l = 3,2$.

Большая усадка стружки при точении газотермически напыленных покрытий инструментом, оснащенным поликристаллическим сверхтвердым материалом (ПСТМ) марки «киборит» [5], является следствием значительной пластичности аморфной составляющей таких покрытий. Обработка инструментом с отрицательным передним углом приводит к росту усадки стружки из-за интенсификации напряженного состояния материала в зоне резания.

На криволинейном участке режущей кромки инструмента в результате значительного изменения величины переднего угла и толщины стружки процесс стружкообразования происходит в более сложных условиях, чем на прямолинейном участке. Уменьшение радиуса при вершине инструмента приводит к росту усадки стружки, следствием чего является увеличение высоты микронеровностей на обработанной поверхности (рис. 2).

Для аморфной составляющей покрытия свойственно отсутствие деформационного упрочнения. Таким образом, при обработке аморфизированных покрытий имеет место значительная деформация срезаемого материала и образуется характерная стружка скалывания, что обусловлено гетерогенностью структуры. Общий вид стружки, свидетельствует о нестабильности процесса резания.

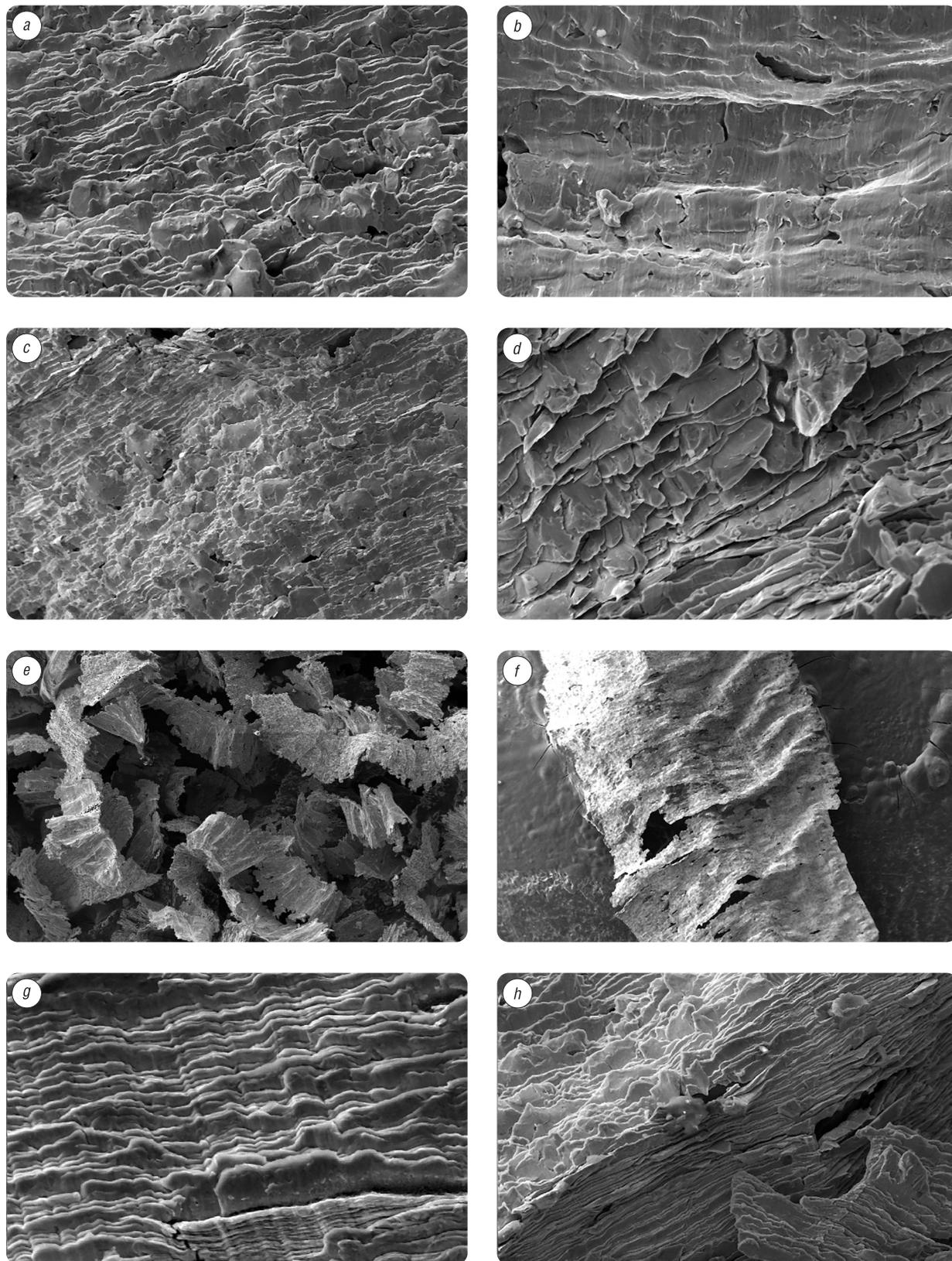


Рис. 1. Стружка, образовавшаяся в процессе точения газопламенного покрытия с аморфно-кристаллической структурой ($v = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм, $h_3 = 0,1$ мм, $\gamma = -10^\circ$): a ($\times 400$), b ($\times 450$), e ($\times 10$), f ($\times 30$) – порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$; c ($\times 200$), d ($\times 450$), g ($\times 450$, $\gamma = 0^\circ$), h ($\times 400$) – порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$

Fig. 1. Chips formed during turning of a flame coating with an amorphous-crystalline structure ($v = 1.2$ m/s; $S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm, $h_3 = 0.1$ mm, $\gamma = -10^\circ$): a ($\times 400$), b ($\times 450$), e ($\times 10$), f ($\times 30$) – of a powder $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$; c ($\times 200$), d ($\times 450$), g ($\times 450$, $\gamma = 0^\circ$), h ($\times 400$) – of a cored wire $Fe_{80}B_{20}$

При точении покрытия, напыленного порошком $Fe_{80}B_{20}$, образуется стружка, которая практически сразу же разрушается и имеет вид крупнодисперсного порошка. Это связано с особенностями структуры покрытия, которое характеризуется низкой степенью деформации напыленных частиц, следствием чего является их невысокая прочность сцепления между собой, а также значительная пористость. Объем частиц с кристаллической структурой составляет примерно половину объема покрытия. Как правило, эти частицы слабо деформированы, по структуре они подобны исходному порошку, а при обработке резанием происходит их выкрашивание.

В целом при точении такого покрытия под действием сил резания из-за относительно слабого соединения структурных составляющих срезаемый слой материала разделяется на отдельные мелкие частицы. Образование аналогичной стружки имеет место и при точении покрытия с аморфно-кристаллической структурой.

Значительная твердость покрытий требует использования для их лезвийной обработки инструмента с отрицательным передним углом (γ). В этом случае создаются условия для интенсивного упругого взаимодействия со стороны задней поверхности инструмента, что приводит к увеличению высоты неровностей на обработанной поверхности. Процесс пластической деформации покрытия при резании инструментом с передним углом $\gamma = 0^\circ$ протекает более равномерно и менее напряженно ($K_f = 2,4$) в сравнении с процессом резания инструментом с $\gamma = -10^\circ$.

Геометрические параметры обработанной поверхности. Исследования влияния условий обработки на шероховатость обработанной поверхности показывают [6], что при увеличении механических свойств покрытия значительно возрастает высота неровностей и имеет место снижение влияния режимов резания (рис. 2). Так, при точении порошкового покрытия $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ инструментом, оснащенным круглой режущей пластиной диаметром 7,0 мм из поликристаллического сверхтвердого материала (ПСТМ) марки «киборит», практически незначимым становится изменение величины подачи в 6 раз и скорости резания более чем в 4 раза.

Изменение режимов резания при обработке газопламенного покрытия, напыленного порошком $Fe_{80}B_{20}$, также не приводит к существенному изменению высоты неровностей. В процессе обработки формируется порошкоподобная стружка надлома и имеет место выкрашивание отдельных частиц покрытия.

При точении газопламенных покрытий, напыленных порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ и порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$ (рис. 3), характеризующихся высокой плотностью, слоистой структурой и наличием незначительного количества слабозакрепленных сферических частиц, варьированием режимами обработки можно существенно снизить шероховатость обработанной поверхности.

При увеличении подачи инструмента высота неровностей монотонно растет. При этом более значимой становится роль вспомогательной режущей кромки инструмента, что обуславливает большее выдавливание обрабатываемого материала в вершины неровностей и их деформирование за счет увеличения объема материала, деформируемого в зоне стружкообразования.

Зависимость высоты неровностей Ra от скорости резания носит неоднозначный характер (рис. 4). В диапазоне скоростей резания $v = 0,7-1,0$ м/с имеется область с повышенной шероховатостью поверхности. Стружка, формируемая при точении в таких условиях, легко разделяется на элементы. Дальнейшее увеличение скорости резания вызывает монотонное снижение высотных параметров шероховатости поверхности, что обусловлено уменьшением объема пластически

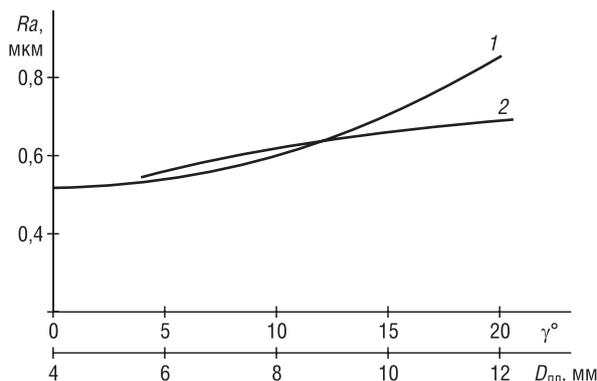


Рис. 2. Зависимость шероховатости обработанной поверхности газопламенного покрытия, напыленного порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$, от величины переднего угла (1) и диаметра при вершине (2) инструмента с ПСТМ марки «киборит» ($v = 1,7$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм)

Fig. 2. Dependence of the roughness of the treated surface of a gas-flame coating sprayed with $Fe_{80}B_{20}$ flux-cored wire on the value of the rake angle (1) and the diameter at the apex (2) of an instrument with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand ($v = 1.7$ m/s; $S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm)

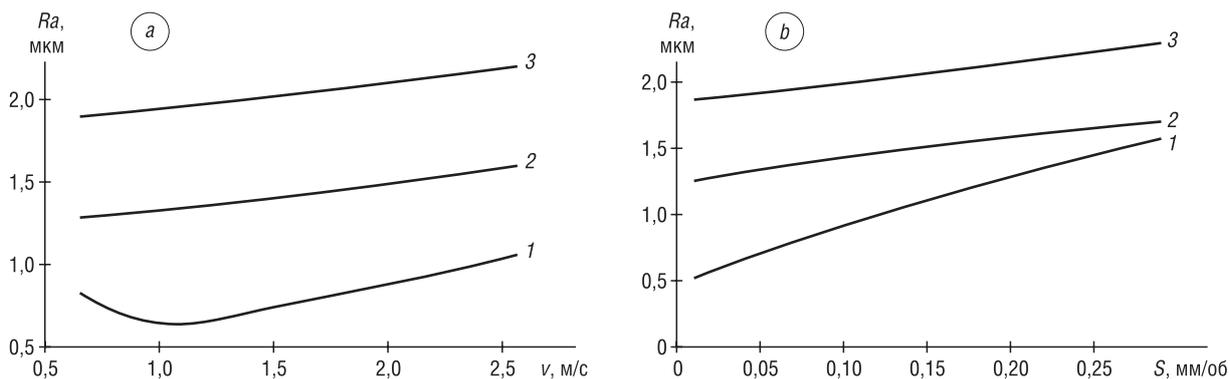


Рис. 3. Влияние скорости резания (а) ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) и подачи (б) ($v = 1,2$ м/с; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) на шероховатость обработанной поверхности газопламенного покрытия, напыленного порошком $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$: 1–3 – точение инструментом с ПСТМ марки «киборит» на расстоянии 0,6; 1,1; 1,4 мм от основы

Fig. 3. Influence of cutting speed (a) ($S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm) and filing (b) ($v = 1.2$ m/s; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm) on the roughness of the treated surface of a flame coating sprayed with powder $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$: 1–3 – turning with a tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand at a distance of 0.6, 1.1, 1.4 mm from the base

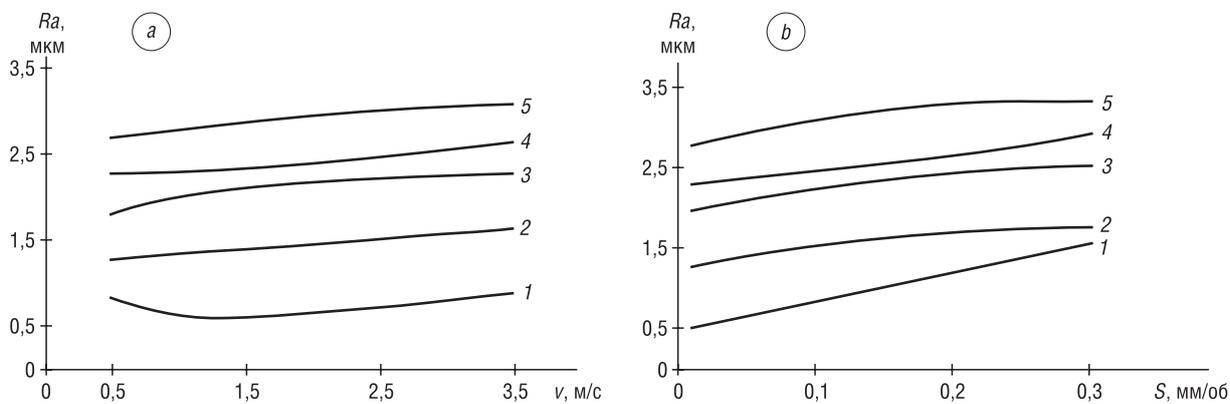


Рис. 4. Влияние скорости резания инструментом с ПСТМ марки «киборит» (а) ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) и подачи (б) ($v = 1,2$ м/с; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) на шероховатость обработанной поверхности напыленного покрытия: 1 – газопламенного порошковой проволокой $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 2 – электродугового порошковой проволокой $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 3 – электродугового порошковой проволокой $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$; 4 – газопламенного порошковой проволокой $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 5 – газопламенного порошковой проволокой $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$

Fig. 4. Effect of cutting speed with a tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand (a) ($S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm) and filing (b) ($v = 1.2$ m/s; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm) on the roughness of the treated surface of the sprayed coating: 1 – on flame powder wire $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 2 – on electric arc powder wire $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 3 – on electric arc powder wire $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$; 4 – on gas flame powder wire $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$; 5 – on gas flame powder wire $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$

деформируемого в зоне резания покрытия и снижением коэффициента трения между инструментом, стружкой и деталью. Стружка, которая образуется при увеличении скорости резания, не разделяется на элементы, что свидетельствует о том, что в процессе точения происходит срезаание компактного слоя материала, а не разделение его на отдельные частицы.

Незначительное увеличение высотных параметров шероховатости поверхности при точении с высокими скоростями резания связано с интенсификацией физико-химического взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием в зоне обработки и изменением условий разрушения обрабатываемого материала, обусловленного изменением динамичности процесса резания. В целом влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности определяется высокой твердостью и прочностью покрытий.

Влияние условий обработки резцом ($v = 0,7\text{--}17$ м/с; $S = 0,01\text{--}0,20$ мм/об; $h_3 = 0,1\text{--}0,3$ мм; $\gamma = -20\text{--}0^\circ$), оснащенный ПСТМ марки «киборит», газопламенного покрытия, напыленного порошком $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$, на высоту неровностей описывается уравнением регрессии

$$Ra = 0,00041S^{0,22}h_3^{0,33}(90 - \gamma)v^{9-1,94\ln(90-\gamma)}.$$

Значение шага неровностей S_m при точении покрытия, напыленного порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$, с режимами резания, при которых образуется наименьшая шероховатость обработанной поверхности, составляет $S_m = 0,38–0,52$ мкм. В этих условиях относительная опорная длина профиля t_p находится в диапазоне 20–25 % при уровне сечения профиля $p = 30$ %.

Снижение глубины резания, несмотря на ее относительно слабое влияние на процесс пластической деформации в зоне резания, при точении покрытий с аморфно-кристаллической структурой приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности Ra (рис. 5). Это связано со слоистой структурой покрытия, сформированной из сильнодеформированных частиц. При точении с глубинами резания $t = 0,05–0,15$ мм из-за недостаточно высокой прочности сцепления элементов покрытия между собой создаются условия для их вырывания из массива покрытия, а сам процесс обработки является нестабильным.

Увеличение фаски износа инструмента по задней поверхности h_3 приводит к росту высоты неровностей (см. рис. 5). При этом на начальных стадиях износа инструмента увеличение силы на его задних поверхностях, которое может привести к возникновению вибрации, компенсируется увеличением радиуса при вершине инструмента и возникновением выглаживающего эффекта на задней поверхности, что ограничивает увеличение шероховатости поверхности. При дальнейшем износе инструмента на задней поверхности резца образуются зазубрины, изменяется форма и расположение режущей кромки – высота неровностей на обработанной поверхности возрастает.

Гетерогенность структуры покрытия оказывает основное влияние на шероховатость обработанной поверхности [6, 7]. По величине фрактальной размерности совокупности механических свойств материала D_s можно прогнозировать значение высотных параметров шероховатости поверхности покрытия, сформированной при обработке (рис. 6). Для изделий с покрытиями, структура которых характеризуется разными величинами D_s , достигается разная шероховатость обработанной поверхности. Это имеет место как при обработке одного и того же материала, для которого характерны разные значения D_s , так и обработки гаммы покрытий.

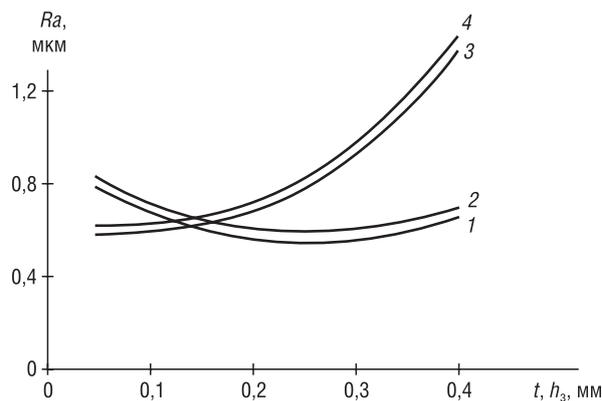


Рис. 5. Влияние глубины резания (1, 2) ($v = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $h_3 = 0,1$ мм) и ширины фаски износа инструмента с ПСТМ марки «киборит» по задней поверхности (3, 4) ($v = 1,2$ м/с; $t = 0,15$ мм; $S = 0,05$ мм/об) на шероховатость обработанной поверхности напыленного покрытия: 1, 3 – газопламенное порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$; 2, 4 – газопламенное порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$

Fig. 5. Influence of cutting depth (1, 2) ($v = 1.2$ m/s; $S = 0.05$ mm/rev; $h_3 = 0.1$ mm) and the width of the chamfer of the tool wear with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand grade along the back surface (3, 4) ($v = 1.2$ m/s; $t = 0.15$ mm; $S = 0.05$ mm/rev) on the roughness of the treated surface of the sprayed coating: 1, 3 – on gas flame flux-cored wire $Fe_{80}B_{20}$; 2, 4 – on gas flame powder $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$

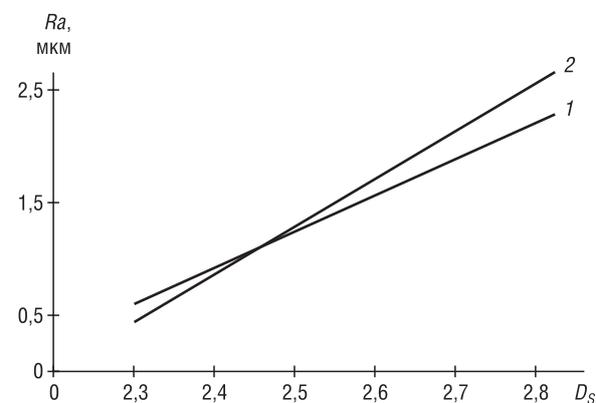


Рис. 6. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от величины фрактальной размерности D_s покрытий ($v = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм): 1 – газопламенное порошком $Fe_{78}B_{10}Si_{12}$; 2 – гаммы газопламенных покрытий систем Fe–B, Fe–Cr–B: газопламенное порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,32$); электродуговое порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,57$); электродуговое порошковой проволокой $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2,68$); газопламенное порошком $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,76$); газопламенное порошком $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2,82$)

Fig. 6. Dependence of the surface roughness on the fractal dimension D_s of coatings ($v = 1.2$ m/s; $S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm; $h_3 = 0.1$ mm): 1 – on gas flame powder $Fe_{78}B_{10}Si_{12}$; 2 – gamma of flame coatings of Fe–B, Fe–Cr–B: on gas flame flux-cored wire $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2.32$); on electric arc powder wire $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2.57$); on electric arc powder wire $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2.68$); on gas flame powder $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2.76$); on gas flame powder $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2.82$)

Аппроксимирующие прямые $Ra = f(D_s)$ для газопламенного напыления покрытий порошком и проволокой расположены в непосредственной близости друг от друга, что позволяет говорить о единой тенденции. Более качественная поверхность формируется при обработке покрытий, характеризующихся меньшей величиной фрактальной размерности совокупности механических свойств D_s материалов, из которых они изготовлены. Поэтому по величине D_s правомерно оценивать обрабатываемость покрытий по критерию шероховатости обработанной поверхности, а также других материалов с гетерогенной структурой.

Фрактальные представления о структуре обрабатываемого материала позволяют разработать единый интегральный критерий обрабатываемости. В качестве такого критерия предлагается использовать величину D_s . Данный критерий основан на методологии фрактального формализма и количественно оценивает статистические показатели, комплексно характеризующие однородность структуры материалов и разброс их свойств по величине.

Физико-механические свойства и фазовые превращения в структуре покрытий. При точении покрытий с аморфно-кристаллической структурой острым резцом, оснащенным ПСТМ марки «киборит», со скоростями резания > 2 м/с температура резания превышает 1000 °С, что выше температуры кристаллизации ($Q_{кр}$) сплавов, которые используются для нанесения покрытий [4]. В то же время результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о том, что в процессе обработки инструментом с ПСТМ марки «киборит» в обрабатываемом материале не происходит структурно-фазовых превращений. Анализ рентгенограмм, полученных на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3,0 (CoK α -излучение) по методике [8], с поверхности покрытий показывает, что в покрытиях при точении острым резцом в диапазоне скоростей резания до 3 м/с сохраняется исходное содержание аморфной фазы.

Вероятность протекания кристаллизации в материалах с аморфно-кристаллической структурой определяется их химическим составом, структурой и скоростью нагрева, при увеличении которой возрастает температура кристаллизации ($Q_{кр}$). Особенно интенсивно $Q_{кр}$ увеличивается в диапазоне высоких скоростей нагрева. Хотя в процессе точения имеет место быстрый и локальный нагрев поверхностного слоя покрытия, за счет применения инструмента, оснащенного ПСТМ марки «киборит», который характеризуется высокой теплопроводностью, обеспечивается быстрый отвод тепла из зоны резания.

Скорость изменения температуры слоя покрытия, расположенного на глубине 0,01 мм от поверхности резания, составляет $\frac{\partial Q}{\partial \tau} = (2,31-8,8) \cdot 10^6$ К/с [2, 9]. В то же время критическая скорость охлаждения для аморфизации сплава Fe $_{78}$ Si $_{12}$ B $_{10}$ равна $1,8 \cdot 10^5$ К/с, для сплава Fe $_{80}$ B $_{20}$ – $6,0 \cdot 10^6$ К/с [10]. Сравнивая приведенные значения, можно заключить, что при точении покрытий острым резцом в рассматриваемом диапазоне скоростей резания выполняется условие аморфизации обрабатываемого материала.

Расчеты и результаты экспериментов показывают, что в процессе точения покрытий с аморфно-кристаллической структурой отсутствуют предпосылки для кристаллизации обрабатываемого материала в поверхностном слое – в покрытии сохраняется аморфная матрица с включениями кристаллических фаз.

При увеличении износа инструмента в процессе точения со скоростью резания $v > 1,7$ м/с газопламенных покрытий, напыленных порошком Fe $_{78}$ Si $_{12}$ B $_{10}$ и порошковой проволокой Fe $_{80}$ B $_{20}$, характеризующихся высоким содержанием аморфной фазы (> 75 %), в обрабатываемом материале наблюдается незначительное его снижение.

Результаты рентгеноструктурных исследований показывают (таблица), что содержание аморфной фазы снижается до 13 % при ширине фаски износа инструмента по задней поверхности $h_3 = 0,4$ мм. В то же время после точения изношенным резцом электродуговых покрытий порошковыми проволоками Fe $_{80}$ B $_{20}$, Fe $_{79}$ Cr $_{16}$ B $_{5}$, газопламенного покрытия, напыленного порошком Fe $_{79}$ Cr $_{16}$ B $_{5}$, характеризующихся меньшим содержанием аморфной фазы (≈ 50 %), сохраняется исходное содержание материалов покрытий (рис. 7).

Незначительные фазовые превращения, наблюдающиеся в покрытиях с высоким содержанием аморфной фазы при точении изношенным резцом, связаны с изменением напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала со стороны задней поверхности инструмента.

Влияние условий процесса точения инструментом с ПСТМ марки «киборит» на содержание аморфной фазы в покрытиях при глубине резания $t = 0,15$ мм
The influence of the conditions of the turning process with a tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand on the content of the amorphous phase in the coatings at a depth of cut $t = 0.15$ mm

Покрытие	Содержание аморфной фазы, %		
	$v = 0,5$ м/с; $S = 0,02$ мм/об; $h_3 = 0,1$ мм	$v = 0,7$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $h_3 = 0,1-0,2$ мм	$v = 1,7$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $h_3 = 0,4$ мм
Газопламенное порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$	90	90	80
порошком $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$	75	75	68
порошком $Fe_{79}Cr_{16}B_5$	48	Не изменяется	
Электродуговое порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$	45		
порошковой проволокой $Fe_{79}Cr_{16}B_5$	40		

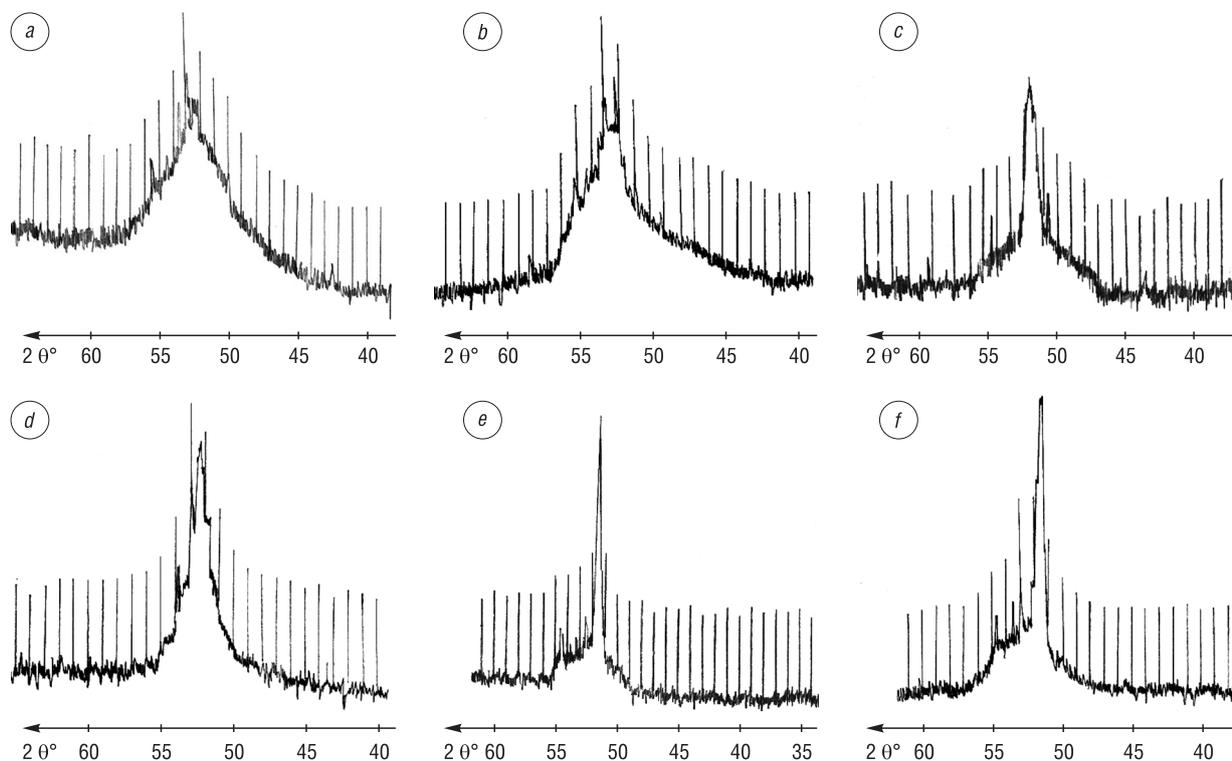


Рис. 7. Фрагменты рентгенограмм напыленных покрытий после обработки инструментом с ПСТМ марки «киборит»: *a, b* – газопламенное порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$; *c, d* – электродуговое порошковой проволокой $Fe_{80}B_{20}$; *e, f* – электродуговое порошковой проволокой $Fe_{79}Cr_{16}B_5$; *a, c, e* – $v = 0,7$ м/с, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,15$ мм, $h_3 = 0,1$ мм; *b* – $v = 1,7$ м/с, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,15$ мм, $h_3 = 0,4$ мм; *d, e* – $v = 2,7$ м/с, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,15$ мм, $h_3 = 0,4$ мм

Fig. 7. Fragments of X-ray diffraction patterns of the deposited coatings after processing with a tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand: *a, b* – on gas flame flux-cored wire $Fe_{80}B_{20}$; *c, d* – on electric arc powder wire $Fe_{80}B_{20}$; *e, f* – on electric arc powder wire $Fe_{79}Cr_{16}B_5$; *a, c, e* – $v = 0.7$ m/s, $S = 0.05$ mm/rev, $t = 0.15$ mm, $h_3 = 0.1$ mm; *b* – $v = 1.7$ m/s, $S = 0.05$ mm/rev, $t = 0.15$ mm, $h_3 = 0.4$ mm; *d, e* – $v = 2.7$ m/s, $S = 0.05$ mm/rev, $t = 0.15$ mm, $h_3 = 0.4$ mm

По мере изнашивания инструмента в процессе точения покрытий происходит увеличение ортогональной составляющей силы резания P_y , что интенсифицирует воздействие на поверхностный слой покрытия со стороны задней поверхности инструмента, приводящее к его кристаллизации.

После обработки покрытий изношенным инструментом со скоростью резания $v < 1,5$ м/с в обрабатываемом материале не происходят фазовые превращения, несмотря на то, что сила резания имеет большое значение. Это связано со значительно меньшим уровнем температур в зоне резания

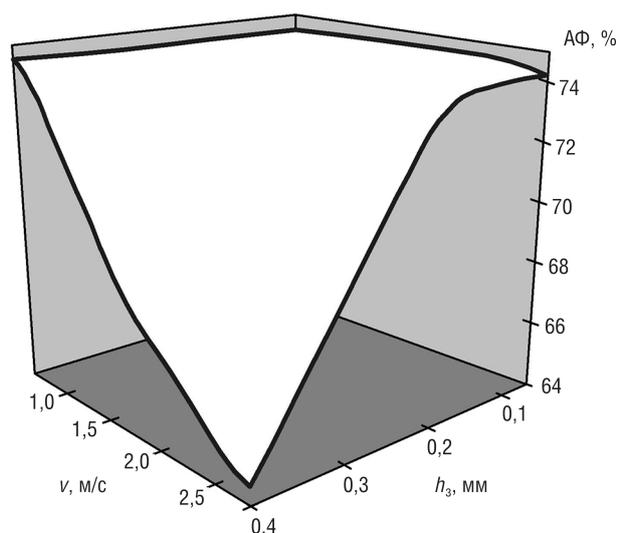


Рис. 8. Зависимость содержания аморфной фазы в газопламенном покрытии, напыленном порошком $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$, от скорости резания v и ширины фаски износа инструмента с ПСТМ марки «киборит» по задней поверхности h_3 ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм)

Fig. 8. Dependence of the content of the amorphous phase in a gas-flame coating sprayed with $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ powder on the cutting speed v and the width of the wear chamfer of the tool with polycrystalline superhard material of the “kiborit” brand on the back surface h_3 ($S = 0.05$ mm/rev; $t = 0.15$ mm)

Заключение. В связи с тем что для аморфной составляющей гетерогенных покрытий свойственно отсутствие деформационного упрочнения, при их обработке наблюдается значительная деформация срезаемого материала и образуется характерная стружка скалывания, общий вид которой свидетельствует о нестабильности процесса резания.

Только одновременное высокоинтенсивное термобарическое воздействие на обрабатываемый гетерогенный материал приводит к частичной кристаллизации в тонком поверхностном слое с высоким содержанием аморфной фазы. При этом к обработке покрытий, содержащих не более половины аморфной фазы, не устанавливаются ограничения по мощности резания.

В результате исследований предложен основанный на методологии фрактального формализма критерий, который количественно оценивает статистические показатели, комплексно характеризующие однородность структуры материалов, разброс их свойств по величине. Данный критерий позволяет определить способность материалов подвергаться резанию без проведения длительных экспериментов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T18P-183) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-58-00009-Бел_а).

Acknowledgements

The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project T18P-183) and by Russian Foundation for Basic Research (Project 18-58-00009-Бел_а).

Список использованных источников

1. Технологические основы управления качеством машин / А. В. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
2. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко [и др.]; под ред. С. А. Клименко. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
3. Клименко, С. А. Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту / С. А. Клименко, Ю. О. Мельничук, Г. В. Встовський. – Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля, 2009. – 170 с.

при обработке с низкими скоростями резания. Поэтому можно заключить, что только одновременное высокоинтенсивное термобарическое воздействие на материал в процессе обработки приводит к частичной кристаллизации в тонком поверхностном слое покрытий с высоким содержанием аморфной фазы (рис. 8).

В связи с возможностью частичной кристаллизации материала покрытия в процессе обработки для ограничения условий резания целесообразно использовать величину граничной мощности резания [4]

$$W = vP_z \leq [W],$$

где $[W]$ – мощность резания, превышение которой приводит к структурно-фазовым превращениям в обрабатываемом покрытии; P_z – тангенциальная составляющая силы резания.

Для случая точения инструментом, оснащенным ПСТМ марки «киборит», газопламенных покрытий, напыленных порошковой проволокой $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ и порошком $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$, $W = 1100$ Вт. Однако применительно к покрытиям с невысоким содержанием аморфной фазы ($\approx 50\%$) в исследованном диапазоне условий обработки не выявлены ограничения по мощности резания.

4. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: в 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2006. – Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С.А. Клименко. – 316 с.
5. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
6. Наукоёмкие технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.
7. Клименко, С.А. Шероховатость поверхности деталей с напыленными аморфно-кристаллическими покрытиями на основе железа, обработанных инструментом с ПКНБ / С.А. Клименко, Ю.А. Мельничук // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2018. – №11. – С. 32–38.
8. Ванштейн, Б.К. Дифракция рентгеновских лучей на цепочных молекулах / Б.К. Ванштейн. – М.: АН СССР, 1963. – 372 с.
9. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под ред. М.Л. Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 248 с.
10. Куницкий, Ю.А. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике / Ю.А. Куницкий, В.Н. Коржик, Ю.С. Борисов. – Киев: Техніка, 1988. – 198 с.

References

1. Vasil'ev A. V., Dal'skii A. M., Klimenko S. A. (et al.). *Technological bases of quality management of cars*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 256 p. (in Russian).
2. Klimenko S. A. (ed.), Kolomiets V. V., Kheifets M. L., Pilipenko A. M., Mel'niichuk Yu. A. *Processing by Cutting of Details with Coverings*. Kiev, V. N. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. 353 p. (in Russian).
3. Klimenko S. A., Mel'niichuk Yu. O., Vstovskii G. V. *Fractal Parameterization of the Structure of Materials, their Machinability by Cutting and Wear Resistance of a Cutting Tool*. Kiev, V. N. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2009. 170 p. (in Ukrainian).
4. Klimenko S. A. (ed.). *Superhard Materials. Receiving and Application. Vol. 5: Blade material processing*. Kiev, V. N. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, CPI of "ALKON" of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2006. 316 p. (in Russian).
5. Bogatyreva G. P., Burykin V. V., Gargin V. V., Novikov N. V., Klimenko S. A. (et al.). *Tools from Superhard Materials*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 608 p. (in Russian).
6. Suslov A. G., Bazrov B. M., Bez'yazychnyi V. F. (et al.). *High Technologies in Mechanical Engineering*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 528 p. (in Russian).
7. Klimenko S. A., Melniychuk Yu. A. Roughness of a surface of the details with the raised dust amorphous and crystal coverings on the basis of iron processed by the tool with PKNB. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2018, no. 11, pp. 32–38 (in Russian).
8. Vanshtein B. K. *Chain Molecule X-Ray Diffraction*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1963. 372 p. (in Russian).
9. Chizhik S. A., Vityaz' P. A., Kheifets M. L., Borodavko V. I., Prement G. B., Klimenko S. A., Bataev A. A., Blyumenshtein V. Yu., Vasil'ev A. S., Kolmakov A. G. *Ensuring Quality of Products in Technological Complexes*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 248 p. (in Russian).
10. Kunitskii Yu. A., Korzhik V. N., Borisov Yu. S. *Not Crystal Metal Materials and Coverings in the Equipment*. Kiev, Tekhnika Publ., 1988. 198 p. (in Russian).

Информация об авторах

Чижик Сергей Антонович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровка, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chizhik@presidium.bas-net.by

Хейфец Михаил Львович – доктор технических наук, профессор, заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, ОАО «НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси (ул. Шаранговича, 19, 220018, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru

Information about the authors

Sergey A. Chizhik – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, First Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chizhik_sa@tut.by

Mikhail L. Kheifetz – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Academician-Secretary of the Department Physical and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief Researcher, Open Joint Stock Company "NPO Center" of the National Academy of Sciences of Belarus (19, Sharangovich Str., 220018, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru

Бородавко Владимир Иванович – генеральный директор, ОАО «НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси (ул. Шаранговича, 19, 220018, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru

Клименко Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины (ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина). E-mail: atmu@meta.ua

Мельничук Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины (ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина). E-mail: atmu@meta.ua

Колмаков Алексей Георгиевич – член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (Ленинский пр., 49, 119334, Москва, Российская Федерация); главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (пр. Академический, 2/4, 634055, Томск, Российская Федерация). E-mail: kolmakov@imet.ac.ru

Панин Алексей Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (пр. Академический, 2/4, 634021, Томск, Российская Федерация). E-mail: pav@ispms.tsc.ru

Чугуй Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор, научный руководитель, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (ул. Русская, 41, 630058, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Батаев Анатолий Андреевич – доктор технических наук, профессор, ректор, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: rector@nstu.ru

Блюментейн Валерий Юрьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева (ул. Красноармейская, 117, 650000, Кемерово, Российская Федерация). E-mail: blumenstein.vu@gmail.com

Кречетов Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, ректор, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева (ул. Красноармейская, 117, 650000, Кемерово, Российская Федерация). E-mail: krechetovaa@kuzstu.ru

Премент Геннадий Борисович – начальник цеха, ООО «Фелокт-сервис» (ул. Куприянова, 2а, 220086, Минск, Республика Беларусь). E-mail: prement@tut.by

Алексеева Татьяна Анатольевна – старший преподаватель кафедры, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Республика Беларусь). E-mail: alekseeva671@gmail.com

Vladimir I. Borodavko – Director General, Open Joint Stock Company “NPO Center” of the National Academy of Sciences of Belarus (19, Sharangovich Str., 220018, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru

Sergei A. Klimenko – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director for Research, V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (2, Avtozavodskaya Str., 04074, Kiev, Ukraine). E-mail: atmu@meta.ua

Yuriy A. Melniychuk – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (2, Avtozavodskaya Str., 04074, Kiev, Ukraine). E-mail: atmu@meta.ua

Andrey G. Kolmakov – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Sc. (Engineering), Deputy Director for Research, A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (49, Leninskii Ave., 119334, Moscow, Russian Federation); Chief Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4, Akademicheskii Ave., 634055, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kolmakov@imet.ac.ru

Alexey V. Panin – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4, Akademicheskii Ave., 634055, Tomsk, Russian Federation). E-mail: pav@ispms.tsc.ru

Yuriy. V. Chugui – D. Sc. (Engineering), Professor, Research Supervisor, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (41, Russkaya Str., 630058, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Anatoliy A. Bataev – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: rector@nstu.ru

Valeriy Yu. Blumenstein – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (117, Krasnoarmeiskaya Str., 650000, Kemerovo, Russian Federation). E-mail: blumenstein.vu@gmail.com

Andrey A. Krechetov – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Rector, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (117, Krasnoarmeiskaya Str., 650000, Kemerovo, Russian Federation). E-mail: krechetovaa@kuzstu.ru

Gennadiy B. Prement – Foreman, Limited Liability Company “Felokt-servis” (2a, Kupriyanov Str., 220086, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prement@tut.by

Tatiana A. Alekseeva – Senior Lecturer of the Department, Polotsk State University (29, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: alekseeva671@gmail.com

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 536.46:534.29+669.719

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-275-285>

Поступила в редакцию 16.07.2019

Received 16.07.2019

В. В. Клубович^{1,2}, М. М. Кулак³, В. Г. Самолетов³, Б. Б. Хина^{2,4}

¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,*

²*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,*

³*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Беларусь,*

⁴*Белорусская государственная академия авиации, Минск, Беларусь*

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СВС-ЛИТЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Аннотация. Работа посвящена проблеме получения твердых износостойких материалов методом СВС-литья с применением центробежных сил. Разработано устройство для центробежного СВС-литья и составы исходной реакционной шихты на основе железа. Создана и реализована на практике технология получения покрытий, материалов и конечных изделий с неоднородным распределением упрочняющих частиц по объему образца. Исследована микроструктура и фазовый состав синтезированного материала с неоднородным распределением упрочняющих частиц. В синтезированном материале реализован принцип Шарпи: в относительно мягкой основе распределены твердые дисперсные частицы карбидов, что обеспечивает высокую износостойкость.

Методом СВС-литья были изготовлены заготовки для измерительных калибров типа «пробка», которые успешно прошли производственные испытания на ОАО «ВИЗАС». Испытания показали, что твердость всех синтезированных образцов находится в интервале 63–68 HRC; количество измерений на 1 мкм износа на диаметре 15 мм составляет 2500–2700. Таким образом, использование разработанного метода позволило существенно (в 1,5–2 раза) повысить срок службы измерительного инструмента.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), центробежные силы, структура, износостойкость

Для цитирования: Получение износостойких материалов методом СВС-литья с применением центробежных сил / В. В. Клубович [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 275–285. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-275-285>

V. V. Klubovich^{1,2}, M. M. Kulak³, V. G. Samolyotov³, B. B. Khina^{2,4}

¹*Belorussian National Technical University, Minsk, Belarus*

²*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

³*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Belarus*

⁴*Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Belarus*

PRODUCING WEAR-RESISTANT MATERIALS BY SHS-CASTING WITH APPLICATION OF CENTRIFUGAL FORCES

Abstract. The paper is devoted to the problem of producing hard, wear-resistant materials by SHS-casting using centrifugal forces. We have developed a device for centrifugal SHS casting and initial compositions of the reactive iron-base charge. A technology for producing coatings, materials and final products with a non-uniform distribution of strengthening particles over the specimen volume has been developed and tested in industrial conditions.

The microstructure and phase composition of the synthesized material with a non-uniform distribution of reinforcing particles is studied. The synthesized material implements the Charpy principle: dispersed hard carbide particles are distributed in a relatively soft matrix, which ensures high wear resistance.

By means of SHS casting, billets were obtained for producing a measurement instrument, namely a plug-type gauge, which successfully passed industrial tests at OJSC “VIZAS”. The tests shown that the hardness of all synthesized samples was in the range from 63 to 68 HRC and the number of measurements per 1 micron of wear on a diameter of 15 mm was 2500 to 2700. Hence, the developed method made it possible to significantly increase the service life of the measuring tool: by a factor of 1.5 to 2.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis (SHS), centrifugal forces, structure, wear resistance

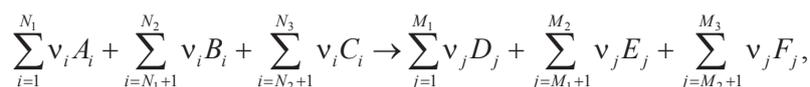
For citation: Klubovich V. V., Kulak M. M., Samolyotov V. G., Khina B. B. Producing wear-resistant materials by SHS-casting with the application of centrifugal forces. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 275–285 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-275-285>

Введение. Возрастающим комплексным интенсивным нагрузкам на поверхности узлов и механизмов современного машиностроения наиболее полно могут противостоять новые материалы с уникальными физико-механическими свойствами. Перспективным направлением, позволяющим достаточно просто синтезировать новые материалы, является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций: диплом №287 СССР на открытие / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, В. М. Шкиро; дата публ.: 30.08.1984], суть которого заключается в проведении процесса синтеза в режиме горения за счет экзотермического взаимодействия компонентов без применения значительного внешнего нагрева.

СВС как метод получения материалов был предложен в то время, когда одним из главных требований к материалам была их однородность. На начальном этапе исследований СВС-процессов обеспечению однородности продукта придавалось большое значение. Однако в последнее время возникли более интересные задачи с прямо противоположной целью – не бороться с неоднородностью, а наоборот, использовать ее, получая неоднородные продукты с заданной структурой неоднородности [1].

Наиболее простым и перспективным способом получения материалов с неоднородным распределением упрочняющих частиц является метод СВС с восстановительной стадией и применением массовых сил. В этом случае происходит горение с образованием высокотемпературных расплавов. Этот способ получил название СВС-металлургия.

Химическую схему превращения исходных порошков в СВС-металлургии можно представить в виде



где A_i – оксиды (WO_3 , MoO_3 , Cr_2O_3 , CrO_3 , V_2O_5 , NiO , Fe_2O_3 , B_2O_3 , SiO_2 и др.); B_i – элемент-восстановитель (C, Al, Mg, Ti, Zr и др.); C_i – элементы или вещества, вводимые в шихту для получения дополнительных упрочняющих фаз в целевом продукте (например, B, Si, N_2 , O_2 и т.д.); D_j – образующиеся твердые, тугоплавкие и жаростойкие фазы, такие как WC, Mo_2C , Cr_3C_2 , VB_2 , $MoSi_2$, V_3N , Ni_3Al и пр.; E_j – оксиды, формирующиеся в результате экзотермического взаимодействия (Al_2O_3 , MgO, ZrO_2 , TiO_2 и др.); F_j – восстановленные металлы (Fe, Ni и др.), играющие роль матрицы; ν_i и ν_j – стехиометрические коэффициенты.

Поскольку в СВС-системах с восстановительной стадией в волне горения имеется жидкая фаза, в которой протекают основные реакции, то воздействие центробежной силы может оказывать влияние на кинетику и механизм реакций синтеза. В процессах СВС-металлургии такое воздействие приводит к перераспределению химических элементов и фаз в объеме образца [2–4], что позволяет получать литые функционально-градиентные материалы и покрытия. Используя жидкофазное состояние продуктов синтеза после прохождения волны горения при проведении процесса СВС с восстановительной стадией, можно получать литые защитные покрытия, изделия из твердых, жаростойких материалов, слитки тугоплавких и других материалов.

Соединение стали с карбидами тугоплавких материалов приводит к созданию нового класса материалов – карбидосталей. Сплавы карбид титана – сталь по своим свойствам являются промежуточными между инструментальными сталями и твердыми сплавами. Сталь при изготовлении изделий сложной формы позволяет термически и механически обрабатывать их, а карбиды титана и хрома обеспечивают высокую износостойкость. Такие сплавы используют для изготовления измерительных инструментов – калибров типа «пробка». Получение таких сплавов методом СВС изучено недостаточно. Поэтому исследование поведения многокомпонентных составов в процессе синтеза с восстановительной стадией имеет не только научное значение, но и служит развитию материаловедения, физической химии горения и химической кинетики.

Распределение по высоте дисперсных упрочняющих фаз с плотностью, отличающейся от металлической основы, в поле центробежных сил является результатом уравнивания двух встречных потоков частиц. Прямой поток – перемещение частиц под действием силы Архимеда и центробежной силы. Обратный поток – перемещение частиц в результате диффузии. Равновесное состояние в такой системе описывается распределением Больцмана

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (1)$$

где W – потенциальная энергия частицы, равная работе переноса частицы массой m из точки r в точку r_0 :

$$W = -\int_{r_0}^r F dr = -\int_{r_0}^r (ma - V_k \rho_0 a) dr = -\int_{r_0}^r (\rho - \rho_0) V_k w^2 r dr = \frac{1}{2} V_k w^2 (\rho - \rho_0) (r_0^2 - r^2). \quad (2)$$

Здесь $a = w^2 r$ – центробежное ускорение, r – расстояние от оси вращения центрифуги до заданной точки, r_0 – расстояние от оси вращения до дна литейной формы, V_k – объем частицы карбида с плотностью ρ , ρ_0 – плотность расплава. Тогда

$$n = n_0 \exp\left[-\frac{V_k w^2 (\rho - \rho_0) (r_0^2 - r^2)}{2kT}\right]. \quad (3)$$

Множитель n_0 является нормировочным и находится из условия

$$\int_v n dV = \bar{n} V = N, \quad (4)$$

где V – объем слитка, \bar{n} – средняя концентрация частиц в объеме слитка, N – общее число частиц карбида в слитке.

Таким образом, равновесное распределение концентрации частиц по высоте слитка подчиняется экспоненциальному закону. Причем более плотные карбиды ($\rho > \rho_0$) концентрируются у дна слитка, а менее плотные ($\rho < \rho_0$) – у поверхности.

Из выражения (3) следует также, что распределение карбидов сильно зависит от размера карбидных частиц ($V_k \approx R_k^3$, R_k – усредненный радиус частицы) и от угловой скорости вращения ротора центрифуги w .

В реальных СВС-процессах равновесное состояние достигается редко. Для оценки степени равновесности фактического состояния удобно использовать величину ω^{-1} , как это сделано в работе [5]:

$$\omega^{-1} = \frac{t_{rel}}{t_{ph}}. \quad (5)$$

Здесь величина t_{rel} характеризует скорость охлаждения (кристаллизации) слитка:

$$t_{rel} \approx \frac{d^2}{\chi}, \quad (6)$$

где d – диаметр слитка, χ – температуропроводность расплава. Величина t_{ph} характеризует скорость процесса фазоразделения:

$$t_{ph} = \frac{\nu}{R_k^2} \left(\frac{\rho_0}{|\Delta\rho|} \right) \frac{L}{a}, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость расплава, $\Delta\rho = (\rho - \rho_0)$ – разность плотностей карбида и расплава, L – высота слитка. Подставляя (5) и (6) в выражение (7), получаем

$$\omega^{-1} = \frac{d^2 R_k^2 |\Delta\rho| a}{\chi L \nu \rho_0}. \quad (8)$$

В работе [5] показано, что при $\omega^{-1} \geq 2$ градиент концентрации упрочняющих частиц достигает максимального значения для данных условий и может быть вычислен по формуле (3), при $\omega^{-1} \leq 0,8$ разделение фаз еще не началось и распределение их можно считать равномерным. Таким образом, распределением частиц карбидной фазы по высоте слитка можно управлять, подбирая факторы внешнего воздействия (частоту вращения w , размеры слитка L , d) и состав реагентов (изменяя $\Delta\rho$, ρ_0 , ν и температуру горения T).

В связи с этим исследования по изучению влияния центробежной перегрузки на распределение тугоплавких упрочняющих частиц в объеме расплава, разработке составов исходной шихты, получение изделий из материалов с высокой износостойкостью и неоднородным распределением упрочняющих частиц представляют научный и практический интерес.

Материалы и методика эксперимента. В экспериментах использовали химически чистые полидисперсные порошки оксидов Cr_2O_3 , TiO_2 , NiO с размером частиц менее 10 мкм и Fe_2O_3 с размером частиц 20–50 мкм. Алюминий вводили в систему в виде порошка или пудры. В большинстве опытов использовали полидисперсный порошок алюминия с размером частиц менее 10 мкм. В качестве углерода применяли графит с размером частиц от 40 до 600 мкм. Исследование микроструктуры материалов проводили с использованием оптического микроскопа МИКРО-200. Фазовый состав образцов исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3. Количественное содержание фаз определяли по относительным интенсивностям их характеристических линий. Чувствительность метода снижается для фаз малых размеров, содержащих легкие элементы (С, N, В) [6].

Морфологию поверхности образцов изучали на растровом электронном микроскопе высокого разрешения Miра (производитель – Tescan, Чехия). Элементный состав определяли на растровом электронном микроскопе CamScan 4 с энергодисперсионным микрорентгеноспектральным анализатором (МРСА) INCA 350 (производитель – Oxford Instruments, Великобритания). Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,2 кг.

Синтез проводили на воздухе в лабораторной установке центробежного литья (рис. 1) (Устройство для центробежного литья изделий и наплавки покрытий: полезная модель 2889 Республика Беларусь: МПК В 22D 13/00, 19/00 / В.В. Клубович, М.М. Кулак, В.Г. Самолетов; дата публ.: 30.06.2006). Инициирование процесса горения осуществляли при достижении стационарной скорости вращения центрифуги, путем подачи через скользящие контакты напряжения на поджигающую спираль из нихрома. Отверстие в дне реактора, который представляет собой графитовый стакан, закрывали железной пластинкой-диафрагмой толщиной 0,2–0,3 мм.

В подвесной стакан устанавливали последовательно литейную форму и реактор. Стакан подвешивали на поворотный рычаг и на нем закрепляли панель поджига, клеммы которой соединены проводами с трансформатором через скользящие контакты. Центрифугу приводили во вращение электродвигателем. Когда частота вращения центрифуги достигала заданного значения, на поджигающую спираль подавали питающее напряжение. Химическая реакция в шихте приводила к появлению расплавленных фаз – оксидной и металлической. Процесс горения, распространяясь по объему шихты, достигал дна реактора, диафрагма проплавлялась, и расплав перетекал в литейную форму. После завершения процесса кристаллизации расплава центрифугу останавливали, и отлитую деталь извлекали из литейной формы. Для получения наплавленных покрытий расплав выливали на стальную подложку. Синтез проводили на воздухе с применением центробежной перегрузки $n = 400$.

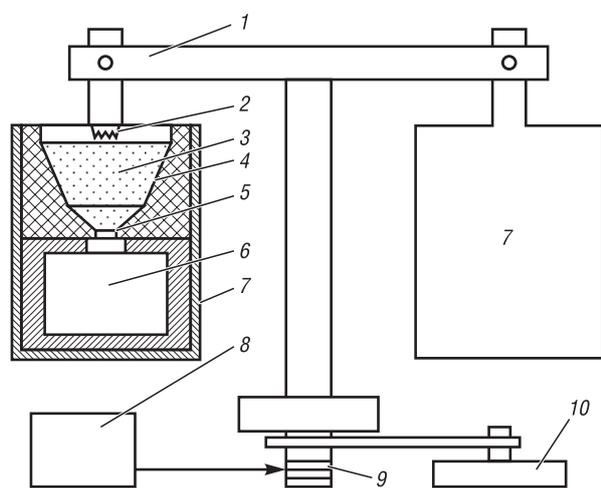


Рис. 1. Лабораторный комплекс центробежного литья: 1 – поворотный рычаг центрифуги, 2 – поджигающая спираль, 3 – шихта, 4 – реактор, 5 – пластина-диафрагма, 6 – литейная форма, 7 – подвесные стаканы, 8 – панель управления, 9 – скользящие контакты, 10 – электродвигатель

Fig. 1. Laboratory complex for centrifugal casting: 1 – rotary lever of the centrifuge, 2 – an igniting spiral, 3 – charge, 4 – reactor, 5 – membrane plate, 6 – mold, 7 – hanging cartriges, 8 – control panel, 9 – sliding contacts, 10 – electric motor

Когда частота вращения центрифуги достигала заданного значения, на поджигающую спираль подавали питающее напряжение. Химическая реакция в шихте приводила к появлению расплавленных фаз – оксидной и металлической. Процесс горения, распространяясь по объему шихты, достигал дна реактора, диафрагма проплавлялась, и расплав перетекал в литейную форму. После завершения процесса кристаллизации расплава центрифугу останавливали, и отлитую деталь извлекали из литейной формы. Для получения наплавленных покрытий расплав выливали на стальную подложку. Синтез проводили на воздухе с применением центробежной перегрузки $n = 400$.

Для металлографических исследований образцы распиливали по плоскости, параллельной оси цилиндра и проходящей через его центр. Синтезированные образцы испытывали на износостойкость в двух вариантах на лабораторной установке торцевого шлифования по

методике [7]. В первом варианте стойкость исследуемого образца сравнивали со стойкостью эталонного образца. Установка позволяла изменять величину нагрузки и измерять путь трения, пройденный образцом. При сравнительных испытаниях образца на износ использовали шлифовальные шкурки зернистостью 100 и 500 мкм соответственно. Нагрузка составляла $6,6 \cdot 10^4$ Па, образец совершал около 100 циклов возвратно-поступательного движения в минуту, при этом за один цикл образец проходил путь 28 см. После прохождения одинакового числа циклов исследуемый образец и эталонный взвешивали.

В качестве объекта исследования были выбраны сплавы на основе железа с содержанием углерода более 1 %, хрома более 12 % и никеля более 4 %; такое содержание легирующих элементов обеспечивает получение при комнатной температуре аустенитной матрицы, которая под действием пластической деформации способна упрочняться за счет наклепа или мартенситного превращения. В табл. 1 приведены составы и геометрические размеры синтезированных образцов.

Результаты и их обсуждение. Первоначально была исследована на оптическом микроскопе микроструктура образца исходного состава №3 в литом состоянии, после закалки и изотермического отжига при 973 К (для выявления карбидов). В исследованных образцах в литом состоянии (рис. 2) обнаружена как низкотемпературная фаза α -Fe, так и высокотемпературная фаза γ -Fe, причем α -фаза присутствует в виде перлита.

Методом гомологических пар [8] установили, что содержание аустенита (γ -фазы) в образцах в литом состоянии равно 68 %, в закаленном состоянии имеется только γ -фаза, а после отпуска – α -фаза и слабо заметные линии карбида хрома. На рис. 3 показана часть спектра от 54° до $56,4^\circ$ в увеличенном масштабе по вертикали.

Линий карбида титана обнаружить не удалось даже при съемке по точкам с большой экспозицией, что можно объяснить малым размером кристаллитов.

На микрофотографиях поверхности сечения образца после полировки (рис. 4) видны зернистые образования с металлическим блеском размером менее 5 мкм, выступающие над полированной поверхностью. Предположительно, это кристаллиты твердых карбидов, которые при абразивной обработке подверглись меньшему износу, чем матрица, что подтверждается анализом поверхности в отраженных электронах.

Анализ изображений группы более темных зерен в отраженных электронах (рис. 5) и тех же зерен в характеристическом излучении $TiK\alpha$ (светлые участки) показал, что в области этих зерен концентрация титана значительно выше, чем в матрице сплава, то есть это кристаллиты карбида титана TiC.

Влияние центробежной силы на распределение упрочняющих твердых фаз в матрице композиционного материала. В синтезированных образцах определяли концентрации следующих элементов методом МРСА: Al, Ti, Cr, Fe, Ni, W. Несмотря на то что бор и углерод могут регистрироваться анализатором, их концентрации не определяли, так как эти данные имеют большую ошибку из-за сложностей анализа легких элементов. По этой причине по концентрациям титана и вольфрама судили о концентрациях их карбидов и боридов, так как они являются сильными карбидо- и боридообразующими элементами. Анализ концентрационных кривых распределения элементов показал, что определение химического состава сплава в случайно выбранных точках дает большой разброс концентраций, что свидетельствует о присутствии в сплаве частиц с высокой концентрацией титана – до 80 %, как в карбиде титана.

Т а б л и ц а 1. Состав и размеры исследованных образцов

Table 1. The composition and size of the investigated samples

№ образца	Состав легирующих элементов, мас.% (ост. Fe)				Размер, мм			
	C	Cr	Ni	Ti	D	d	h_1	h_2
1	5	12	5	8	14	–	40	–
2	5	12	5	8	28	–	9	7
3	3	18	10	3	28	–	9	–
4	3	12	5	5(TiB ₂)	28	–	8	–
5	3	18	10	3,5(TiC)	30	9	8	–

Примечание: D – наружный диаметр, d – внутренний диаметр (при литье кольцевых изделий), h_1 – толщина слитка или наплавки, h_2 – толщина подложки. В качестве металла восстановителя использовали алюминий.

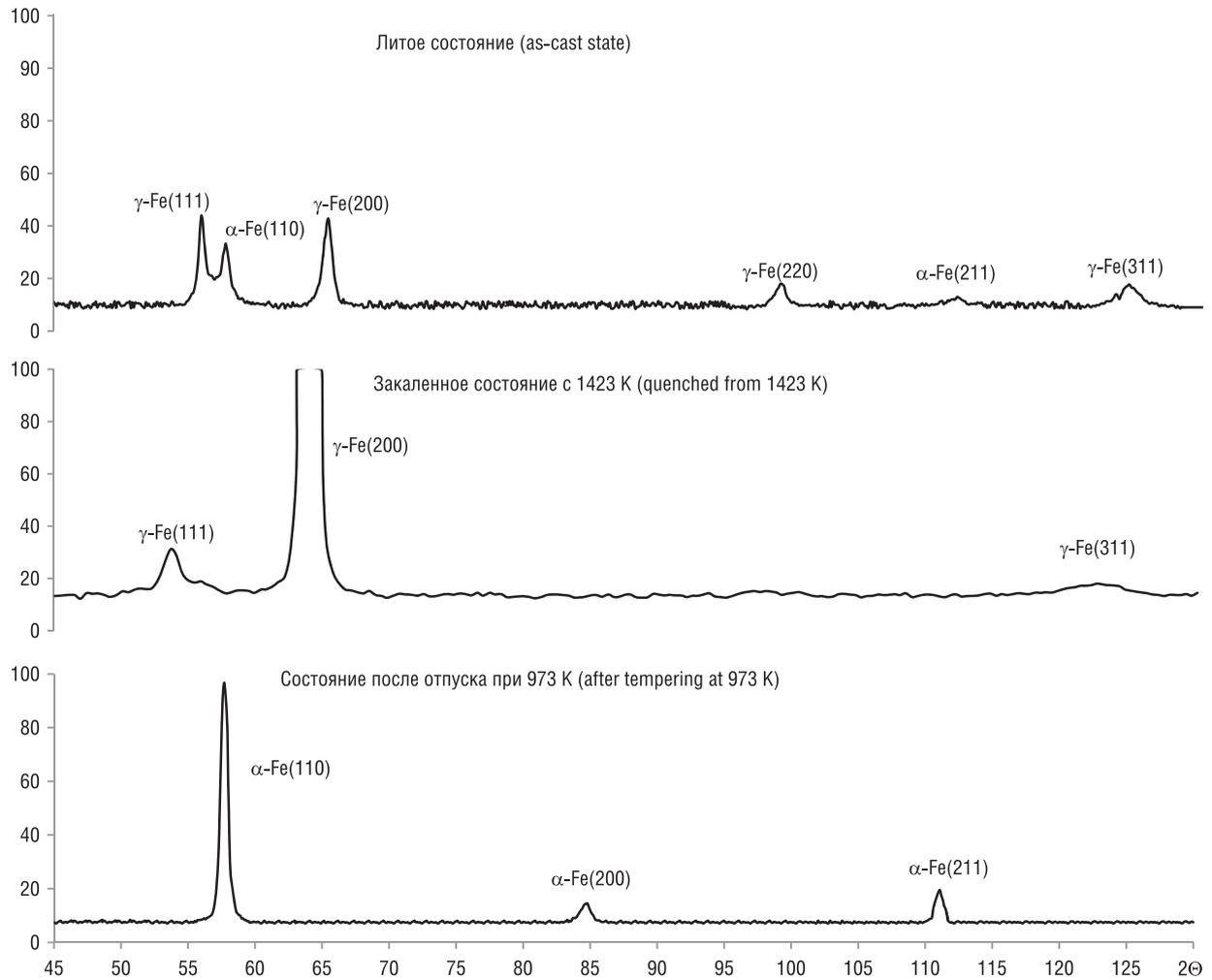


Рис. 2. Рентгенограммы образца №3 в литом состоянии и после термообработки
 Fig. 2. X-ray diffraction patterns of sample No. 3 in the as-cast state and after heat treatment

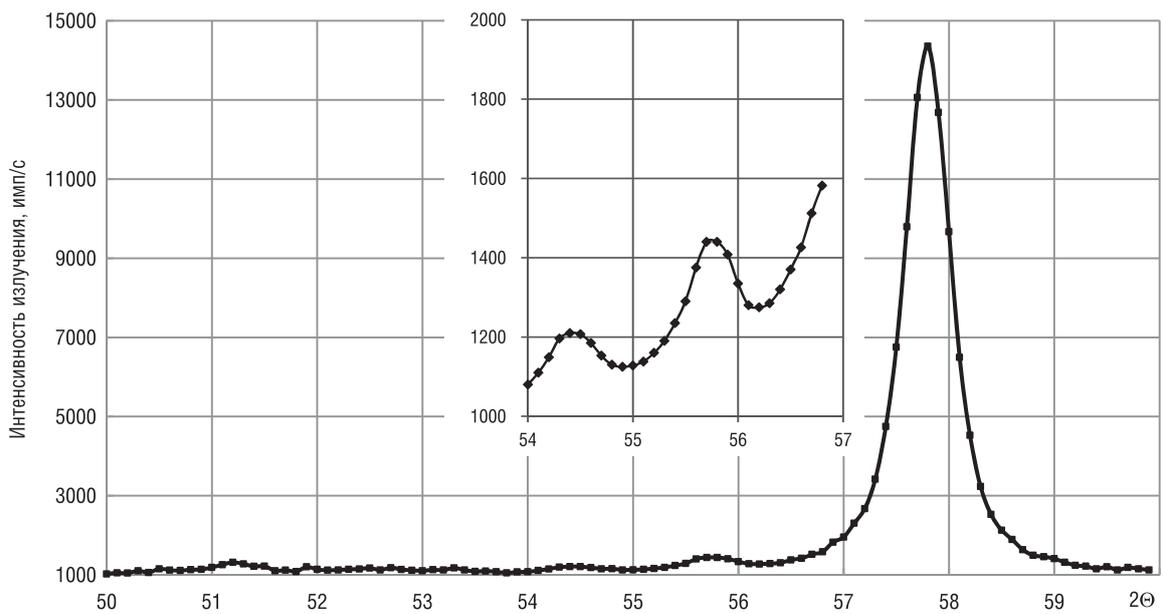


Рис. 3. Фрагмент рентгенограммы образца №3 в состоянии после отпуска
 Fig. 3. Fragment of X-ray diffraction pattern for sample No. 3 in a state after tempering

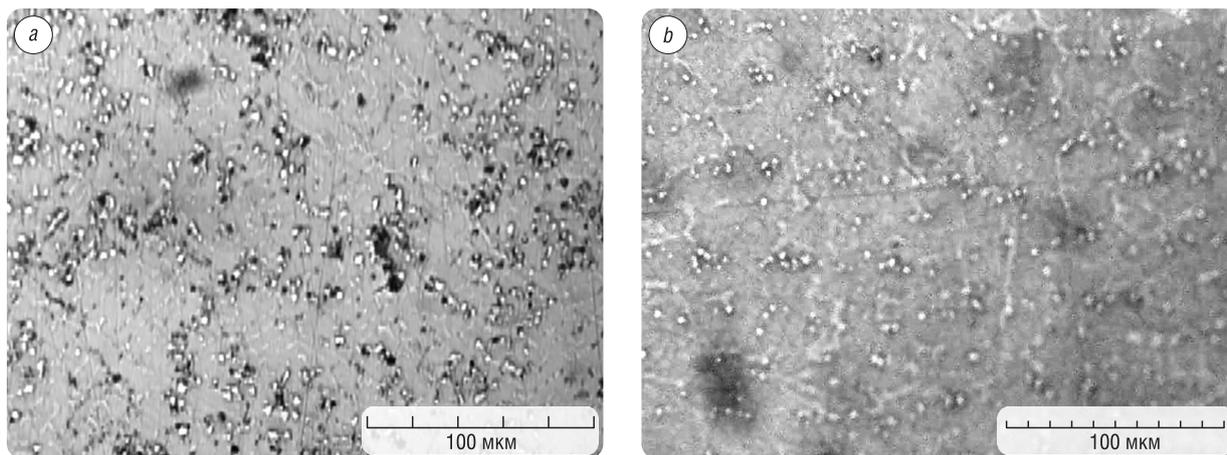


Рис. 4. Микроструктура образца №3 в литом состоянии после полировки: *a* – 2 мм от поверхности слитка, *b* – 5 мм от поверхности слитка

Fig. 4. The microstructure of sample No. 3 in the as-cast state after polishing: *a* – 2 mm from the surface of the ingot, *b* – 5 mm from the surface of the ingot

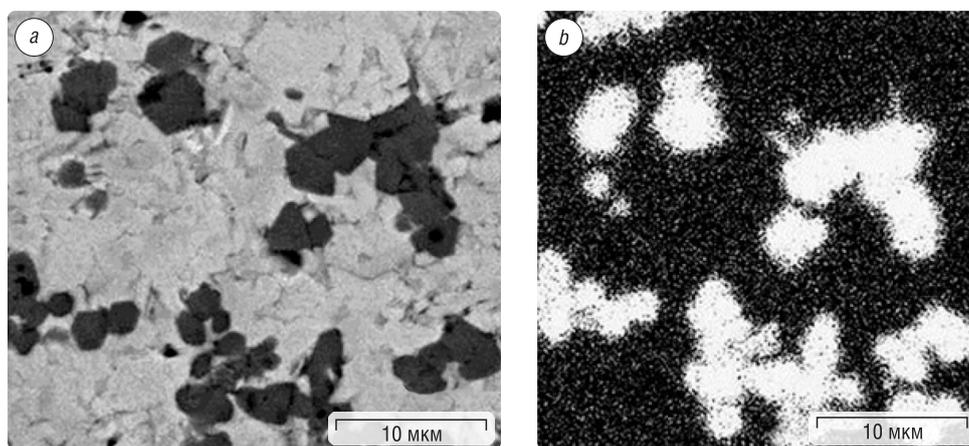


Рис. 5. Распределение частиц карбида титана в матрице сплава: *a* – электронное изображение, *b* – изображение в характеристическом излучении $TiK\alpha$

Fig. 5. Distribution of titanium carbide particles in the alloy matrix: *a* – image in reflected electrons, *b* – image in characteristic $TiK\alpha$ radiation

Это не позволяет судить об усредненном распределении элементов в более крупных зонах: верх, середина и дно слитка. Причину такого разброса можно объяснить и неоднородностью фазового состава сплава, и влиянием топографии поверхности образца. Поэтому при повторном исследовании анализировали состав сплава при сканировании участков поверхности образца размером около 300×300 мкм, с усреднением по участку. Усредненные кривые по указанным участкам имеют более плавный характер и отражают распределение средней концентрации элементов по высоте образца.

На рис. 6 показано распределение элементов по высоте синтезированного образца №2 (наплавка). На рисунке по вертикали отложена концентрация элементов в весовых процентах (C), а по горизонтали – глубина залегания соответствующего микрообъема слитка (L). Все легирующие элементы, кроме титана, распределены приблизительно равномерно (рис. 5). Концентрация титана (карбида титана) в области от 1 до 5 мм в 10–15 раз выше, чем в области от 6 до 9 мм. В то же время концентрация железа минимальна там, где концентрация титана максимальна, и наоборот. То есть на поверхности происходит замещение тяжелой фазы (железа) на легкую (карбид титана). Глубже 10 мм состав соответствовал исходной подложке из стали ВСт3, то есть практически чистому железу.

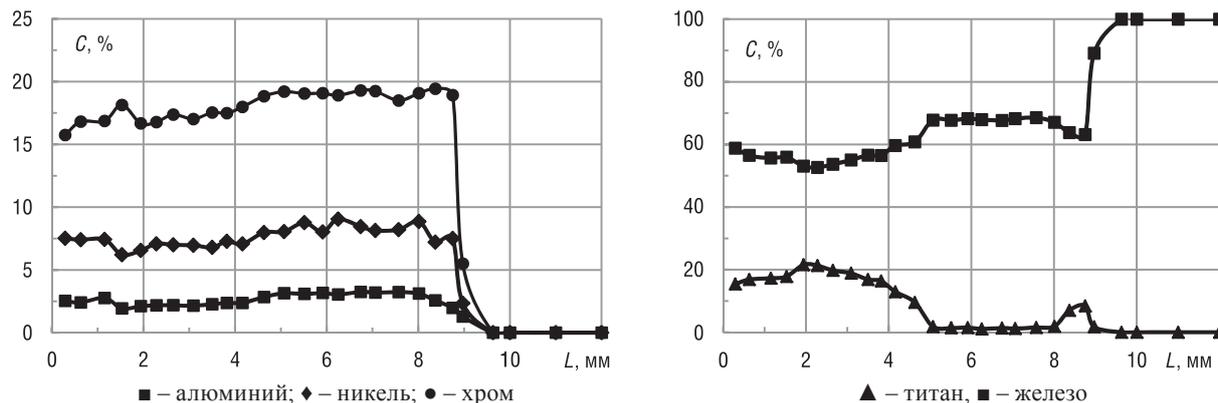


Рис. 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поперечного сечения образца с наплавленным слоем состава 18 % Cr–10 % Ni–10 % Ti–5 % C–Fe (остальное) (образец № 2) на стали ВСт3

Fig. 6. The results of electron probe microanalysis (EPMA) of the cross section of a sample with a layer of composition 18 % Cr–10 % Ni–10 % Ti–5 % C–Fe (balance) (sample No. 2) deposited on steel VSt3

С целью формирования градиента распределения керамических частиц (оксид алюминия) в системе оксид алюминия – сплав железо-хром-никель-углерод варьировали параметры СВС-процесса (массу исходной шихты, размер литейной формы, толщину металлической основы), изменяя тем самым «время жизни» расплавленного продукта. Это позволило получить материал с прочной металлической матрицей и еще более прочными упрочняющими дисперсными частицами оксидов.

Методом МРСА получено распределение железа, никеля, алюминия и титана по высоте слитка (рис. 7) (образец № 1). О концентрации оксидной фазы судили по сигналу от атомов Al. В поверхностной зоне глубиной 10 мм концентрация Al_2O_3 изменяется от 80 до 4–5 %. Разработанная методика позволяет синтезировать градиентные материалы с различными составами матрицы и упрочняющих частиц.

Исследование механических свойств и износостойкости материалов. Результаты исследования микротвердости образца № 2 (см. табл. 1), представляющего собой наплавку покрытия системы Fe–Cr–Ni–Ti–C на подложку из стали Ст3, показаны на рис. 8. По размерам отпечатков видно, что твердость наплавленного слоя в 2–3 раза выше твердости основы.

Образцы испытывали на износостойкость в двух вариантах на лабораторной установке торцевого шлифования. В первом варианте стойкость исследуемого образца сравнивали со стой-

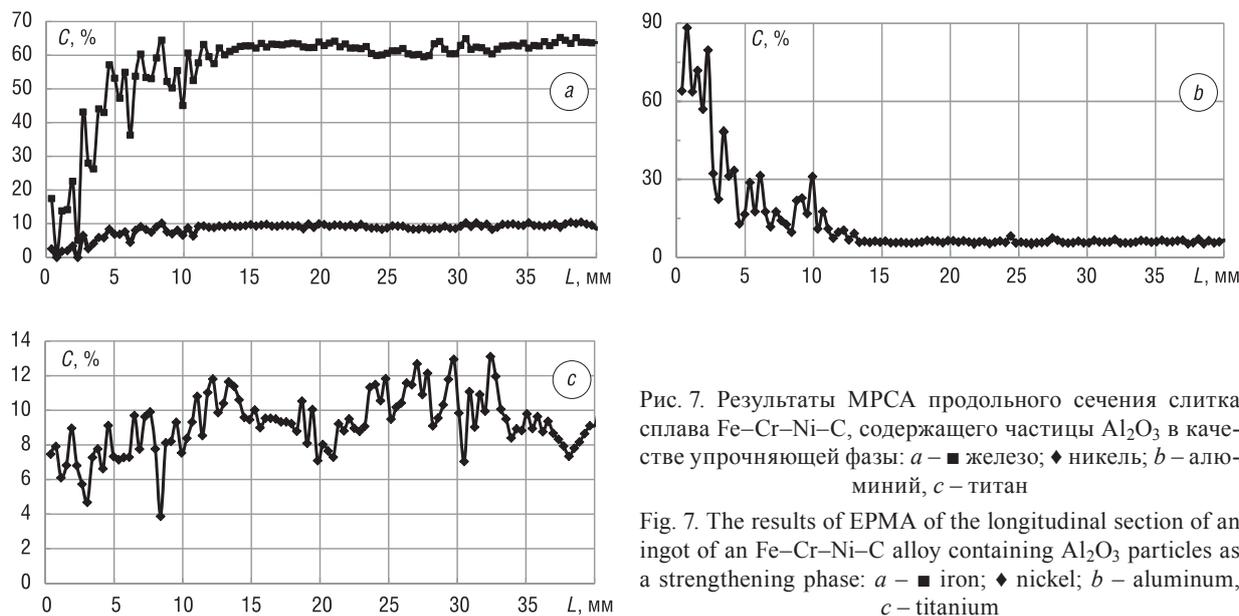


Рис. 7. Результаты МРСА продольного сечения слитка сплава Fe–Cr–Ni–C, содержащего частицы Al_2O_3 в качестве упрочняющей фазы: *a* – железо; *b* – алюминий, *c* – титан

Fig. 7. The results of EPMA of the longitudinal section of an ingot of an Fe–Cr–Ni–C alloy containing Al_2O_3 particles as a strengthening phase: *a* – iron; *b* – aluminum, *c* – titanium

костью эталонного образца. Установка позволяла изменять величину нагрузки и измерять путь трения, пройденный образцом.

В случае сравнительного испытания образца состава [(Fe–12Cr–5Ni)–(Ti–C)] на износ использовали шлифовальные шкурки марок 14A10HC234 и 14A50HM1223 зернистостью 100 и 500 мкм соответственно. По результатам испытаний рассчитывали относительный коэффициент износостойкости по формуле [7]

$$K = \frac{\rho_{\text{обр}} \cdot \Delta m_{\text{эт}}}{\rho_{\text{эт}} \cdot \Delta m_{\text{обр}}}$$

где $\rho_{\text{обр}}$ и $\rho_{\text{эт}}$ – плотности образца и эталона, $\Delta m_{\text{обр}}$ и $\Delta m_{\text{эт}}$ потери массы образца и эталона. В качестве эталона использовали образец из стали Р6М5, термообработанный по стандартному режиму на твердость 64–65 HRC.

Результаты испытаний (табл. 2) свидетельствуют о том, что изделия из синтезированного материала при соответствующей термообработке вполне конкурентноспособны с быстрорежущими сталями.

При втором варианте испытаний образец №2 с градиентом концентрации частиц карбида титана разрезали на пластинки перпендикулярно направлению градиента и испытывали их на износ на шкурке с зерном 500 мкм. После каждых 70 м пути трения пластинки взвешивали. По результатам испытания видно, что разные участки одного и того же образца имеют разную износостойкость (рис. 9).

Методом СВС-литья были изготовлены заготовки для измерительных калибров типа «пробка», которые успешно прошли производственные испытания на ОАО «ВИЗАС». Испытания инструмента показали, что твердость образцов находится в интервале 63–68 HRC, а количество измерений (проход-непроход) на 1 мкм радиального износа на диаметре 15 мм составило 2500–2700 раз. Таким образом, использование разработанного метода позволило существенно (в 1,5–2 раза) повысить срок службы измерительного инструмента.

Заклучение. Разработана и реализована технология получения материалов и конечных изделий с градиентным распределением упрочняющих частиц по объему образца методом СВС-литья в поле массовых сил. Синтезированный материал обладает уникальными свойствами, которые обусловлены его структурой: высокой износостойкостью, прочностью и вязкостью. В синтезированном материале реализован принцип Шарпи: в относительно мягкой основе распределены твердые дисперсные частицы карбидов, что обеспечивает высокую износостойкость.

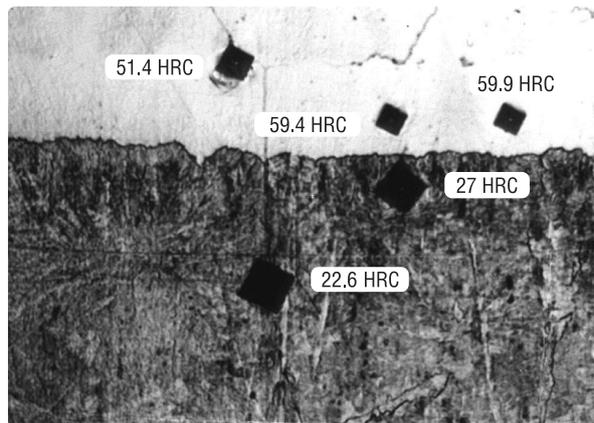


Рис. 8. Фрагмент поперечного сечения границы наплавленного покрытия с подложкой для образца №2

Fig. 8. A fragment of the cross-section of the deposited coating/substrate interface for sample No. 2

Таблица 2. Относительная износостойкость образца при испытании на абразивный износ
Table 2. Relative wear resistance of the sample when tested for abrasive wear

Зерно абразива, мкм	Литое состояние	Закалка	Закалка + отпуск
100	0,89	0,87	1,17
500	0,60	0,32	0,87

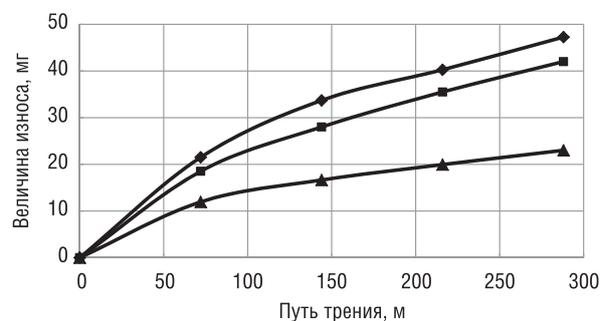


Рис. 9. Величина износа (в миллиграммах) образцов с различной концентрацией частиц карбида титана (различное расстояние от поверхности (мм): образец 1 ♦ – 1,82 % (4 мм), образец 2 ■ – 9,57 % (2 мм), образец 3 ▲ – 16,4 % (0 мм))

Fig. 9. The weight loss in wear (in milligrams) of samples with different concentrations of titanium carbide particles vs. the distance from the surface (mm): Sample 1 ♦ – 1.82 % (4 mm), Sample 2 ■ – 9.57 % (2 mm), Sample 3 ▲ – 16.4 % (0 mm)

Установлено, что в системе TiC–матрица из железо-хром-никель-углеродного сплава концентрация кристаллитов карбида титана в приповерхностной области синтезированного слитка (1–5 мм от поверхности) в 10–15 раз превышает его концентрацию в придонной области слитка, а в системе Al₂O₃–матрица из того же сплава концентрация частиц Al₂O₃ снижается с 80 мас.% в приповерхностном слое до 4–5 мас.% на глубине 10 мм.

Список использованных источников

1. Концепция развития самораспространяющегося высокотемпературного синтеза как области научно-технического прогресса. – Черногловка: Территория, 2003. – 368 с.
2. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: учеб. пособие / Е. А. Левашов [и др.]. – М.: Изд. дом МИСиС, 2011. – 377 с.
3. Каратасков, С. А. Закономерности и механизм горения плавящихся гетерогенных систем в поле массовых сил / С. А. Каратасков, В. И. Юхвид, А. Г. Мержанов // Физика горения и взрыва. – 1985. – №6. – С. 41–43.
4. Formation of composition macro- and microstructures of SHS cast composite materials based on carbides with an intermetallic binder / V. A. Gorshkov [et al.] // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. – 2004. – Vol. 13, №1. – P. 23–30.
5. Merzhanov, A. G. Fluid dynamics phenomena in processes of self-propagating high-temperature synthesis / A. G. Merzhanov // Combust. Sci. Technol. – 1995. – Vol. 105, №4–6. – P. 295–325. <https://doi.org/10.1080/00102209508907756>
6. Миркин, Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов: справочник / Л. И. Миркин. – М.: Машиностроение, 1979. – 134 с.
7. Комаров, О. С. Особенности механизма изнашивания высокохромистого чугуна / О. С. Комаров, О. А. Сусина, В. М. Садовский // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2000. – №1. – С. 19–22.

References

1. *The Concept of Development of Self-Propagating High-Temperature Synthesis as a Field of Scientific and Technological Progress*. Chernogolovka, Territoria Publ., 2003. 368 p. (in Russian).
2. Levashov E. A., Rogachev A. S., Kurbatkina V. V., Maksimov Yu. M., Yuhvid V. I. *Promising Materials and Technologies for Self-Propagating High-Temperature Synthesis: A textbook*. Moscow, MISiS Publ. House, 2011. 377 p. (in Russian).
3. Karataskov S. A., Yuhvid V. I., Merzhanov A. G. Regularities and mechanism of combustion of melting heterogeneous systems in a mass force field. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1985, vol. 21, no. 6, pp. 687–689. <https://doi.org/10.1007/BF01463672>.
4. Gorshkov V. A., Yuhvid V. I., Sachkova N. V., Ignatieva T. I. Formation of composition macro- and microstructures of SHS cast composite materials based on carbides with an intermetallic binder. *International Journal of Self-Propagating High Temperature Synthesis*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 23–30.
5. Merzhanov A. G. Fluid dynamics phenomena in processes of self-propagating high temperature synthesis. *Combustion Science and Technology*, 1995, vol. 105, no. 4–6, pp. 295–325. <https://doi.org/10.1080/00102209508907756>
6. Mirkin L. I. *X-Ray Control of Engineering Materials: A reference book*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 134 p. (in Russian).
7. Komarov O. S., Susina O. A., Sadovskii V. M. Features of the wear mechanism of high-chromium cast iron. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2000, no. 1, pp. 19–22 (in Russian).

Информация об авторах

Клубович Владимир Владимирович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией пластичности, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v_klubovich@tut.by

Кулак Михаил Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики металлов, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Генерала Лядникова, 13, Витебск, 210009, Республика Беларусь). E-mail: mmk_vit@tut.by

Information about the authors

Vladimir V. Klubovich – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory of Plasticity, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., Minsk 220013, Republic of Belarus); Chief Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., Minsk 220141, Republic of Belarus). E-mail: v_klubovich@tut.by

Mikhail M. Kulak – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Metal Physics, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Ludnikov Ave., Vitebsk 210009, Republic of Belarus). E-mail: mmk_vit@tut.by

Самолетов Владимир Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики металлов, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Генерала Людникова, 13, Витебск, 210009, Республика Беларусь). E-mail: vladpilot53@tut.by

Хина Борис Борисович – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь); профессор, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220096, Минск, Республика Беларусь). E-mail: khina@tut.by

Vladimir G. Samolyotov – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Metal Physics, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Ludnikov Ave., Vitebsk 210009, Republic of Belarus). E-mail: vladpilot53@tut.by

Boris B. Khina – D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Chief Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus); Professor, Belarusian State Aviation Academy (77, Ubovich Str., 220096, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khina@tut.by

В. С. Урбанович, Т. Д. Маликина, Е. О. Лавыш, Е. Н. Шлома, С. М. Карась

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН НА ИХ ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ПАЙКУ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ

Аннотация. Изучено влияние электроэрозионной обработки поверхности твердосплавных пластин на их фазовый состав и вакуумную пайку режущих элементов из сверхтвердой нитридной керамики. Проведены исследования качества поверхности и элементного состава твердосплавных пластин для пайки режущих элементов из сверхтвердых материалов. Поверхность пластин для напайки обработана методом электроэрозионной резки латунной проволокой в воде, а также методом электроэрозионного прямого прожога с использованием медного и графитового электродов в керосине. Микроструктура и элементный состав поверхностей твердосплавных пластин были исследованы методами электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии до и после их обработки. Анализ полученных данных свидетельствует, что наилучшие результаты при электроэрозионной обработке твердосплавной пластины и наиболее прочное сцепление спаиваемых материалов достигаются при использовании медного электрода и латунной проволоки, так как при этом обеспечиваются максимальное смачивание поверхности пластины припоем на основе Cu–Ti–Sn и отсутствие пор. Соединение твердосплавной резцовой пластины и керамического режущего элемента производилось методом высокотемпературной пайки в вакууме. Испытания пластин с напайными режущими элементами показали, что шероховатость обработанной поверхности заготовок из стали ХВГ с твердостью HRC 47–62 и из стали ШХ15 с твердостью HRC 57–58 соответствовала 6–8-му классам чистоты при скорости резания 155–170 м/мин. Критерием для оценки режущих свойств сверхтвердых материалов по результатам стойкостных испытаний служил износ резца по задней грани 0,4 мм.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, вакуумная пайка, сверхтвердая нитридная керамика, твердосплавные пластины, лезвийный инструмент

Для цитирования: Влияние электроэрозионной обработки поверхности твердосплавных пластин на их фазовый состав и пайку режущих элементов из нитридной керамики / В. С. Урбанович [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 286–295. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-286-295>

V. S. Urbanovich, T. D. Malikina, E. O. Lavysh, E. N. Shloma, S. M. Karas

Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

THE EFFECT OF ELECTRO-EROSION TREATMENT OF THE SURFACE OF HARD ALLOY PLATES ON THEIR PHASE COMPOSITION AND SOLDERING OF NITRIDE CERAMICS CUTTING ELEMENTS

Abstract. The effect of electroerosive treatment of the surface of carbide plates from superhard nitride ceramics on their phase composition and vacuum soldering of cutting elements is studied. Studies of the surface quality and elemental composition have been carried out. The surface of the plates for soldering is processed by the method of electroerosive cutting with brass wire in water, as well as by the method of electroerosive direct burn-through using copper and graphite electrodes in kerosene. The microstructure and elemental composition of the surfaces of hard-alloy plates were investigated by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy before and after their processing. The analysis of the obtained data indicates that the best results at electro-erosion treatment of the hard-alloyed plate and the strongest bonding of brazed materials are achieved using a copper electrode and brass wire, since this ensures maximum wetting of the plate surface with solder based on Cu–Ti–Sn and the absence of pores. The hard-alloy cutter plate and ceramic cutting element were joined by high-temperature brazing in vacuum. Tests of hard-alloy plates with brazed cutting elements showed that the roughness of the machined surface of workpieces made of ХВГ steel with hardness of HRC 47–62 and ШХ15 steel with hardness of HRC 57–58 corresponded to 6–8 purity class at cutting speed of 155–170 m/min. The wear of the cutter along the trailing edge of 0.4 mm served as a criterion for evaluation of the cutting properties of superhard materials according to the results of durability tests.

Keywords: electro-erosion treatment, vacuum soldering, superhard nitride ceramics, hard-alloyed plates, blade tool

For citation: Urbanovich V. S., Malikina T. D., Lavysh E. O., Shloma E. N., Karas S. M. The effect of electro-erosion treatment of the surface of hard alloy plates on their phase composition and soldering of nitride ceramics cutting elements. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 286–295 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-286-295>

Введение. В настоящее время существуют различные способы и технологии крепления режущих элементов из сверхтвердых материалов (СТМ) при изготовлении металлообрабатывающего инструмента, которые в значительной степени влияют на его эксплуатационные показатели. Основными методами являются: механическое крепление режущего элемента из СТМ в резцедержателе; крепление путем паяного соединения; комбинированное соединение в виде механического крепления твердосплавной сменной вставки с паяным режущим элементом из СТМ. Однако большая часть перечисленных методов крепления сверхтвердых материалов в лезвийном инструменте является трудоемкой, малопродуктивной и не обеспечивает надежности при эксплуатации [1].

Метод крепления режущего элемента из СТМ вакуумной пайкой на твердосплавную пластину используют ведущие зарубежные производители лезвийного инструмента, такие как Mitsubishi, Seco, Pramet, Korloy, Mikrobor, ZCC-Cutting Tools Europe GmbH [2–7]. Твердосплавная пластина с напайными режущими элементами из СТМ механически крепится в держателе, при этом обеспечивается жесткость соединения режущего элемента из СТМ с твердосплавной пластиной. Надежность соединения обеспечивается за счет равномерного нагрева и охлаждения при пайке, контроля температуры, отсутствия окислительных процессов, а также сохранения физико-механических свойств СТМ.

Одной из важных задач при изготовлении такого инструмента является подготовка поверхности твердосплавной пластины для пайки СТМ, которая во многом определяет надежность крепления такого материала. В литературе этот вопрос слабо освещен.

Методы исследования. В данной работе изучено влияние электроэрозионной обработки твердосплавных пластин на элементный состав, качество их поверхности и вакуумную пайку режущих элементов из СТМ «Беланит» для обработки твердозакаленных сталей и чугунов. Получение и свойства СТМ описаны нами ранее в [8, 9]. Для вакуумной пайки режущих элементов из сверхтвердой нитридной керамики использовались пластины из твердого сплава типа ВК производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (Россия). Подготовка поверхности экспериментальных образцов твердосплавных пластин производилась методом электроэрозионного прямого прожога с использованием графитового и медного электродов в керосине, а также методом электроэрозионной резки латунной проволокой в воде.

Электроэрозионная обработка графитовым электродом производилась в Физико-техническом институте НАН Беларуси, а медным электродом и латунной проволокой – на ОАО «Промсвязь». Микроструктура и элементный состав поверхностей твердосплавных пластин был изучен в НПЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» с помощью электронной микроскопии и рентгено-спектрального микрозондового анализа. Пайка режущих элементов из сверхтвердой нитридной керамики производилась медным припоем с легирующими добавками в высокотемпературной вакуумной электропечи (СНВЭ-1.3.1/16 И4) в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению.

Обработка графитовым электродом. Поверхность материала твердого сплава до и после обработки графитовым электродом показана на рис. 1. До обработки графитовым электродом твердосплавная пластина (состав шихты: $TiO_2 + WC +$ сажа) имеет практически ровную и однородную по цвету поверхность. Границы кластеров заметны слабо (рис. 1, *a*). После обработки поверхность оплавилась, границы кластеров обозначены резко (рис. 1, *b*), но не имеют определенной структуры и разнородны по цвету. Это свидетельствует о том, что во время прожога на поверхности образца протекают химические реакции и фазовые превращения.

Обработка медным электродом. Перед обработкой медным электродом твердосплавная пластина (в составе отсутствует титан) имеет шероховатую поверхность (рис. 2, *a*) с мелкозернистой структурой и невыразительными границами кластеров. После обработки медным электродом оплавленная поверхность пластины обладает четко выраженной кластерной структурой. Границы кластеров – черного цвета со множеством микропрожогов и микротрещин (рис. 2, *b*).

Гексагональная и почти прямоугольная форма кластеров указывает на то, что на поверхности образца образовались как минимум два фазовых состава гексагональной и кубической сингонии (кубической больше).

Резка проволокой. Структура поверхности обработанного экспериментального образца твердого сплава, полученного резкой латунной проволокой, однородная и крупнозернистая. На поверхности отсутствуют трещины и кластеры. Как показали данные рентгеноспектрального

микронного анализа, поверхность образца покрыта слоем латуни (сплав меди и цинка), который образовался вследствие эмиссии ионов Cu и Zn из раскаленной проволоки. Вид поверхности твердого сплава после резки латунной проволокой представлен на рис. 3.

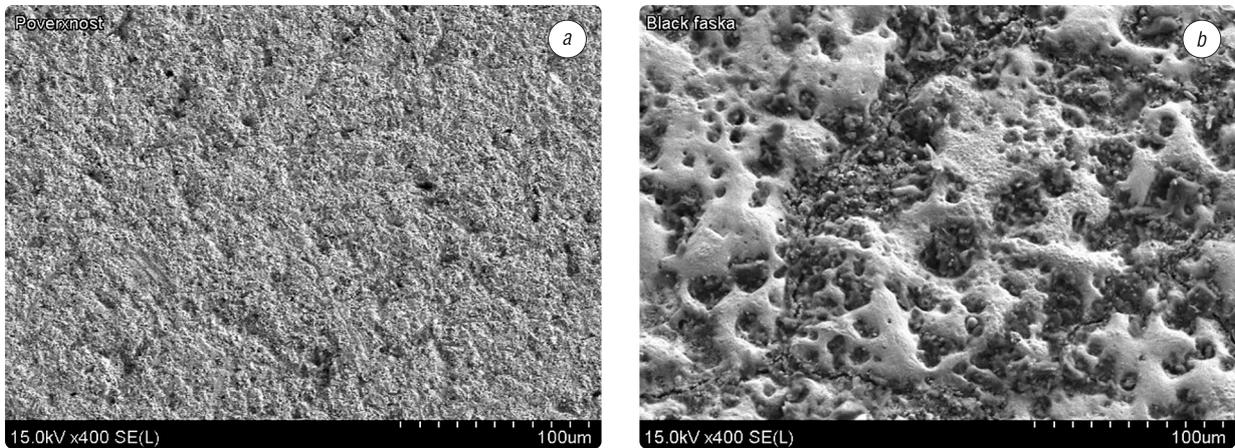


Рис. 1. Поверхность твердого сплава до (a) и после (b) обработки графитовым электродом, $\times 400$
Fig. 1. The surface of the hard alloy before (a) and after (b) treatment with a graphite electrode, $\times 400$

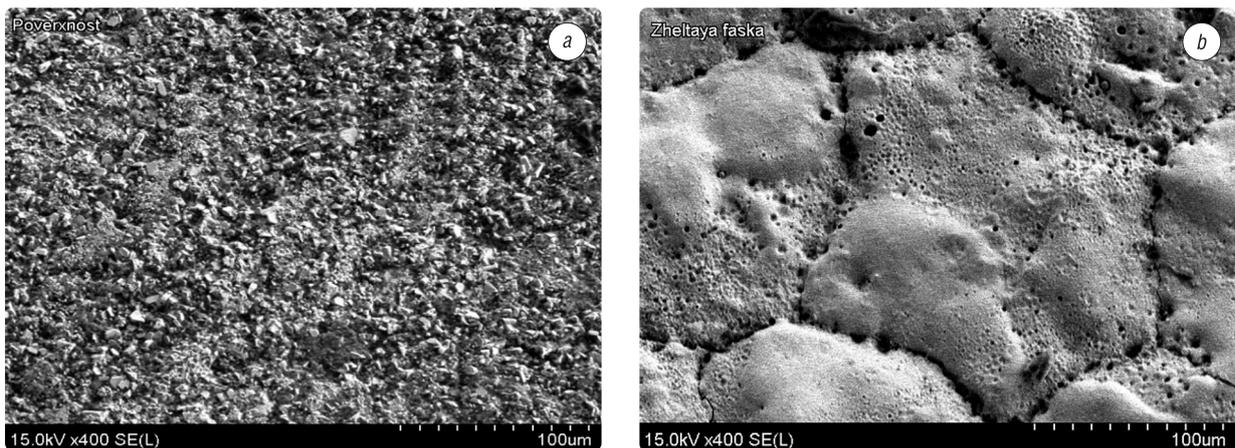


Рис. 2. Поверхность твердого сплава до (a) и после (b) обработки медным электродом, $\times 400$
Fig. 2. The surface of the hard alloy before (a) and after (b) treatment with a copper electrode, $\times 400$

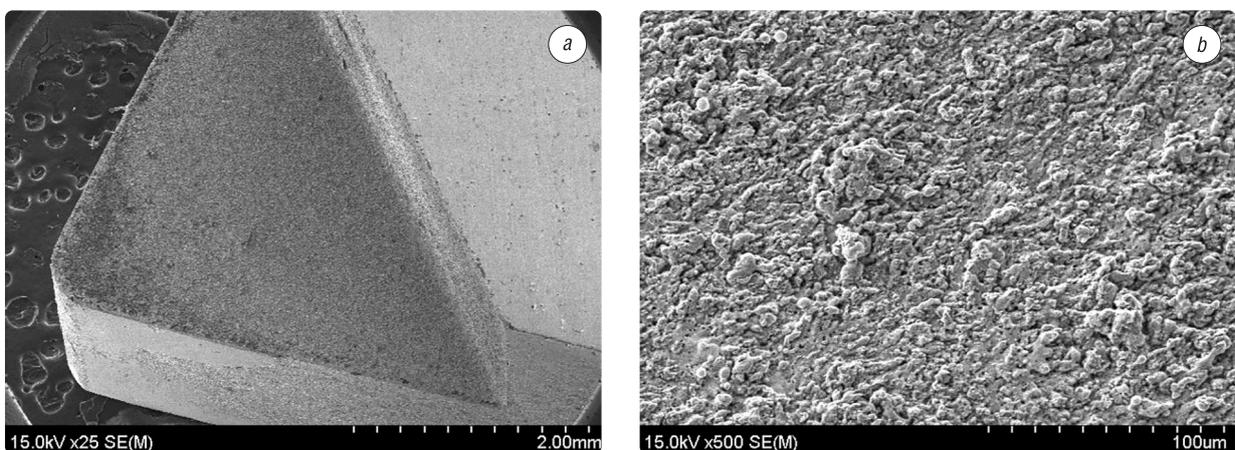


Рис. 3. Поверхность твердого сплава после электроэрозионной резки латунной проволокой при различном увеличении: $a - \times 25$, $b - \times 500$
Fig. 3. The surface of a hard alloy after electro-erosion cutting with brass wire at different magnifications: $a - \times 25$, $b - \times 500$

Результаты исследования. Рентгеноспектральный микрозондовый анализ дает возможность определить элементный состав исходного образца твердого сплава типа ВК и после его обработки несколькими методами, объяснить изменения структуры и состава поверхностей после обработки, а также позволяет сделать выводы о выборе метода электроэрозионной обработки.

На рис. 4–6 представлены диаграммы рентгеноспектрального микрозондового анализа и элементный состав поверхности твердосплавных пластин до и после электроэрозионной обработки.

На рис. 7 показано изменение соотношений концентрации элементов на поверхности твердосплавных пластин до и после обработки. В таблице приведены численные значения элементного состава поверхности до и после электроэрозионной обработки.

После обработки поверхности твердого сплава графитовым электродом наблюдается перераспределение элементного состава. Увеличение концентрации углерода обусловлено его

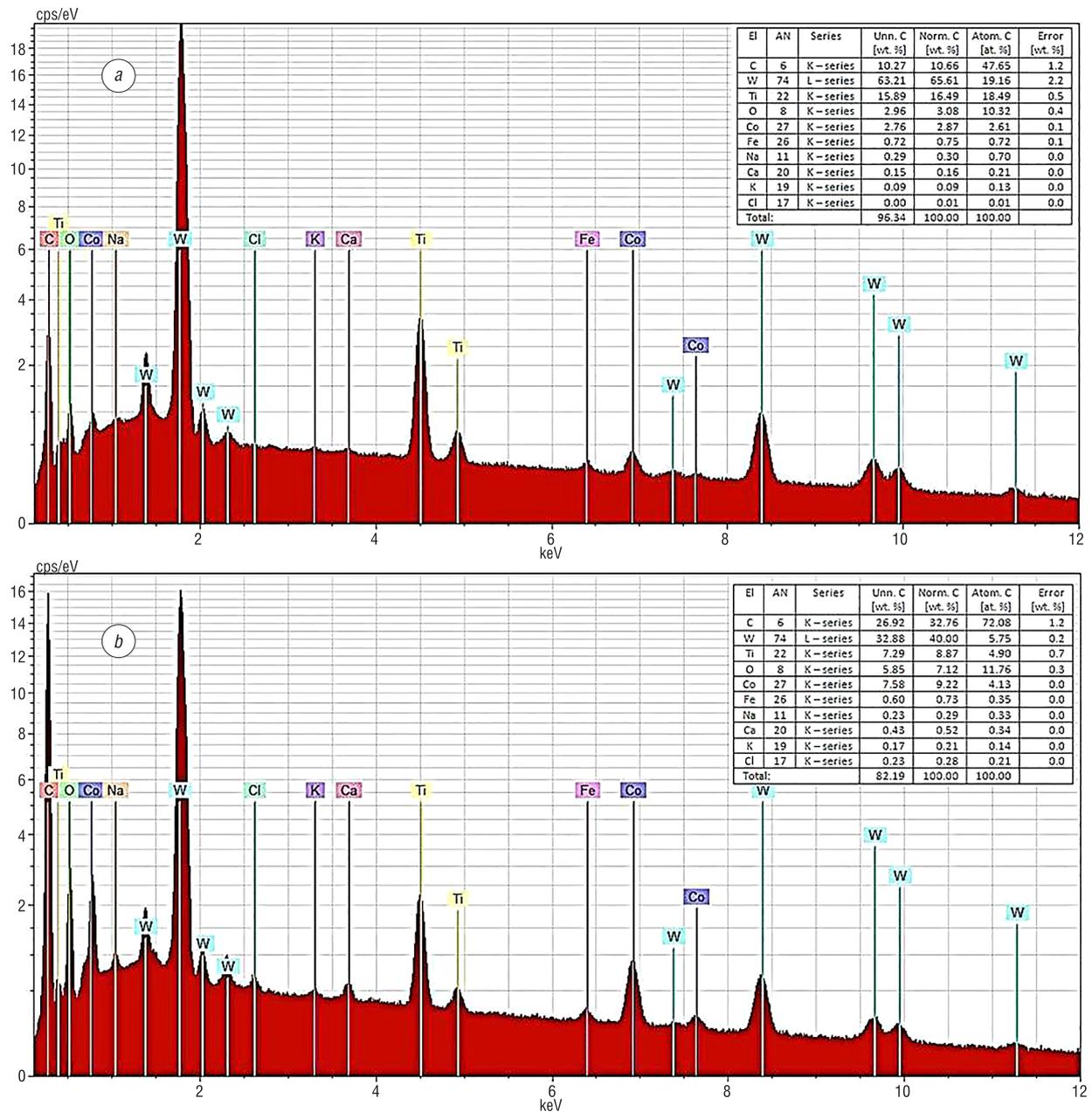


Рис. 4. Диаграмма рентгеноспектрального микрозондового анализа до (a) и после (b) обработки поверхности графитовым электродом

Fig. 4. Diagram of X-ray microprobe analysis before (a) and after (b) surface treatment with a graphite electrode

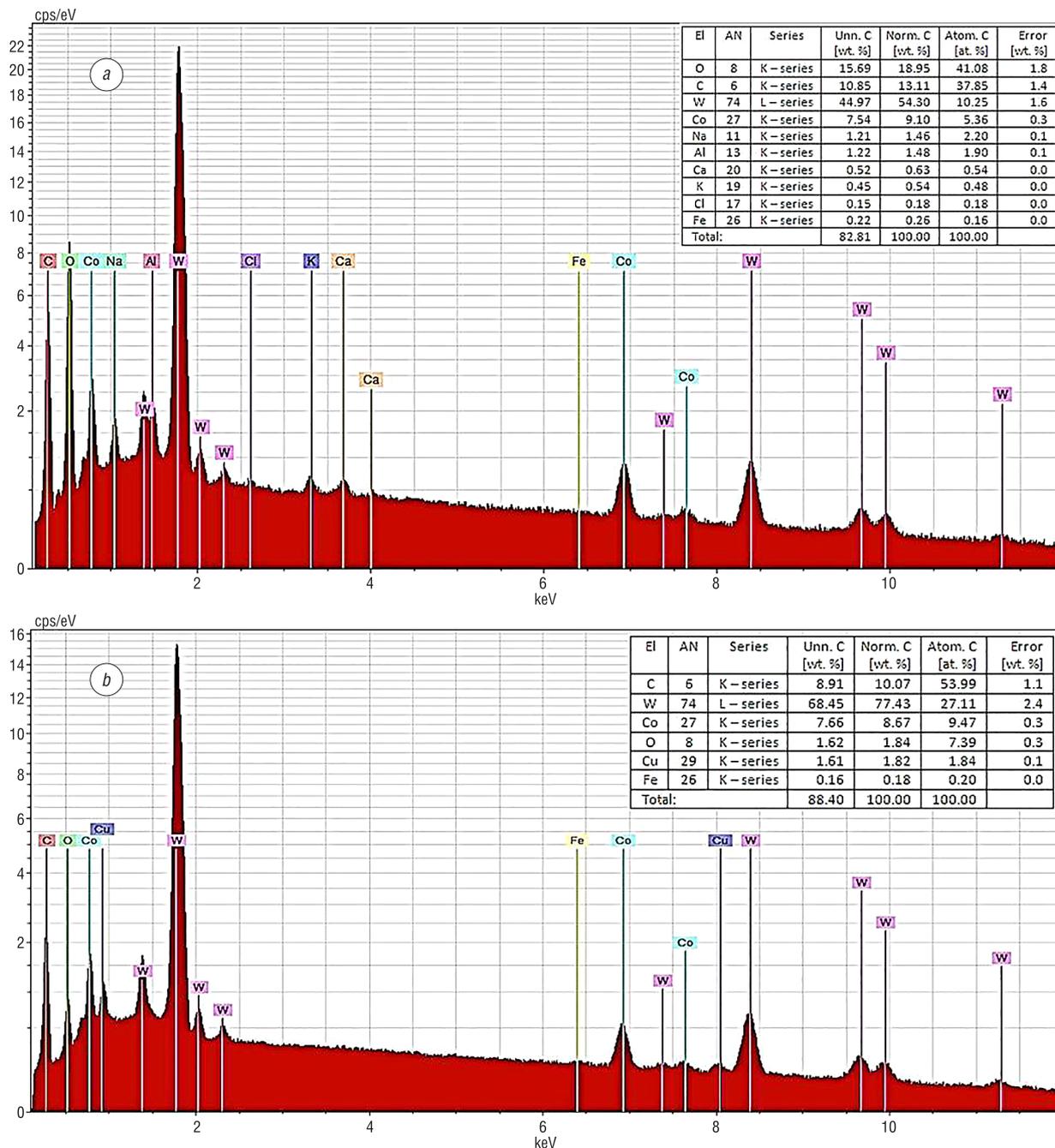


Рис. 5. Диаграмма рентгеноспектрального микрозондового анализа до (a) и после (b) обработки поверхности медным электродом

Fig. 5. Diagram of X-ray microprobe analysis before (a) and after (b) surface treatment with a copper electrode

диффузией в материал при прожоге. При этом происходит частичное разрушение самого электрода. Переизбыток углерода в верхних слоях образца может отрицательно сказаться на качестве пайки, так как снижается адгезия припоя к материалу пластины

Изменение концентрации титана объясняется образованием карбида титана. На основании литературных данных [10] появление фазы карбида титана начинается при температурах выше 1200 °С с использованием состава шихты TiO₂ + WC + сажа с некоторым избытком сажи против стехиометрического количества. Поэтому в поверхностном слое обработанного материала присутствует диоксид титана и карбид титана.

В процессе прожога температура образцов может достигать порядка 1000 °С. При такой температуре в материале пластины могут протекать фазовые превращения.

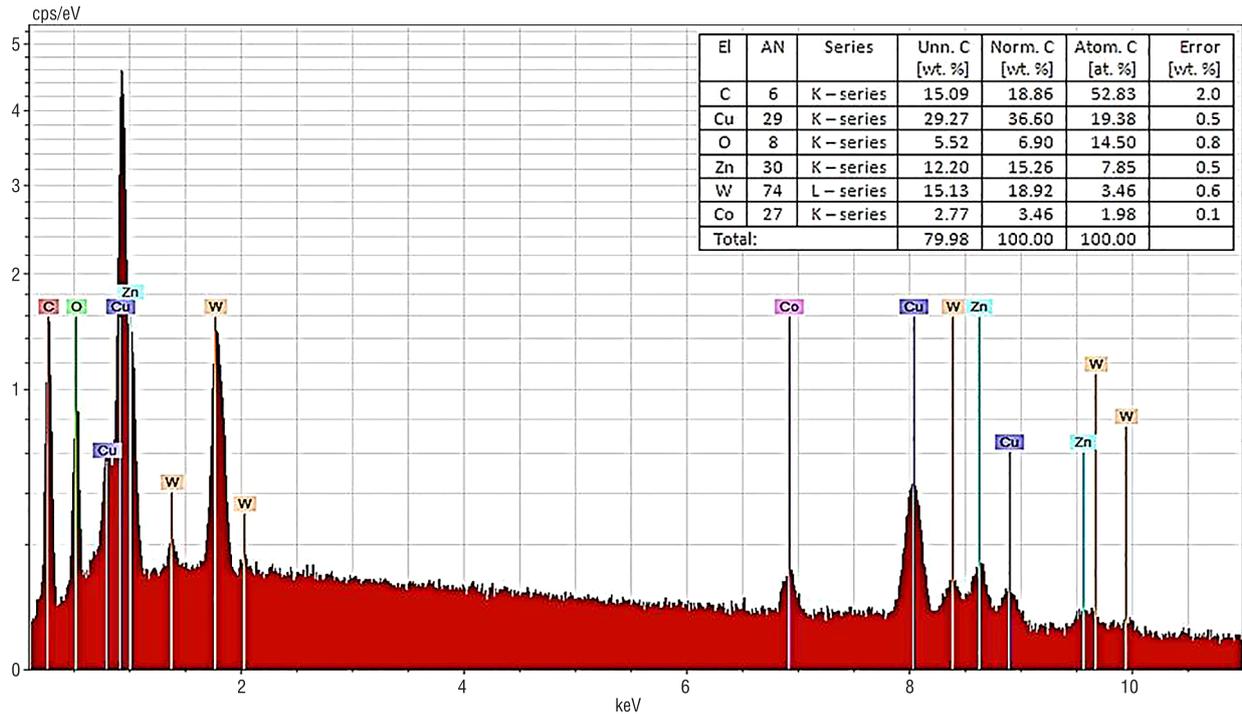


Рис. 6. Диаграмма рентгеноспектрального микрозондового анализа поверхности твердого сплава после резки латунной проволокой

Fig. 6. Diagram of X-ray microprobe analysis of the surface of a hard alloy after cutting with brass wire

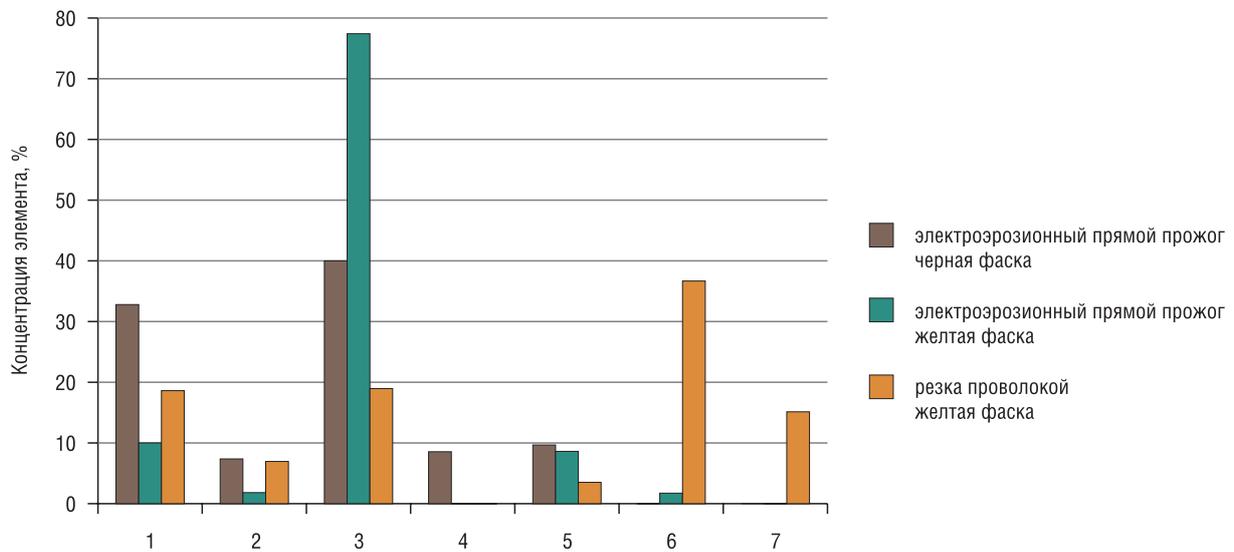


Рис. 7. Диаграмма элементного состава поверхностей твердого сплава после электроэрозионной обработки графитовым и медным электродами и латунной проволокой. Элементы: 1 – C, 2 – O, 3 – W, 4 – Ti, 5 – Co, 6 – Cu, 7 – Zn

Fig. 7. Diagram of the elemental composition of the surface of a hard alloy after electro-erosion treatment with graphite and copper electrodes and brass wire. Elements: 1 – C, 2 – O, 3 – W, 4 – Ti, 5 – Co, 6 – Cu, 7 – Zn

В структуре твердосплавной пластины присутствует кобальт с гексагональным типом решетки (α -кобальт), карбид вольфрама (WC , W_2C). В интервале 600–800 °C происходит превращение гексагональной решетки кобальта в ОЦК-решетку. Кроме того, фиксируется появление соединения вольфрама и кобальта Co_6W_6C . В диапазоне температур 800–1000 °C происходит замена соединения Co_6W_6C на Co_3W_3C . Образовавшаяся фаза устойчива до температуры выше 1200 °C вплоть до появления жидкой фазы. Процесс химического взаимодействия сопровождается полным исчезновением карбида вольфрама состава W_2C . Исчезновение карбида такого типа

Элементный состав поверхности твердого сплава до и после электроэрозионной обработки

The elemental composition of the surface of a hard alloy before and after electro-erosion treatment

Химический элемент	Графитовый электрод		Медный электрод		Резка латунной проволокой, после обработки
	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки	
C	10,27	26,92	10,85	8,91	15,09
O	2,96	5,85	15,69	1,62	5,52
W	63,21	32,88	44,97	68,45	15,13
Ti	15,89	7,29	–	–	–
Co	2,76	7,58	7,54	7,66	2,77
Cu	–	–	–	1,61	29,27
Zn	–	–	–	–	12,20

остаться до полного охлаждения заготовки. А это, в свою очередь, отрицательно скажется на механических свойствах обработанной пластины. Подтверждение этому выводу – увеличение концентрации кобальта в поверхностном слое твердосплавной пластины.

При обработке твердосплавной пластины медным электродом изменение концентраций элементов незначительно по сравнению с графитовым электродом. Как видно из таблицы, в поверхностном слое пластины появилась медь. Но так как она не образует сплавов с вольфрамом, то это не приведет к образованию новых фазовых составов. Этот слой при пайке в вакууме припоем может способствовать увеличению адгезии припоя к материалу ВК. Увеличение концентрации вольфрама после обработки свидетельствует о том, что в данном случае не было избытка углерода и, согласно реакции (1), после остывания обработанной пластины в поверхностном слое опять присутствует исходный состав пластины типа ВК с долей соединения $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ [11].

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что использование медного электрода для электроэрозионного прожога является более целесообразным, поэтому именно данный способ применялся для подготовки поверхности под пайку. Электроэрозионная резка латунной проволокой использовалась для углового крепления режущего элемента из СТМ.

Пластины из СТМ (рис. 8, *a*) крепились на твердосплавные пластины различной конфигурации (рис. 8, *b*) методом высокотемпературной пайки в вакууме. В качестве припоя использовался медно-титановый припой с легирующими добавками олова, свинца и никеля. Микрофотография припоя состава Cu-Ti-Sn , а также соединение твердосплавной резцовой пластины и керамического режущего элемента показаны на рис. 8, *c*. Режущие пластины после пайки и механической обработки представлены на рис. 8, *d*.

Из рис. 8, *c* видно, что паяный шов однородный по плотности и структуре. Толщина шва составляет порядка 18–20 мкм. Припой (рис. 9) обеспечивает хорошее смачивание и адгезию к спаиваемым материалам. В процессе пайки не происходит появления посторонних структурных образований. Присутствие примесей стронция и серы объясняется близким расположением дифракционных максимумов этих элементов к элементам припоя.

Испытания режущих пластин с напайными режущими элементами проводили на ОАО «Оршанский инструментальный завод» на токарно-винторезном станке 16К20 (рис. 10, *a*) на заготовках из стали ХВГ с твердостью HRC в пределах 47–62 и из стали ШХ15 с твердостью HRC 57–58 при чистовом точении. Внешний вид заготовок после испытаний представлен на рис. 10, *b*.

Режимы резания варьировались в следующих пределах: продольная подача – 0,1 мм/об; глубина резания – 0,2–0,3 мм; скорость резания – 155–170 м/мин. Критерием для оценки режущих свойств СТМ по результатам стойкостных испытаний служил износ резца по задней грани 0,4 мм. Шероховатость обработанной поверхности заготовок соответствовала 6–8-му классам чистоты.

возможно только при наличии в смеси свободного углерода, который мог образоваться в результате взаимодействия кобальта с карбидом вольфрама по предположительной реакции



Образовавшийся свободный углерод приводит к увеличению его концентрации в карбиде W_2C и появлению монокарбида вольфрама WC . Так как избыточный углерод аморфного типа, то этим объясняется бесструктурный вид поверхности пластины после прожога. Углерод, появившийся в результате этой реакции, необходим для протекания этой реакции в обратном направлении. В случае его нехватки в процессе охлаждения фаза $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ может

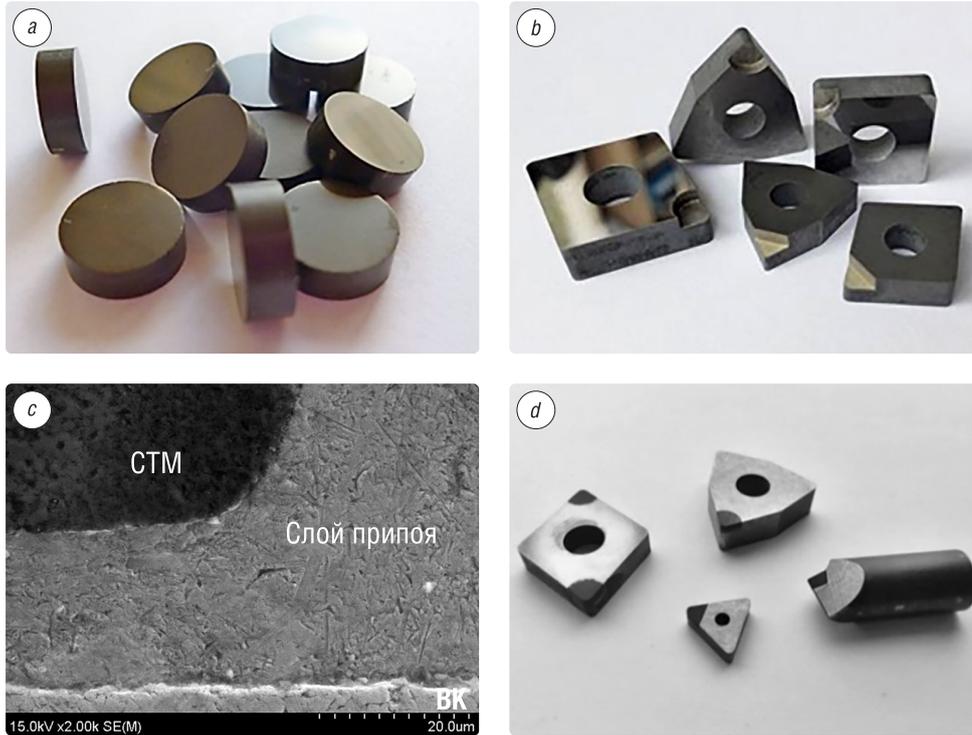


Рис. 8. Внешний вид режущих элементов из ШМ (a); твердосплавные пластины различной конфигурации после электроэрозионной обработки (b); соединение твердосплавной режущей пластины и керамического режущего элемента, $\times 2000$ (c); режущие пластины после механической обработки (d)

Fig. 8. The appearance of the cutting elements of the SHM (a); hard-alloyed plates of various configurations after electro-erosion treatment (b); join hard-alloyed plate and ceramic cutting element, $\times 2000$ (c); cutting plates after machining (d)

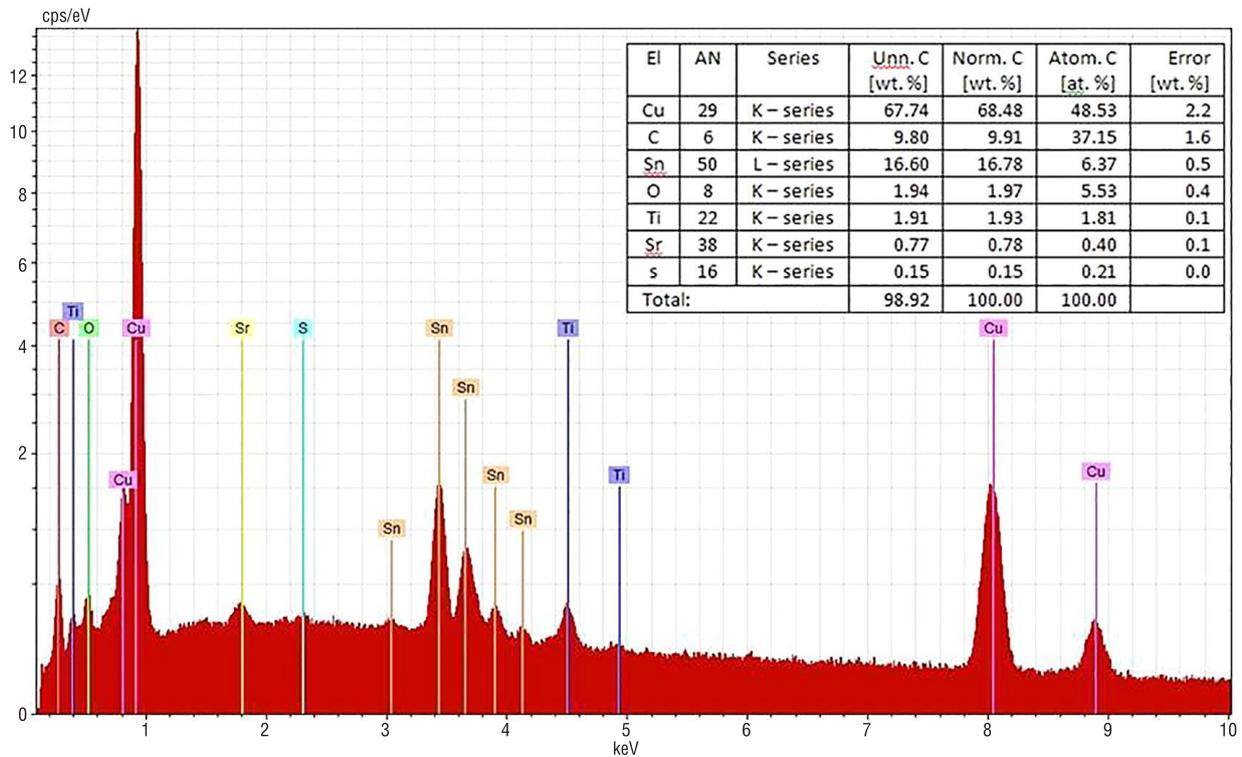


Рис. 9. Диаграмма рентгеноспектрального микрозондового анализа припоя состава Cu-Ti-Sn
 Fig. 9. Diagram of X-ray microprobe analysis of Cu-Ti-Sn solder composition



Рис. 10. Проведение испытаний режущего инструмента (а); внешний вид заготовок после испытаний (b)

Fig. 10. Testing the cutting tool (a); the appearance of the blanks after the test (b)

Заключение. Таким образом, использование медного электрода и латунной проволоки при электроэрозионной обработке твердосплавной пластины для подготовки поверхности и применение припоя на основе Cu–Ti–Sn позволяют получить надежное паяное соединение с отсутствием в нем пор и остатков флюса, вызывающих коррозию. Применение этих составляющих в технологии высокотемпературной вакуумной пайки обеспечивает максимальную смачиваемость поверхности твердосплавной пластины припоем, что приводит к получению наилучших результатов и наиболее прочного сцепления спаиваемых материалов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ГНТП «Ресурсосбережение, новые материалы и технологии-2015, 2020», подпрограмма «Алмазы и сверхтвердые материалы» (Договор № 84/3.69).

Авторы выражают благодарность доктору технических наук Л. И. Поболу (Физико-технический институт НАН Беларуси) за оказание помощи в электроэрозионной обработке твердосплавной пластины графитовым электродом.

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of SSTP “Resource Saving, New Materials and Technologies-2015, 2020”, subprogram “Diamonds and superhard materials” (Agreement № 84/3.69).

The authors are grateful to Dr. Sc. (Engineering) L. I. Pobol (Physics-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus) for assisting in the electroerosion treatment of hard-alloyed plate with graphite electrode.

Список использованных источников

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.: ил. (Б-ка инструментальщика).
2. Общий каталог MITSUBISHI, 2016–2018 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mitsubishimaterials.ru/page445957.html>
3. Каталоги Seco (инструмент Секо). Токарная обработка, 2015 [Электронный ресурс] // Твердый сплав. – Режим доступа: <http://tverdysplav.ru/katalogi-seco-instrument-seco/>
4. Металлорежущий станочный инструмент [Электронный ресурс] // Каталог инструмента Pramet, 2017. – Режим доступа: <http://utpk-instrument.kharkov.ua/producers-promo.html>
5. Cutting Tools [Электронный ресурс] // Каталог фирмы Korloy, 2013. – Режим доступа: <http://www.helmacnc.com/korloy-cutting-tools-catalogue/>
6. Металлорежущий инструмент [Электронный ресурс] // Каталог фирмы Microbor, 2010. – 135 с. – Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/1296189/>
7. Основной каталог по токарной обработке [Электронный ресурс] // ZCC Cutting Tools Europe GmbH, 2018. – Режим доступа: <https://www.zccst-europe.net/web/index.php/ru/produkte-ru/drehen-ru/441-hauptkatalog-drehen-3>
8. Новый сверхтвердый нанокompозит на основе кубического нитрида бора и тугоплавких соединений // В.С. Урбанович [и др.] // Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь – Россия – Украина (НАНО-2014): материалы IV Междунар. науч. конф., Минск, 7–10 окт. 2014 г. / редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2014. – С. 196–197.
9. Новый сверхтвердый нанокompозит на основе тугоплавких нитридов: получение, свойства, применение / В.С. Урбанович [и др.] // Наноструктурные материалы: технологии, свойства, применение: сб. науч. ст. – Минск: Беларус. наука, 2017. – С. 128–143.
10. Панов, В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В.С. Панов, А.М. Чувилин. – М.: МИСИС, 2001. – 428 с.
11. Исследование физико-химических взаимодействий, протекающих в вольфрамокобальтовых порошковых смесях при жидкофазном спекании / А.Г. Тюрин [и др.] // Ползунов. вестн. – 2012. – № 3/1. – С. 92–95.

References

1. Bogatyreva G. P., Burykin V. V., Gargin V. V., Novikov N. V., Klimentko S. A. (et al.). *Tools from Superhard Materials*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 608 p. (in Russian).
2. *General Catalog MITSUBISHI, 2016–2018*. Available at: <http://mitsubishimaterials.ru/page445957.html>
3. Seco Catalogs (Seco Tool), Turning, 2015. *Turning*. Available at: <http://tverdysplav.ru/katalogi-seco-instrument-seco/>
4. Metal-Cutting Machine Tool. *Pramet Tool Catalog*, 2017. Available at: <http://utpk-instrument.kharkov.ua/products-promo.html>
5. Cutting Tools. *Korloy Company Catalog*, 2013. Available at: <http://www.helmancnc.com/korloy-cutting-tools-catalogue/>
6. Metal Cutting Tools. *Catalog of Companies Microbor*, 2010. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1296189/>
7. The Main Catalog for Turning. *Company ZCC Cutting Tools Europe GmbH*, 2018. Available at: <https://www.zccct-europe.net/web/index.php/ru/produkte-ru/drehen-ru/441-hauptkatalog-drehen-3>
8. Urbanovich V. S., Solonenko T. D., Lavysh E. O., Lutay V. F., Matyushevskii S. I., Gameza L. M. New superhard nanocomposite based on cubic boron nitride and refractory compounds. *Nanostrukturnyye materialy–2014: Belarus' – Rossiya – Ukraina (NANO-2014): materialy IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Nanostructured Materials – 2014: Belarus – Russia – Ukraine (NANO-2014): Proceedings IV International scientific conference]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, pp. 196–197 (in Russian).
9. Urbanovich V. S., Malikina T. D., Lavysh E. O., Shloma E. N., Grigor'ev S. V., Jaworska L., Klimczyk P., Rosmus M., Cygan S., Volosatnikov V. I., Matyushevskii S. I., Altunin S. V., Shemet A. D. New superhard nanocomposite based on refractory nitrides: production, properties, application. *Nanostrukturnyye materialy: tekhnologii, svoystva, primeneniye: sb. nauch. statey* [Nanostructured Materials: Technologies, Properties, Application: Coll. scientific articles]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 128–143 (in Russian).
10. Panov V. S., Chuvilin A. M. *Technology and Properties of Sintered Hard Alloys and Products from them*. Moscow, MISIS, 2001. 428 p. (in Russian).
11. Tyurin A. G., Losinskaya A. A., Popelyukh P. A., Veselov S. V. Study of physico-chemical interactions occurring in tungsten-cobalt powder mixtures during liquid-phase sintering. *Polzunovskii vestnik* [Polzunovsky vestnik], 2012, no. 3/1, pp. 92–95 (in Russian).

Информация об авторах

Урбанович Владимир Степанович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией тугоплавкой керамики и наноматериалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: urban@physics.by

Маликина Татьяна Дмитриевна – научный сотрудник лаборатории тугоплавкой керамики и наноматериалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: slonik_66@tut.by

Лавыш Елена Осиповна – ведущий инженер лаборатории тугоплавкой керамики и наноматериалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Шлома Елена Николаевна – ведущий инженер лаборатории тугоплавкой керамики и наноматериалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shloma@physics.by

Карась Светлана Михайловна – научный сотрудник лаборатории тугоплавкой керамики и наноматериалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: cryciansm@gmail.com

Information about the authors

Vladimir S. Urbanovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Refractory Ceramics and Nanomaterials, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: urban@physics.by

Tatiana D. Malikina – Researcher of the Laboratory of Refractory Ceramics and Nanomaterials, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slonik_66@tut.by

Elena O. Lavysh – Leading engineer of the Laboratory of Refractory Ceramics and Nanomaterials, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Elena N. Shloma – Leading engineer of the Laboratory of Refractory Ceramics and Nanomaterials, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shloma@physics.by

Svetlana M. Karas – Researcher of the Laboratory of Refractory Ceramics and Nanomaterials, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cryciansm@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 621.9.047.7

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>

Поступила в редакцию 05.07.2019

Received 05.07.2019

Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

**ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ КОБАЛЬТ-ХРОМОВЫХ СПЛАВОВ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Аннотация. При изготовлении имплантатов, подверженных повышенным циклическим нагрузкам, в последнее время широко используются кобальт-хромовые сплавы, обладающие высокой твердостью и износостойкостью. Шероховатость рабочих поверхностей является одной из важнейших характеристик таких изделий. Традиционные процессы финишной отделки поверхности имплантатов из кобальт-хромовых сплавов основаны на механических и электрохимических методах. Недостатками механических методов являются малая производительность, подверженность внедрению инородных частиц, затруднения при обработке сложных геометрических форм. Для электрохимических технологий рассматриваемые материалы труднообрабатываемые, в процессах их полирования используются вредные электролиты, состоящие из растворов кислот. В качестве альтернативы существующим методам предложено использование экологически безопасного метода электролитно-плазменного полирования, основным преимуществом которого является применение в качестве электролитов водных растворов солей концентрацией 3–5 %. По результатам отработки технологического процесса установлено, что на большинстве режимов электролитно-плазменного полирования кобальт-хромовых сплавов медицинского назначения на поверхности происходит формирование рельефа в виде сетки выступов, происхождение которых можно объяснить неоднородностью структуры материала, возникающей на стадии получения заготовки литьем. Причем высота образующихся рельефных выступов оказывает непосредственное влияние на величину шероховатости поверхности. В результате исследований определены режимы процесса электролитно-плазменного полирования, обеспечивающие формирование гладкой поверхности без присутствия рельефных выступов, сглаживание микрорельефа с удалением царапин, образуемых в результате предварительного шлифования, с достижением низкого значения шероховатости (Ra 0,057 мкм) и высокого коэффициента отражения (0,7), что полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к поверхности имплантатов.

Ключевые слова: кобальт-хромовый сплав, электролитно-плазменное полирование, шероховатость, рельеф, напряжение, плотность тока

Для цитирования: Алексеев, Ю. Г. Электролитно-плазменное полирование кобальт-хромовых сплавов медицинского назначения / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 296–303. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>

Yu. G. Aliakseyeu, A. Yu. Korolyov, V. S. Niss

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

ELECTROLYTIC-PLASMA POLISHING OF COBALT-CHROMIUM ALLOYS FOR MEDICAL PRODUCTS

Abstract. In the manufacture of implants that are subject to increased cyclic loads, cobalt-chromium alloys with high hardness- and wear resistance have recently been widely used. Roughness of working surfaces is one of the most important characteristics of such products. The traditional processes of finishing the surface of cobalt-chromium alloy implants are based on mechanical and electrochemical methods. The disadvantages of mechanical methods are low productivity, susceptibility to the introduction of foreign particles, difficulties in processing of complex geometric shapes. For electrochemical

technologies the treated materials are considered intractable, harmful electrolytes, consisting of solutions of acids, are used in the process of polishing. As an alternative to existing methods, it was proposed to use an environmentally safe method of electrolytic-plasma polishing, the main advantage of which is the use of aqueous solutions of salts with a concentration of 3–5 % as electrolytes. According to the results of the technological process, it has been established that at most electrolyte-plasma polishing modes of cobalt-chromium alloys for medical purposes, a relief in the form of a grid of protrusions occurs on the surface, the origin of which can be explained by the heterogeneity of the material structure that occurs at the stage of casting. Moreover, the height of the formed relief protrusions has a direct impact on the amount of surface roughness. As a result of studies, electrolyte-plasma polishing process modes were established, ensuring the formation of a smooth surface without the presence of embossed protrusions, smoothing the microrelief with the removal of scratches resulting from pre-grinding, achieving a low roughness value (Ra 0.057 micron) and a high reflection coefficient (0.7), which fully meets the requirements for the surface of the implants.

Keywords: cobalt-chrome alloy, electrolytic-plasma polishing, roughness, relief, voltage, current density

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S. Electrolytic-plasma polishing of cobalt-chromium alloys for medical products. *Vestsi Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 296–303 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>

Введение. Кобальт-хромовые сплавы являются в настоящее время наиболее широко используемыми биоматериалами для изготовления искусственных имплантатов, которые подвергаются повышенным циклическим нагрузкам (эндопротезы коленного сустава, зубные протезы, коронарные стенты) [1, 2]. Кроме того, кобальт-хромовые сплавы обладают высокой биосовместимостью и обычно не вызывают аллергических реакций в организме.

Основу кобальт-хромовых сплавов составляет кобальт (66–67 %), обладающий высокими механическими характеристиками, а также хром (26–30 %), вводимый для придания сплаву твердости и повышения коррозионной стойкости [3]. Наряду с высокой износостойкостью другой важнейшей характеристикой поверхностей изделий из кобальт-хромовых сплавов является шероховатость поверхности. Поэтому качество рабочей поверхности имеет важное значение для повышения их надежности и долговечности. Например, в стандарте ISO 7206-2:2011 «Implants for surgery – Partial and total hip joint prosthesis. Part 2» предусмотрено, что шарнирные поверхности металлических или керамических протезов коленного сустава из кобальт-хромового сплава должны иметь параметр шероховатости Ra не более 0,1 мкм.

Поверхность заготовок имплантатов из кобальт-хромовых сплавов, полученных ковкой, литьем, лазерной резкой обычно подвергается предварительной обработке (резание, шлифование, дробеструйная обработка). Для финишной отделки поверхности медицинских изделий из кобальт-хромовых сплавов используются механические, электрохимические методы полирования или их сочетание. При этом наиболее качественное полирование изделий из кобальт-хромовых сплавов с достижением высокой однородности поверхности, удалением загрязнений, инородных включений, продуктов износа инструмента, образованных в результате предварительной обработки, достигается с применением электрохимического полирования [4, 5].

В качестве электролитов для электрохимического полирования кобальт-хромовых сплавов используют электролиты на основе растворов кислот, прежде всего серной и соляной, и этиленгликоля. В патенте WO 2014159747A1 «Electropolishing of cobalt-based alloys containing platinum» для качественного полирования коронарных стентов из нитинола предлагается использовать электролит на основе серной, соляной и ортофосфорной кислот с добавлением гликолей для повышения вязкости. Аналогичный состав, только с добавлением этилового спирта и дистиллированной воды предлагается использовать для полирования зубных протезов из кобальт-хром-никелевых сплавов [6]. В патенте US 80800148B2 «Electropolishing process for cobalt and cobalt alloys» для полирования кобальт-хромовых сплавов, в том числе стеллитов, предлагаются более сложные составы. Электролит состоит из гликолевой кислоты и алкинсульфоновой кислоты с алкильным остатком, который имеет от 1 до 3 атомов углерода.

В качестве альтернативы существующим методам электрохимического полирования возможно использование электролитно-плазменной обработки, широко применяемой для полирования (электролитно-плазменное полирование – ЭПП), удаления заусенцев и очистки металлических изделий, в том числе изделий медицинского назначения [7, 8]. ЭПП по сравнению с механическим и электрохимическим полированием обладает рядом существенных преимуществ: высокая

Таблица 1. Химический состав кобальт-хромового сплава ASTM F75

Table 1. Chemical composition of ASTM F75 alloy

Элемент	Si	Cr	Mn	Co	Cu	Mo
мас. %	0,41	26,87	1,19	65,06	0,14	6,34

Рис. 1. Внешний вид исходного образца
Fig. 1. Appearance of initial sample

экологическая безопасность за счет применения электролитов на основе водных растворов солей концентрацией 3–5 %; возможность обработки деталей и изделий любой конфигурации; возможность получения зеркальной поверхности с высотой микронеровностей вплоть до $Ra = 0,01$ мкм; устранение в процессе обработки некондиционного поверхностного слоя и остаточных напряжений, что улучшает физико-механические и химические свойства поверхности; достаточно короткая продолжительность процесса полирования; существенное снижение ручного труда; возможность обработки высокотвердых и вязких материалов [9–13]. Производительность и экономическая эффективность технологических операций процесса ЭПП в 5–6 раз выше, чем при традиционном электрохимическом полировании в растворах кислот [13]. Применение метода при полировании изделий медицинского назначения из коррозионноустойчивых сталей и титановых сплавов показало его высокую эффективность [13]. Достижимый параметр шероховатости Ra при обработке этих материалов составлял 0,02 мкм.

Учитывая изложенное, а также принимая во внимание мировые тенденции по сокращению производственных процессов, использующих опасные электрохимические технологии, и замену их на более экологичные и эффективные, актуальными представляются работы, направленные на разработку и исследование процессов ЭПП изделий из кобальт-хромовых сплавов. Целью данной работы являлись разработка и исследование режимов ЭПП кобальт-хромовых сплавов, применяемых для изготовления изделий медицинского назначения сложной формы.

Материалы, методика и оборудование для исследований. Для выполнения исследований использовался кобальт-хромовый сплав ASTM F75, широко применяемый для изготовления изделий медицинского назначения (табл. 1).

Размер образцов составлял около $25 \times 8 \times 5$ мм. Полученные образцы предварительно шлифовались шлифовальной бумагой с размерностью P1 200. Исходная шероховатость полученных образцов составляла $Ra 0,12$ мкм. Внешний вид исходных образцов представлен на рис. 1.

Для выполнения ЭПП использовалась экспериментальная установка, включающая рабочую ванну (катод), нагреватель, теплообменник, датчик температуры, систему перемешивания электролита (рис. 2).

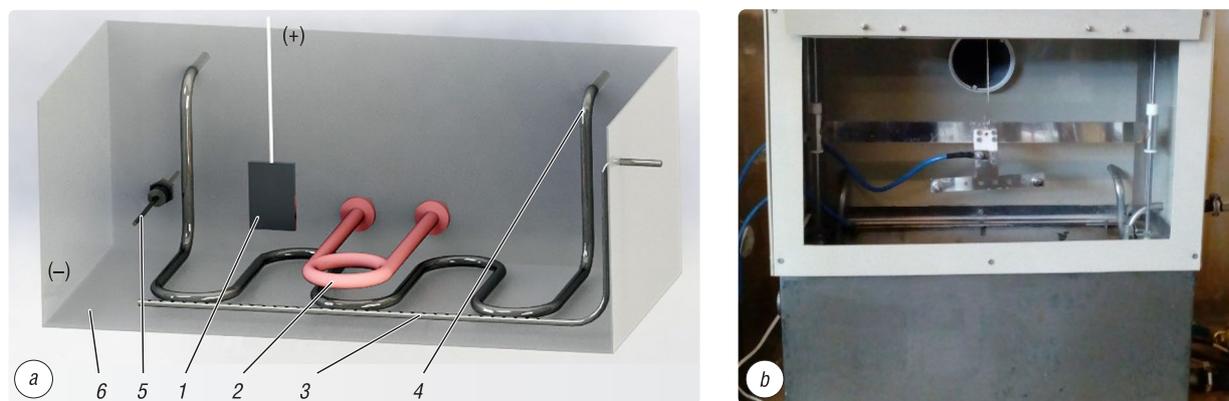


Рис. 2. Экспериментальное оборудование для выполнения исследований: а – схема рабочей ванны: 1 – образец (анод), 2 – нагреватель, 3 – система перемешивания электролита, 4 – теплообменник, 5 – датчик температуры, 6 – ванна (катод); б – общий вид оборудования

Fig. 2. Experimental equipment for research: а – working bath scheme: 1 – sample (anode), 2 – heater, 3 – electrolyte mixing system, 4 – heat exchanger, 5 – temperature sensor, 6 – bath (cathode); б – general view of equipment

Обработка образцов выполнялась при различных значениях напряжения и температуры электролита (70 °С, 80 и 90 °С). Напряжение обработки регулировалось с помощью трехфазного ЛАТРа и составляло 240 В, 270 и 300 В. В качестве электролита использовался водный раствор сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ концентрацией 4 %.

Сила тока при обработке определялась с помощью токовых клещей UNIT-203. Плотность тока устанавливалась как отношение силы тока к площади обрабатываемой поверхности. Микроструктура поверхности обработанных образцов оценивалась с помощью светового металлографического микроскопа Altami. Шероховатость поверхности образцов измерялась профилометром MarSurfPS1. Для выполнения измерений коэффициента отражения применялись специально разработанные методика и приспособление. Разработанная методика основана на измерении яркости параллельного пучка света, отраженного от исследуемой поверхности. За отражение 100 % принималась поверхность эталонного оптического зеркала. Схема измерения коэффициента отражения представлена на рис. 3.

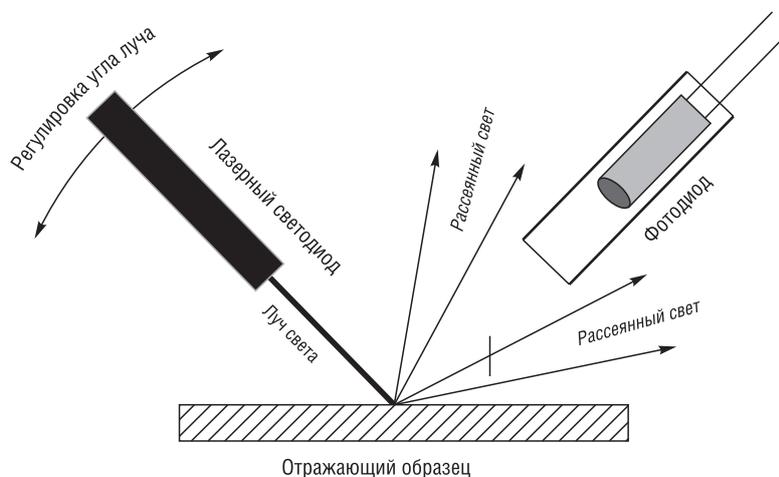


Рис. 3. Схема измерения коэффициента отражения

Fig. 3. Measurement of the reflection coefficient

Результаты исследований и их обсуждение. Основными параметрами, оказывающими влияние на плотность тока в процессе ЭПП, являются температура электролита и рабочее напряжение. Они определяют толщину образующейся вокруг обрабатываемого образца парогазовой оболочки и, соответственно, производительность процесса [13]. На рис. 4 представлены экспериментально установленные зависимости, характеризующие влияние напряжения на плотность тока в процессе ЭПП кобальт-хромового сплава ASTM F75 при различных значениях температуры электролита. Наибольшая плотность тока 0,27–0,32 А/см² и, соответственно, максимальная производительность процесса достигаются при температуре электролита 70 °С. С повышением температуры электролита до 90 °С плотность тока снижается до значений 0,12–0,17 А/см², что связано с существенным увеличением толщины парогазовой оболочки, отделяющей обрабатываемую поверхность от электролита.

Фотографии поверхности полученных образцов, обработанных в соответствии с исследуемыми режимами при продолжительности

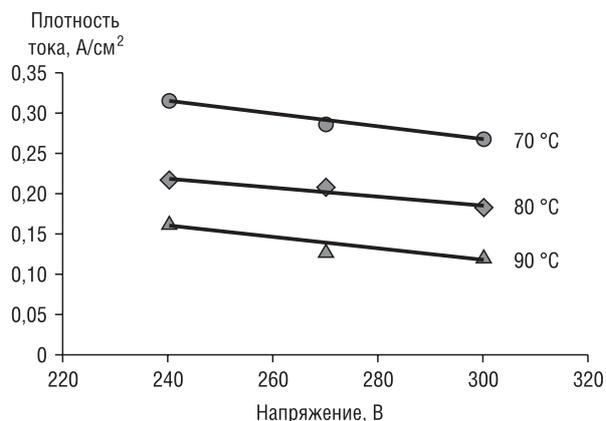


Рис. 4. Влияние напряжения на изменение плотности тока в процессе ЭПП кобальт-хромового сплава при различных значениях температуры электролита

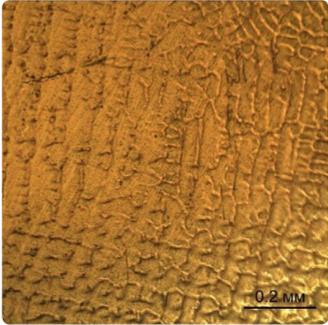
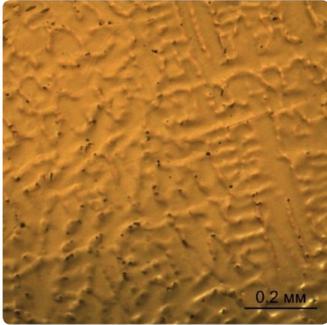
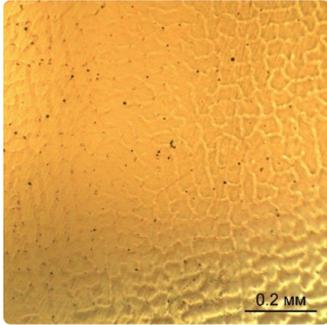
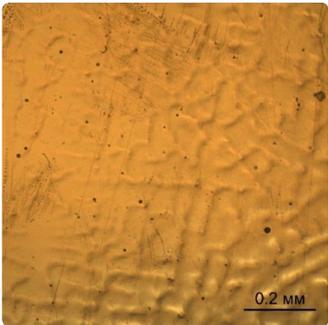
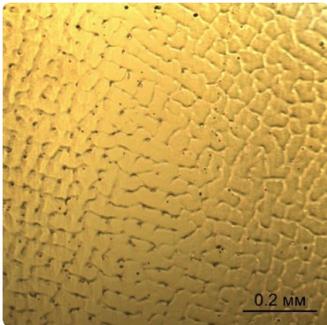
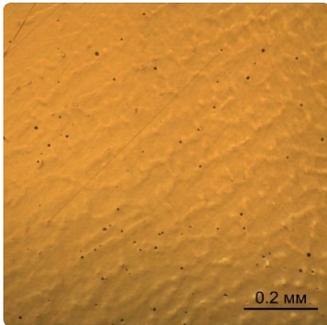
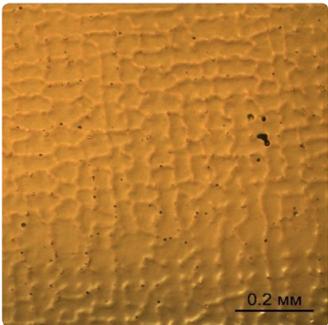
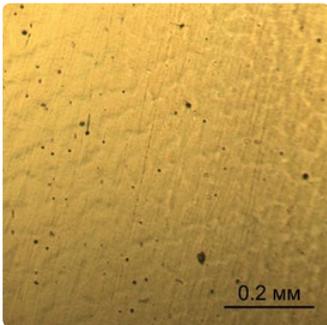
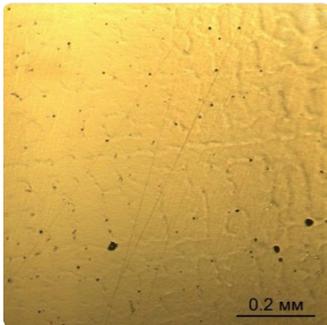
Fig. 4. The effect of voltage on the change in current density in EPP of a cobalt-chrome alloy at different values of the electrolyte temperature

обработки 3 мин, приведены в табл. 2. В результате обработки на всех исследуемых режимах на поверхности образцов наблюдается формирование рельефа в виде сетки выступов, происхождение которых можно объяснить неоднородностью структуры материала, возникающей на стадии получения заготовки литьем. Очевидно, что наличие рельефных выступов оказывает неблагоприятное влияние на шероховатость поверхности.

Из полученных результатов видно, что чем выше плотность тока, тем сильнее выражен формируемый в процессе ЭПП рельеф. Так, при повышении плотности тока (выше $0,22 \text{ А/см}^2$), а также при снижении рабочего напряжения (меньше 300 В) на обработанной поверхности происходит более интенсивное образование рельефных выступов по сравнению с остальными режимами. Лучшие результаты по состоянию и качеству поверхности достигаются при напряжении 300 В и плотности тока не более $0,22 \text{ А/см}^2$.

Т а б л и ц а 2. Микроструктура поверхности и значения параметра шероховатости поверхности Ra после обработки образцов из кобальт-хромовых сплавов при различных электрических режимах

T a b l e 2. The surface microstructure and values of the surface roughness parameter Ra after processing samples from cobalt-chromium alloys under various electrical conditions

Напряжение, В	Температура/плотность тока		
	70 °С / 0,27–0,32 А/см ²	80 °С / 0,18–0,22 А/см ²	90 °С / 0,12–0,17 А/см ²
240	 <p>Ra 0,184 мкм</p>	 <p>Ra 0,106 мкм</p>	 <p>Ra 0,075 мкм</p>
270	 <p>Ra 0,108 мкм</p>	 <p>Ra 0,094 мкм</p>	 <p>Ra 0,068 мкм</p>
300	 <p>Ra 0,116 мкм</p>	 <p>Ra 0,068 мкм</p>	 <p>Ra 0,064 мкм</p>

На рис. 5 представлена зависимость шероховатости поверхности Ra после обработки образцов кобальт-хромового сплава от плотности тока. С увеличением плотности тока значительно снижается качество поверхности – достигаемое значение параметра шероховатости Ra увеличивается с 0,054 мкм при плотности тока 0,12 А/см² до 0,184 мкм при плотности тока 0,32 А/см². Таким образом, для получения минимального значения шероховатости поверхности Ra необходимо выполнять обработку с использованием режима, обеспечивающего наименьшее значение плотности тока – 0,12 А/см² (напряжение 300 В, температура электролита – 90 °С). Этот режим применялся в дальнейшем для исследования влияния продолжительности ЭПП на качество поверхности.

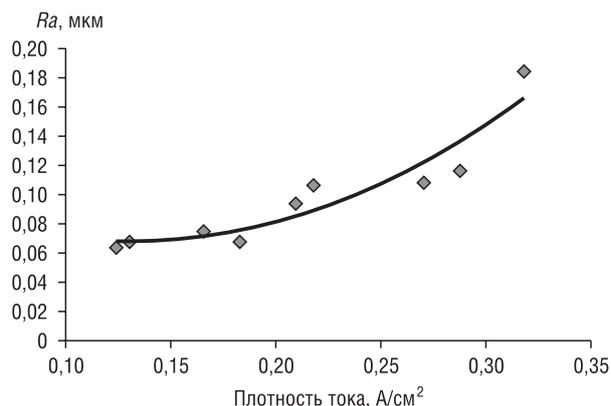


Рис. 5. Влияние плотности тока на шероховатость поверхности Ra в процессе ЭПП кобальт-хромового сплава
 Fig. 5. Effect of current density on the surface roughness Ra in the process of EPP of a cobalt-chrome alloy

На рис. 6 представлены фотографии поверхности образцов после обработки с различной продолжительностью. На начальном этапе (до 1 мин) происходит существенное снижение шероховатости поверхности до Ra 0,031 мкм. Однако после такой обработки визуально все еще различимы царапины, сформированные в результате предварительного шлифования образцов. В результате дальнейшей обработки происходит сглаживание микрорельефа с постепенным удалением царапин. Полное удаление царапин достигается после обработки продолжительностью 2,0–2,5 мин. При этом на поверхности начинают проявляться рельефные выступы, в итоге повышается шероховатость поверхности (до Ra 0,061 при продолжительности обработки 2,5 мин).

Зависимости шероховатости поверхности и коэффициента отражения образцов из кобальт-хромового сплава от продолжительности ЭПП, построенные на основании полученных экспериментальных данных, представлены на рис. 7. Как уже было отмечено, минимальные значения шероховатости поверхности достигаются при обработке с продолжительностью до 1 мин. Наибольший коэффициент отражения имеют образцы после 2,0–2,5 мин обработки.

Сопоставление зависимостей на рис. 7 показывает, что для достижения высокого качества ЭПП кобальт-хромовых сплавов необходимая продолжительность обработки составляет 2 мин. При этом обеспечивается: формирование гладкой поверхности без присутствия царапин, образуемых в результате предварительного шлифования, и рельефных выступов; снижение шероховатости до Ra 0,057 мкм и существенное повышение коэффициента отражения поверхности (до 0,7). Результат ЭПП феморального компонента эндопротеза коленного сустава из кобальт-хромового сплава с использованием установленных режимов обработки представлен на рис. 8.

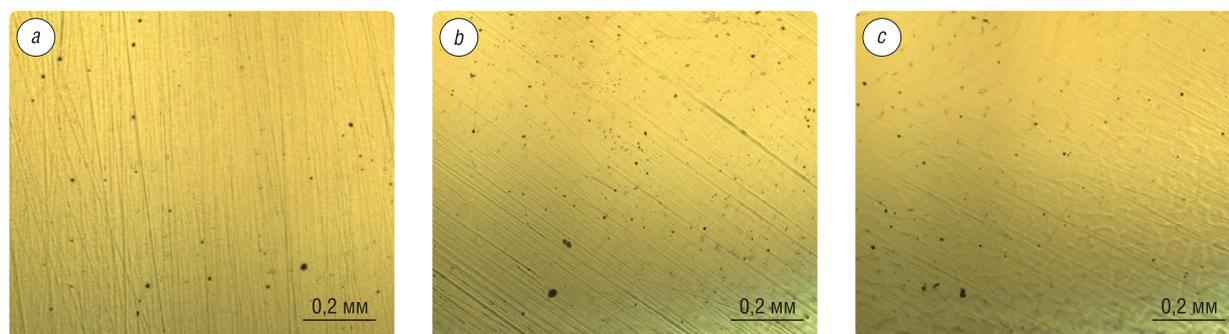


Рис. 6. Состояние поверхности образцов из кобальт-хромового сплава после ЭПП с различной продолжительностью: a – 0,5 мин, b – 1,5 мин, c – 2,5 мин

Fig. 6. The surface condition of samples from a cobalt-chromium alloy after EPP with different duration: a – 0.5 min, b – 1.5 min, c – 2.5 min

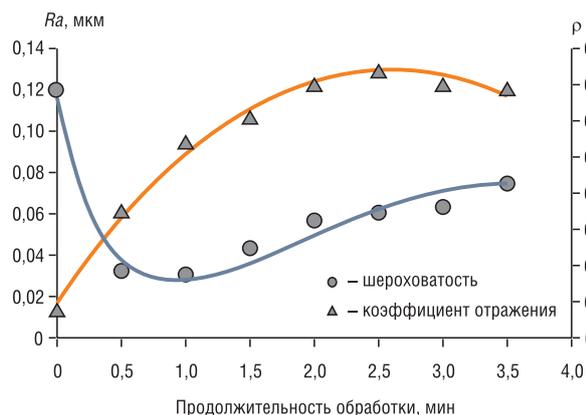


Рис. 7. Влияние продолжительности ЭПП на изменение шероховатости поверхности и коэффициента отражения
Fig. 7. Effect of EPP duration on change the surface roughness and reflection coefficient



Рис. 8. Результат ЭПП феморального компонента эндопротеза коленного сустава из кобальт-хромового сплава
Fig. 8. The result of EPP of the femoral component of a cobalt-chrome alloy knee joint endoprosthesis

Заключение. По результатам разработки электрических режимов процесса электролитно-плазменного полирования кобальт-хромовых сплавов для изготовления имплантатов сложной формы, подверженных повышенным циклическим нагрузкам, установлено, что при высоких значениях плотности тока, а также при низком рабочем напряжении на обработанной поверхности происходит интенсивное образование рельефных выступов. Наименьшая высота рельефа может быть получена при напряжении 300 В и плотности тока не более 0,22 А/см². Минимальное значение шероховатости поверхности (Ra до 0,031 мкм) достигается при использовании режима с наименьшим значением плотности тока – 0,12 А/см² (напряжение 300 В, температура электролита – 90 °С).

Определено, что наиболее приемлемое сочетание характеристик поверхности кобальт-хромового сплава обеспечивается в результате обработки продолжительностью 2 мин. При этом формируется гладкая поверхность без царапин, образуемых в результате предварительного шлифования, и рельефных выступов, а также снижается шероховатость до Ra 0,057 мкм и существенно повышается коэффициент отражения поверхности (до 0,7).

Список использованных источников

1. Cobalt-chromium alloys in fixed prosthodontics in Sweden / M. Kassapidou [et al.] // Acta Biomaterialia Odontologica Scandinavica. – 2017. – Vol. 3, iss. 1. – P. 53–62. <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>
2. Высокие технологии на службе отечественной медицины / В. Минченя [и др.] // Наука и инновации. – 2018. – №5 (183). – С. 21–23.
3. Surface properties and corrosion behavior of Co–Cr alloy fabricated with selective laser melting technique / Xianzhen Xin [et al.] // Cell Biochem. Biophys. – 2013. – Vol. 67. – P. 983–990. <https://doi.org/10.1007/s12013-013-9593-9>
4. The effect of microstructure on the wear of cobalt-based alloys used in metal-on-metal hip implants / R. Varano [et al.] // Proc. IME H.J. Eng. Med. – 2006. – Vol. 220, iss. 2. – P. 145–159. <https://doi.org/10.1243/09544119jeim110>
5. Alvarez, E. Surface Damage in Retrieved Total Knee Replacement Femoral Components / E. Alvarez. – Clemson: Clemson Univ., 2012. – 222 p.
6. Жулев, Е. Н. Несъемные протезы. Теория, клиника и лабораторная техника / Е. Н. Жулев. – М.: Мед. информ. агентство, 2010. – 488 с.
7. Surface finish machining of medical parts using plasma electrolytic polishing / H. Zeidler [et al.] // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 49. – P. 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>
8. Особенности электролитно-плазменного нагрева при электрохимико-термической обработке стали / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2013. – №6. – С. 20–24.
9. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH 2006: Proceeding of the Abstracts of 14th International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 October 2006. – Trnava, 2006. – P. 6.
10. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т / И. В. Фомихина [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – №3. – С. 24–29.
11. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2012. – №3. – С. 3–6.

12. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника – 2017. – № 5. – С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>
13. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2018. – № 3. – С. 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>

References

1. Kassapidou M., Stenport V., Hjalmarsson L., Johansson C. Cobalt-chromium alloys in fixed prosthodontics in Sweden. *Acta Biomaterialia Odontologica Scandinavica*, 2017, no. 3, iss. 1, pp. 53–62. <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>
2. Minchenya V., Aliakseyeu Yu., Olgomets I., Avtushko A. High Technologies in the service of domestic medicine. *Nauka i innovatsii = Science and Innovation*, 2018, no. 5 (183), pp. 21–23 (in Russian).
3. Xian-zhen Xin, Jie Chen, Nan Xiang, Bin Wei. Surface properties and corrosion behavior of Co–Cr alloy fabricated with selective laser melting technique. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 2013, vol. 67, pp. 983–990. <https://doi.org/10.1007/s12013-013-9593-9>
4. Varano R., Boby J. D., Medley J. B., Yue S. The effect of microstructure on the wear of cobalt-based alloys used in metal-on-metal hip implants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2006, vol. 220, iss. 2, pp. 145–159. <https://doi.org/10.1243/09544119jeim110>
5. Alvarez E. *Surface Damage in Retrieved Total Knee Replacement Femoral Components*. Clemson, Clemson Univ., 2012. 222 p.
6. Zhulev E. N. *Fixed Prostheses. Theory, Clinic and Laboratory Equipment*. Moscow, Medical Information Agency, 2010. 488 p. (in Russian).
7. Zeidler H., Boettger-Hiller F., Edelmann J., Schubert A. Surface finish machining of medical parts using plasma electrolytic polishing. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 49, pp. 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>
8. Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E. Characteristics of electrolytic-plasma heating at electrochemical-heat treatment of steel. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2013, vol. 6, pp. 20–24 (in Russian).
9. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *CO-MAT-TECH 2006: Proceeding of the Abstracts of 14th International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 October 2006*. Slovakia, Trnava, 2006, p. 6.
10. Fomikhina I. V., Lisovskaya Yu. O., Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S. Effect of electrolytic-plasma treatment on the structure and properties of the surface layer of authentic stainless steel. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2008, vol. 3, pp. 24–29 (in Russian).
11. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E. Model of metal removal in electrolytic-plasma treatment of the cylindrical surfaces. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2012, vol. 3, pp. 3–6 (in Russian).
12. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E. Electrolyte-plasma treatment under non-stationary mode in a high-gradient electric field. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2017, vol. 5, pp. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399> (in Russian).
13. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitski A. S. Electrolyte-Plasma Polishing of Titanium and Niobium Alloys. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2018, vol. 3, pp. 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219> (in Russian).

Информация об авторах

Алексеев Юрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, генеральный директор – проректор по производственной деятельности, Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (ул. Я. Коласа, 24, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: y.aliakseyeu@bntu.by

Королёв Александр Юрьевич – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательским сектором перспективных технологий, Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (ул. Я. Коласа, 24, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korolyov@park.bntu.by

Нисс Владимир Семёнович – кандидат технических наук, доцент, заведующий инновационно-производственным центром медицинского оборудования и изделий, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: niss@park.bntu.by

Information about the authors

Yuri G. Aliakseyeu – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, General Manager – Vice-rector on production activity, State Enterprise “Scientific and Technological Park BNTU “Polytechnic” (24, Ya. Kolas Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alekseev@icm.by

Aleksandr Yu. Korolyov – Ph. D. (Engineering), Head of Prospective Technologies Department, State Enterprise “Scientific and Technological Park BNTU “Polytechnic” (24, Ya. Kolas Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korolyov@park.bntu.by

Vladimir S. Niss – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Innovation and Production Center of Medical Equipment and Products, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: niss@park.bntu.by

А. Б. Менжинский

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

СОГЛАСОВАНИЕ СИЛ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ СО СВОБОДНОПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА

Аннотация. Автономная система энергоснабжения современных мобильных средств специального назначения требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями. В промышленно развитых странах в качестве перспективной энергоустановки рассматривается система «свободнопоршневой двигатель – возвратно-поступательный электрический генератор поперечного типа».

Главной особенностью такой энергоустановки является отсутствие кривошипно-шатунного механизма в конструкции двигателя. Это позволяет: увеличить коэффициент полезного действия двигателя до 50–60 % и габаритную мощность в 2,5–3 раза с одновременным уменьшением удельной массы и металлоемкости по сравнению с традиционными двигателями; снизить удельный расход топлива двигателя до 30 %; увеличить ресурс до капитального ремонта на 30–50 тыс. ч; реализовать модульную структуру.

Основными недостатками такой энергоустановки являются большая вероятность поломки при пропуске зажигания рабочей смеси и неустойчивость работы при значительных колебаниях нагрузки. Отмеченные недостатки обусловлены несогласованностью сил электрической и механической подсистем энергоустановки на всем рабочем цикле. Особую сложность вызывает решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы свободнопоршневого двигателя. В связи с этим был разработан способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем на всем рабочем цикле, отличающийся использованием в электрической подсистеме энергоустановки электромеханического преобразователя энергии возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки на всем рабочем цикле позволяет обеспечить выполнение условия непрерывного электромеханического преобразования энергии на всем рабочем цикле и уменьшить удельную массу электрической подсистемы энергоустановки при одновременном повышении коэффициента полезного действия.

Ключевые слова: электромагнитная сила, энергоустановка, комбинированный генератор, возвратно-поступательный электрический генератор, свободнопоршневой двигатель

Для цитирования: Менжинский, А. Б. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем и электрическим генератором возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 304–320. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-304-320>

A. B. Menzhinski

Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

COORDINATION OF FORCES OF MECHANICAL AND ELECTRIC SUBSYSTEMS OF POWER PLANT WITH FREE PISTON ENGINE AND ELECTRIC GENERATOR OF RECIPROCATING TYPE

Abstract. Autonomous power supply system of modern mobile special-purpose equipment requires the development of electromechanical energy converters with high energy and minimum weight- and size indicators. In industrialized countries, the system “free piston engine – reciprocating electric generator of transverse type” is considered as a promising power plant.

The main feature of this kind of power plant is the lack of crank mechanism in the engine design. This allows: increasing the efficiency of the engine up to 50–60 % and overall power by 2.5–3 times while reducing the specific gravity and metal consumption compared to traditional engines; reducing the specific fuel consumption of the engine up to 30 %; increasing the resource to overhaul by 30–50 thousand hours; implementing a modular structure.

The main drawbacks of this kind of power plant are high probability of failure when passing the ignition of the working mixture and instability of work with significant load fluctuations. The noted drawbacks are due to the inconsistency of the forces of the electrical and mechanical subsystems of the power plant throughout the operating cycle. The solution for the

problem of matching the forces of the electrical and mechanical subsystems of the power plant in the extreme positions of the piston group of the free piston engine is of particular complexity. In this regard, a method for solving the problem of matching the forces of the mechanical and electrical subsystems of the power plant with a free-piston engine throughout the operating cycle was developed, characterized by the use of an electromechanical reciprocating energy converter with transverse- and longitudinal nonlinear changes in the magnetic flux in the electrical subsystem. Coordination of the forces of mechanical and electrical subsystems of the power plant on the entire operating cycle makes it possible to fulfill the conditions of continuous electromechanical energy conversion at all work cycle and to reduce the specific gravity of the electrical subsystems of the plant while improving efficiency.

Keywords: electromagnetic force, power plant, combined generator, reciprocating electric generator, free piston engine

For citation: Menzhinski A. B. Coordination of forces of mechanical and electric subsystems of power plant with free piston engine and electric generator of reciprocating type. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 304–320 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-304-320>

Введение. Автономная система энергоснабжения (АСЭС) современных мобильных средств специального назначения требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями (отчет о НИР №566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи» (Минск, 2018)). В промышленно развитых странах (США, Россия, Великобритания, Япония, Германия, Швеция, Нидерланды, Китай, Израиль и др.) в качестве перспективной энергоустановки рассматривается система «свободнопоршневой двигатель (СПД) – линейный электрический генератор (возвратно-поступательный электрический генератор (ВПЭГ) поперечного типа)» (рис. 1) [1–12].

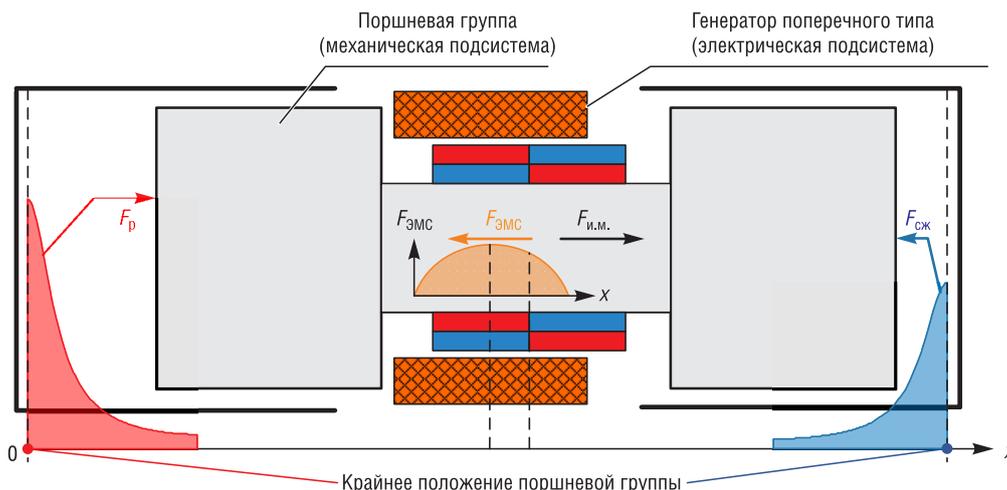


Рис. 1. Свободнопоршневой двигатель с возвратно-поступательным электрическим генератором поперечного типа

Fig. 1. Free-piston engine with reciprocating electric generator transverse type

Главной особенностью энергоустановки с СПД и ВПЭГ поперечного типа является отсутствие кривошипно-шатунного механизма (КШМ) в конструкции двигателя. Это позволяет [1, 3]: увеличить коэффициент полезного действия (КПД) двигателя до 50–60 % и габаритную мощность в 2,5–3 раза с одновременным уменьшением удельной массы и металлоемкости СПД по сравнению с традиционными двигателями; снизить удельный расход топлива двигателя до 30 %; увеличить ресурс до капитального ремонта на 30–50 тыс. ч; реализовать модульную структуру энергоустановки.

Основными недостатками рассматриваемой энергоустановки являются большая вероятность поломки при пропуске зажигания рабочей смеси и неустойчивость работы при значительных колебаниях нагрузки [3, 11]. Отмеченные недостатки обусловлены несогласованностью сил электрической (генератор) и механической (двигатель) подсистем энергоустановки на всем рабочем цикле.

Обобщение научной литературы [3–5, 12], посвященной исследованию энергоустановок с СПД и ВПЭГ поперечного типа, показало, что в настоящее время предпринимаются попытки решения задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки

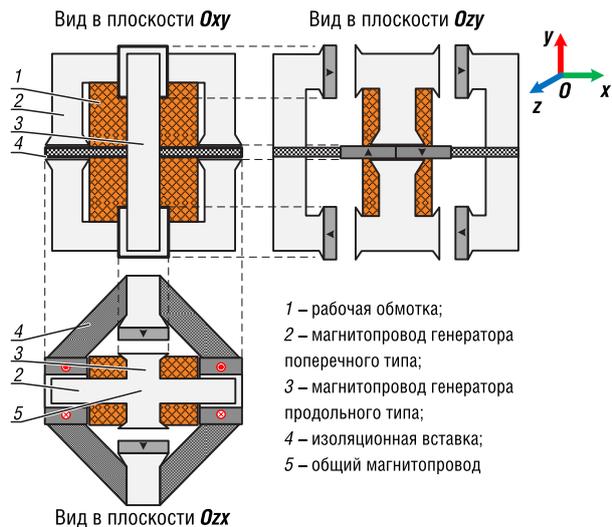


Рис. 2. Структура комбинированного генератора с Ж-образным магнитопроводом

Fig. 2. The structure of the combined generator with a J-shaped magnetic core

энергоустановки на всем рабочем цикле, и тем самым обеспечить согласование электрической и механической подсистем энергоустановки, что при пропуске зажигания рабочей смеси может привести к аварийной ситуации и поломке энергоустановки. С учетом сказанного решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки с СПД на всем рабочем цикле, особенно в крайних положениях поршневой группы СПД, представляет особую актуальность.

Способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки. С этой целью в данной статье предлагается рассмотреть электромеханический преобразователь энергии (ЭМПЭ) возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока (комбинированный ЭМПЭ возвратно-поступательного типа) [13, 15]. В качестве примера на рис. 2 представлен вариант структуры разработанного мною комбинированного генератора (КГ) возвратно-поступательного типа с Ж-образным магнитопроводом (МПр).

В целях обоснования возможности применения ЭМПЭ возвратно-поступательного типа с продольным нелинейным изменением магнитного потока в энергоустановке с СПД проведен анализ временных диаграмм координаты подвижной части, потока сцепления с рабочей обмоткой $\hat{\Psi}_{\delta_0}$ и электродвижущей силы (ЭДС) движения на один виток рабочей обмотки \hat{E} генератора продольного типа, которые в нормированном виде представлены на рис. 3.

Из рис. 3, с видно, что при приближении подвижной части генератора к неподвижной $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ (минимальная величина воздушного зазора) в рабочей обмотке генератора формируется ЭДС движения отрицательной полярности, а при удалении подвижной части генератора $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$ (максимальная величина воздушного зазора) – ЭДС движения положительной полярности. Это приводит к формированию в рабочей обмотке генератора разнополярного тока. При $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ и $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$ ток в рабочей обмотке направлен таким образом, что созданное им магнитное поле противодействует изменению внешнего магнитного поля, в данном случае магнитного поля постоянного магнита (ПМ) (см. рис. 3, b), которым создан этот ток. В результате этого при $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ и $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$ будут формироваться разнополярные силы, действующие на подвижную часть генератора [13]. Резко возрастающий и убывающий характер ЭДС движения вблизи точки δ_{\min} , а затем стремящийся к нулю (см. рис. 3, c), обусловлен характером изменения составляющих ЭДС движения $d\hat{\Psi}_{\delta_0}/dx_{\text{ВПЭГ}}^{**}$ и $dx_{\text{ВПЭГ}}^{**}/dt$. При $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ происходит уменьшение составляющей $dx_{\text{ВПЭГ}}^{**}/dt$ и увеличение $d\hat{\Psi}_{\delta_0}/dx_{\text{ВПЭГ}}^{**}$, что говорит об эффективной работе возвратно-поступательного ЭМПЭ

с СПД и ВПЭГ поперечного типа за счет управления механической и электрической подсистемами энергоустановки. Особую сложность вызывает решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы СПД (см. рис. 1). Сложность решения этой задачи связана с тем, что электромагнитная сила (ЭМС) ($F_{\text{ЭМС}}$) ВПЭГ поперечного типа достигает максимального значения в средней точке рабочего цикла СПД, а минимального – в крайних точках [13, 14]. В то же время движущая сила (F_d) СПД (сила давления газов на поршень в цилиндре (F_p , $F_{\text{сж}}$) и сила инерции масс подвижной части энергоустановки ($F_{\text{и.м}}$)) принимает максимальное значение в крайних положениях поршневой группы СПД [13]. Таким образом, ВПЭГ поперечного типа не способен сформировать ЭМС, действующую на механическую подсистему

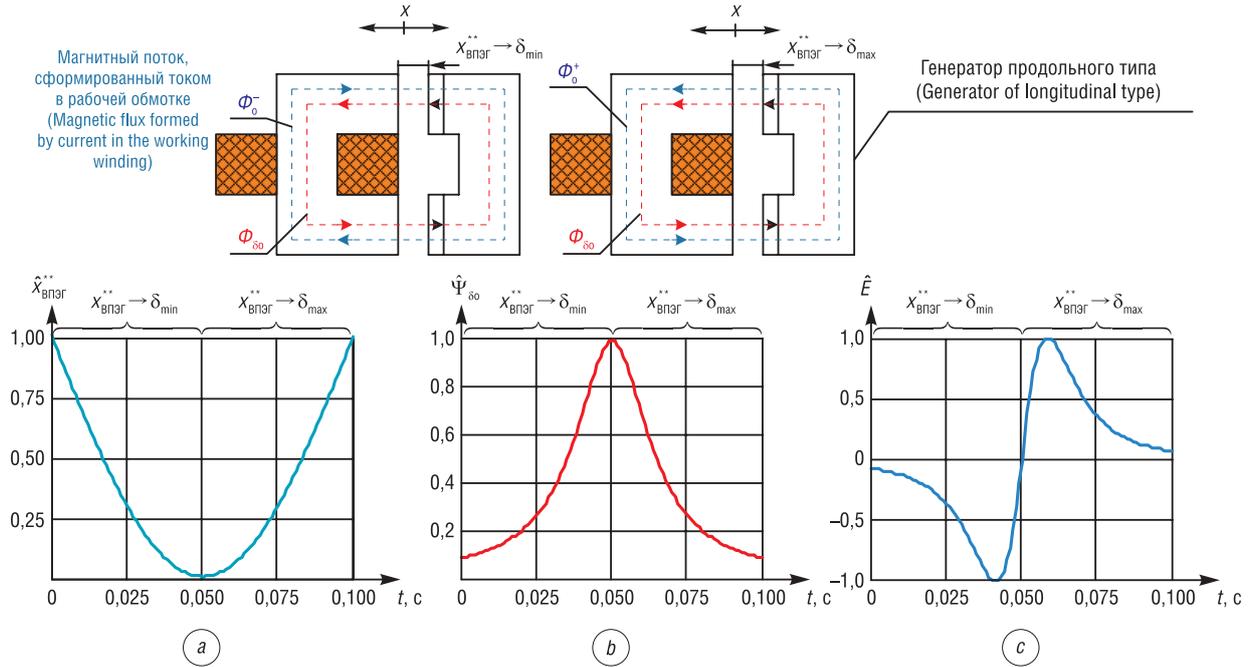


Рис. 3. Временные диаграммы: *a* – координаты подвижной части генератора; *b* – потокоцепления с рабочей обмоткой; *c* – ЭДС движения генератора продольного типа
 Fig. 3. Timing diagram: *a* – coordinates of the moving part of the generator; *b* – the flux linkage with the working winding; *c* – electromotive force of movement of the generator of longitudinal type

продольного типа в крайних положениях рабочего цикла СПД и возможности использования его в качестве электрической машины в энергоустановке с СПД. В связи с этим решение задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки с СПД на всем рабочем цикле будет основано на использовании в электрической подсистеме энергоустановки комбинированного ЭМПЭ возвратно-поступательного типа. Структурная схема механотронного модуля на базе СПД и комбинированного ЭМПЭ возвратно-поступательного типа представлена на рис. 4.

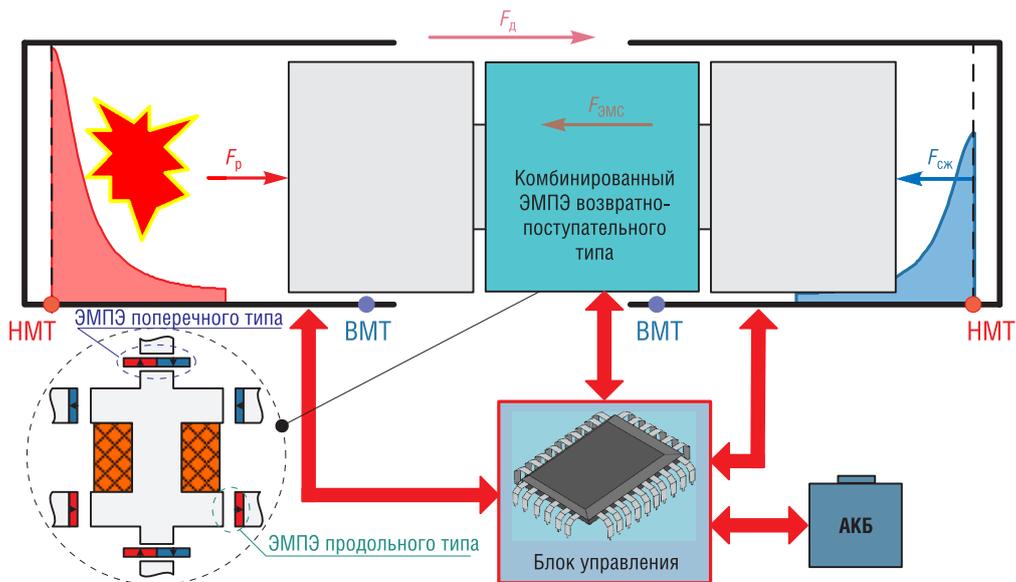


Рис. 4. Структурная схема механотронного модуля на базе СПД и комбинированного ЭМПЭ возвратно-поступательного типа
 Fig. 4. Block diagram of an mechatronic module based on a free piston engine and a combined electromechanical reciprocating energy converter

С целью исследования величины и характера изменения ЭМС, действующей на поршневую группу СПД, разработаны математические модели (ММ) электрической подсистемы энергоустановки для расчета мгновенной ЭМС [13]:

1) для ВПЭГ поперечного типа:

$$F = 2F_M i_k w_k \mu_0 l_{\text{ПМ}} k \sigma^{-1} / (h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + 2\delta), \quad (1)$$

где F_M – магнитодвижущая сила ПМ; i_k – ток k -го контура; w_k – количество витков k -го контура; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; $l_{\text{ПМ}}$ и $h_{\text{ПМ}}$ – соответственно длина и толщина ПМ; k и σ – коэффициенты выпучивания и рассеяния магнитного потока в магнитной системе ВПЭГ поперечного типа; μ_r – внутренняя проницаемость ПМ; δ – величина воздушного зазора;

2) для ВПЭГ продольного типа ЭМС может быть представлена в виде трех составляющих: однополярный 2-полюсный ВПЭГ (ОВПЭГ-2):

$$F_{\text{ОВПЭГ-2}} = \mu_0 S_\delta k' (\sigma')^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h + x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} [F_M^2 + 0,25(i_k w_k)^2 + F_M i_k w_k], \quad (2)$$

разнополярный ВПЭГ (РВПЭГ):

$$F_{1.1} = \begin{cases} -F_M^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h + x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}; \\ F_M^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h - x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}; \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{1.2} = \begin{cases} -4^{-1} (i_k w_k)^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h + x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}; \\ 4^{-1} (i_k w_k)^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h - x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}; \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{1.3} = \begin{cases} F_M i_k w_k \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h + x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}; \\ F_M i_k w_k \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h - x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

где S_δ – площадь поперечного сечения воздушного зазора; k' и σ' – соответственно коэффициенты выпучивания и рассеяния магнитного потока в магнитной системе ВПЭГ продольного типа; h – ход подвижной части ВПЭГ продольного типа; $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 0,5h \sin(2\pi ft)$ – координата перемещения подвижной части ВПЭГ продольного типа; f – частота колебаний подвижной части генератора;

3) для ВПЭГ комбинированного типа:

$$F^* = F + F_{1.1} + F_{1.2} + F_{1.3}, \quad (6)$$

где $F_{1.1}$, $F_{1.2}$, $F_{1.3}$ – ЭМС ВПЭГ продольного типа при $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ и $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$.

Полученные составляющие ЭМС (1)–(5) позволяют записать выражение для расчета ЭМС любого ВПЭГ продольного и комбинированного типов.

Для определения тока k -го контура i_k использовалась уравнения электрического равновесия для k -го контура магнитоэлектрических ВПЭГ на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала [15]:

$$i_k (R_{0k} + R_n) + L_n di_k / dt + (w_k i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS) di_k / dt + i_k w_k d(i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS) / dt + w_k d(S^{-1} \oint A_{zk[F_{m1} \dots F_{mn}, n \neq k]} dS) / dt = 0, \quad (7)$$

где R_{0k} и R_n – соответственно активное сопротивление рабочей обмотки генератора и нагрузки; L_n – индуктивность нагрузки k -го контура; $i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS$ – собственная индуктивность на один виток k -го контура; $S^{-1} \oint A_{zk[F_{m1} \dots F_{mn}, n \neq k]} dS$ – потокосцепление на один виток k -го контура, созданное n -м ПМ.

Совершенство выражений (1)–(7) представляют собой ММ электрической подсистемы энергоустановки с СПД и ВПЭГ для расчета мгновенной ЭМС, действующей со стороны электрической подсистемы энергоустановки на поршневую группу СПД. Проведенные исследования ММ позволили получить величину и характер изменения составляющих ЭМС генераторов продольного типа (рис. 5). Условия моделирования ЭМС: $J = 1 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$ (плотность тока), $B_{st \max} = 1,8 \text{ Тл}$ (максимальная магнитная индукция в МПр), $h = 0,02 \text{ м}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $w_k = 500 \text{ шт.}$, $S_\delta = 0,0004 \text{ м}^2$, $h_{\text{ПМ}} = 0,005 \text{ м}$, $I_k = 2,2 \text{ А}$.

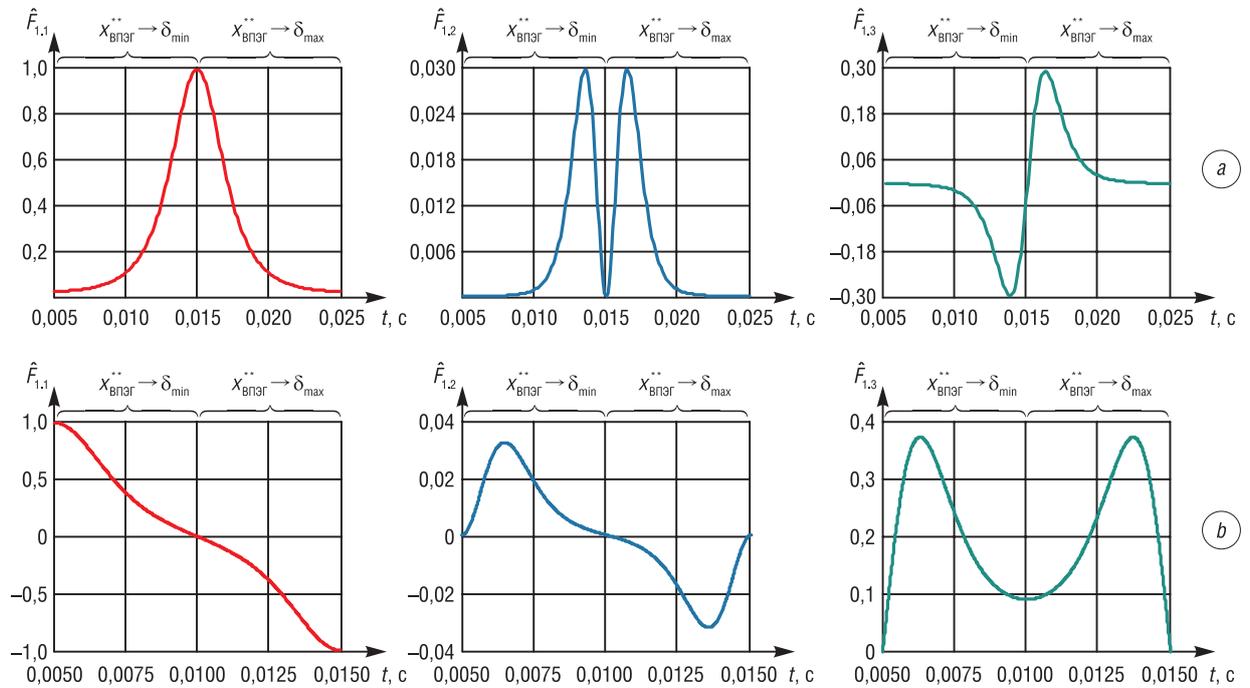


Рис. 5. Временные диаграммы мгновенных значений составляющих ЭМС ВПЭГ: *a* – однополярного 2-полюсного; *b* – разнополярного

Fig. 5. Time diagrams of the instantaneous values of the components of the electromagnetic force of the reciprocating electric generator: *a* – unipolar 2-pole; *b* – bipolar

Временные диаграммы составляющих ЭМС $F_{1.1}$, $F_{1.2}$, $F_{1.3}$ генераторов продольного типа (см. рис. 5) получены при замыкании генераторов на линейную нагрузку. В результате математического моделирования ВПЭГ продольного типа установлено, что: сила $F_{1.1}$ зависит от F_M и $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$; сила $F_{1.2}$ зависит от i_k и $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$; сила $F_{1.3}$ зависит от i_k , F_M и $x_{\text{ВПЭГ}}^{**}$.

Составляющая ЭМС $F_{1.1}$ в процессе преобразования энергии не участвует и является вредной (паразитной) силой. Для ее компенсации предлагается использовать ПМ, размещенные таким образом, что их одноименные полюса обращены друг к другу (рис. 6). Геометрические размеры ПМ выбираются исходя из выполнения условия $|\hat{F}_{1.1}| = |-\hat{F}_{1.1.к}|$ на всем h . Аналогичным способом составляющую ЭМС $F_{1.1}$ можно скомпенсировать и в РВПЭГ. Временные диаграммы составляющих ЭМС в РВПЭГ при скомпенсированной силе $F_{1.1}$ представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что составляющая ЭМС $F_{1.2}$ значительно меньше составляющей ЭМС $F_{1.3}$. В целях более подробного исследования характера действия составляющих $F_{1.2}$ и $F_{1.3}$ ЭМС мною был разработан макет однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа с ПМ (рис. 8). При создании макета использовалась разработанная универсальная методика электромагнитного расчета ВПЭГ с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока.

Макет однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа с ПМ состоит из неподвижной части (1) в виде П-образного МПр с обмоткой (2) и подвижной части (3), представляющей собой также П-образный МПр с ПМ (4), блока питания (5) RFT-3712 (max – 10 А), системы охлаждения (вентилятор) (6). Магнитопроводы набраны из листов электротехнической стали марки Э-31 (толщина листа 0,5 мм). Обмотка выполнена из медного изолированного провода. Количество

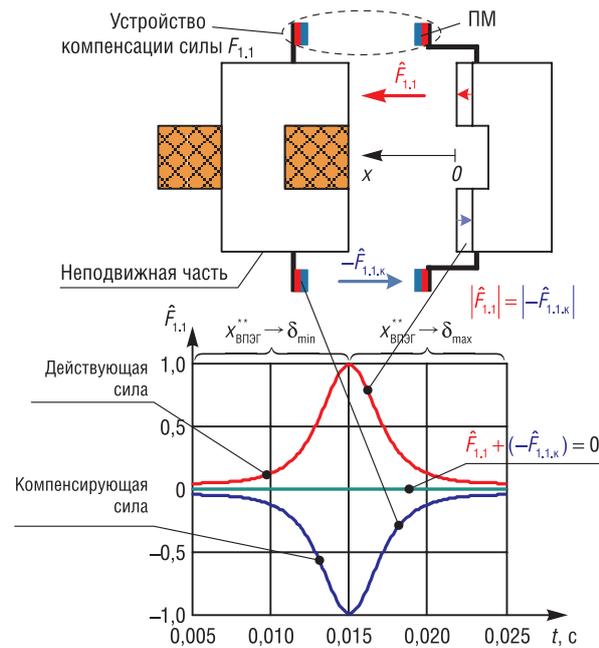


Рис. 6. Временные диаграммы поясняющие способ компенсации силы $F_{1,1}$ ОВПЭГ-2

Fig. 6. Time diagrams explaining the method of power compensation of $F_{1,1}$ unipolar 2-pole reciprocating electric generator

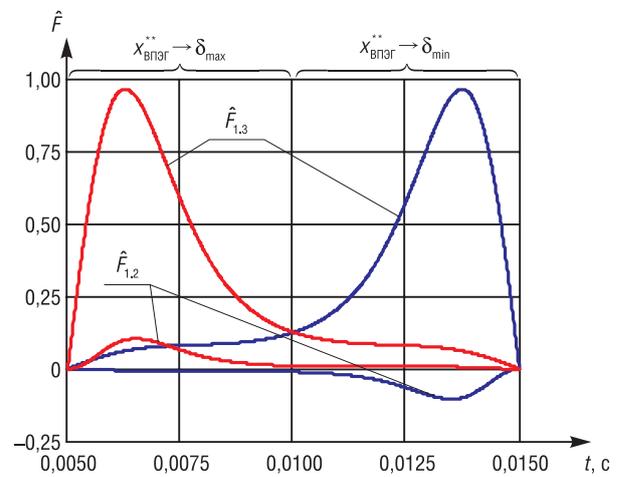


Рис. 7. Временные диаграммы составляющих ЭМС в РВПЭГ при компенсированной силе $F_{1,1}$

Fig. 7. Timing diagram of the components of the electromagnetic forces in opposite reciprocating electric generator with compensated power $F_{1,1}$

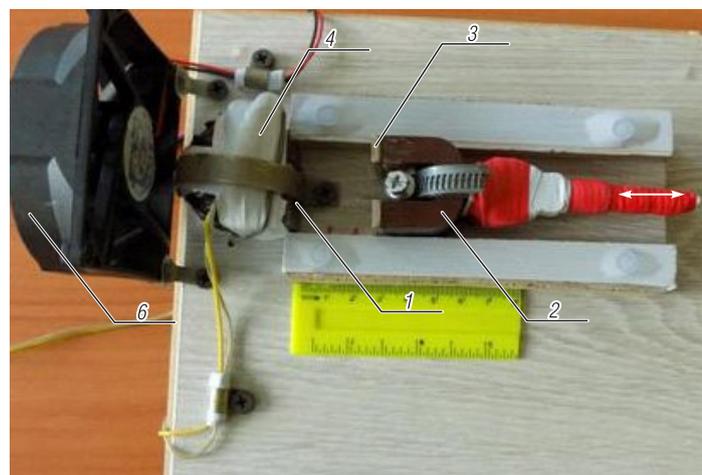
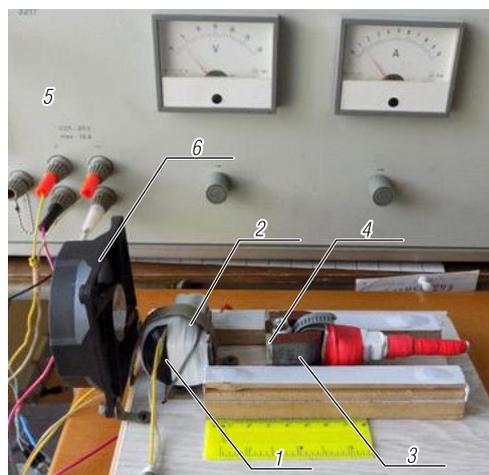


Рис. 8. Внешний вид макета однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа с ПМ

Fig. 8. Appearance of a model of a unipolar 2-pole reciprocating electric generator of longitudinal type with permanent magnets

витков обмотки составляет 300. При $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{min}$ блок питания подключен к обмотке генератора таким образом, что созданное обмоткой магнитное поле противодействует изменению внешнего магнитного поля, в данном случае магнитного поля ПМ (рис. 9, а). А при $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{max}$ блок питания подключен к обмотке генератора таким образом, что созданное обмоткой магнитное поле совпадает по направлению с внешним магнитным полем (рис. 9, б).

В результате экспериментальных исследований макета однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа с ПМ было выявлено, что при $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{min}$ (рис. 9, а) результирующая сила, действующая на подвижную часть генератора, носила тормозной (демпфирующий) характер, а при $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{max}$ результирующая сила – притягивала подвижную часть генератора (рис. 9, б).

С учетом того что при $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ и $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$ сила $F_{1,1}$ притягивает подвижную часть генератора, можно утверждать, что при $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ составляющие $F_{1,2}$, $F_{1,3}$ ЭМС генератора продольного типа носят тормозной характер (отталкивают подвижную часть генератора). Проведенные экспериментальные исследования макета ВПЭГ продольного типа с ПМ подтверждают, что КГ способен обеспечить в крайних положениях поршневой группы СПД суммарную силу тормозного характера и предотвратить аварийный случай – пропуск зажигания рабочей смеси в цилиндре СПД. Временные диаграммы ЭМС КГ при скомпенсированной силе $F_{1,1}$ представлены на рис. 10.

Видно, что КГ за счет наличия продольно изменяющегося магнитного потока способен сформировать ЭМС электрической подсистемы, действующую на механическую подсистему энергоустановки на всем рабочем цикле. Это позволяет обеспечить согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки и выполнить условие непрерывного электромеханического преобразования энергии на всем рабочем цикле. В целях пояснения способа решения задачи согласования сил электрической и механической подсистем на рис. 11 представлены результаты математического моделирования мгновенных сил, действующих на поршневую группу в крайнем положении (такте сжатия) со стороны механической и электрической подсистем при работе генератора на линейную нагрузку (рис. 11, *a, b*) и при изменении тока в цепи генератора (рис. 11, *c, d*).

Показано, что КГ за счет наличия продольно изменяющегося магнитного потока формирует ЭМС \hat{F}^* , которая принимает максимальное значение в крайних положениях поршневой группы СПД. На рис. 11, *a* видно, что при работе генератора на линейную нагрузку составляющие ЭМС $\hat{F}_{1,2}$ и $\hat{F}_{1,3}$ ВПЭГ продольного типа в конце такта сжатия СПД принимают нулевое значение, а составляющая $\hat{F}_{1,1}$ – максимальное. На рис. 11, *b* показано, что это не способно обеспечить в крайнем положении поршневой группы СПД суммарную силу $\hat{F}_{\Sigma 0}$ тормозного характера и предотвратить аварийный случай – пропуск зажигания рабочей смеси в цилиндре СПД. Решение этой проблемы представляется возможным при изменении ЭМС КГ в крайнем положении поршневой группы (рис. 11, *c* и *d*) за счет изменения тока в рабочей обмотке генератора. В ходе теоретических исследований установлено, что управление током в рабочей обмотке КГ возможно при работе его на АВ. Таким образом, проведенные исследования составляющих (1)–(6) ЭМС КГ позволили автору данной статьи выработать практические рекомендации по применению КГ возвратно-поступательного типа в энергоустановках на базе СПД.

На основе ММ электрической (1)–(7) и механической (отчет о НИР №566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи») (Минск, 2018)) подсистем энергоустановки с СПД и КГ мною разработана имитационная модель механотронного модуля на базе СПД и КГ с АВ, структурная схема которой представлена на рис. 12.

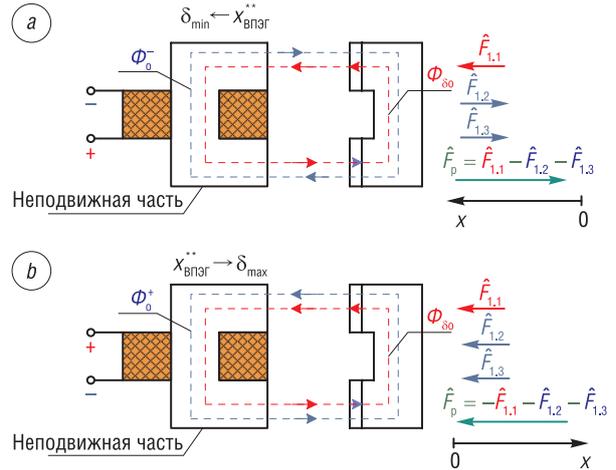


Рис. 9. Характер действия составляющих ЭМС ОВПЭГ-2 при: *a* – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$; *b* – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$

Fig. 9. The nature of the components of the electromagnetic force of the unipolar 2-pole reciprocating electric generator of the longitudinal type at: *a* – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$; *b* – $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$

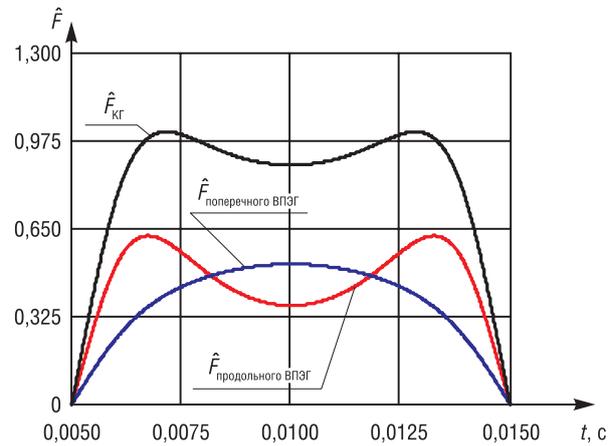


Рис. 10. Временные диаграммы ЭМС КГ при скомпенсированной силе $F_{1,1}$

Fig. 10. Time diagrams of the electromagnetic force of the combined generator at the compensated force $F_{1,1}$

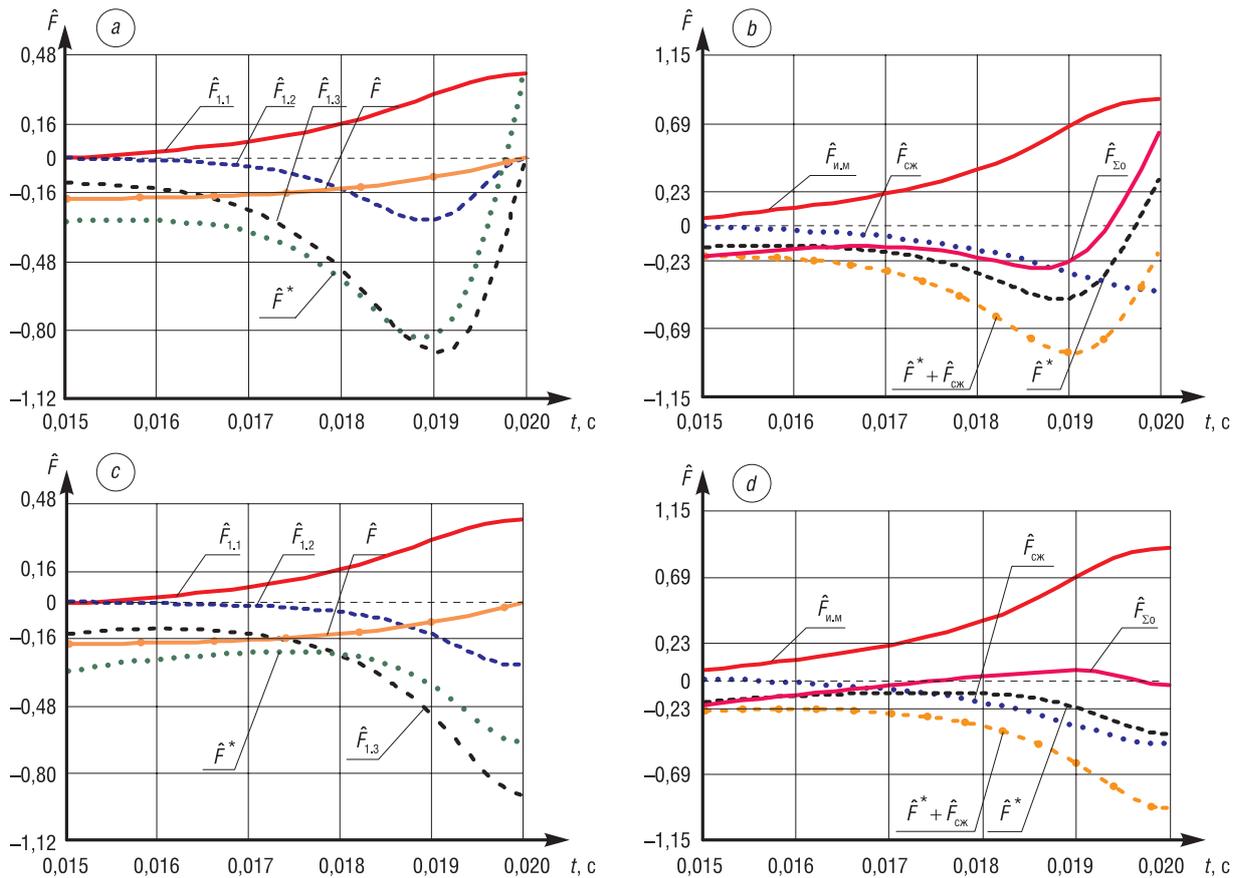


Рис. 11. Временные диаграммы мгновенных сил в крайнем положении поршневой группы (такте сжатия) СПД: *a, b* – при работе генератора на линейную нагрузку; *c, d* – при изменении тока в цепи генератора

Fig. 11. Time diagrams of instantaneous forces in the extreme position of the piston group (compression stroke) of the free piston engine: *a, b* – when the generator is running on a linear load; *c, d* – when the current in the generator circuit changes

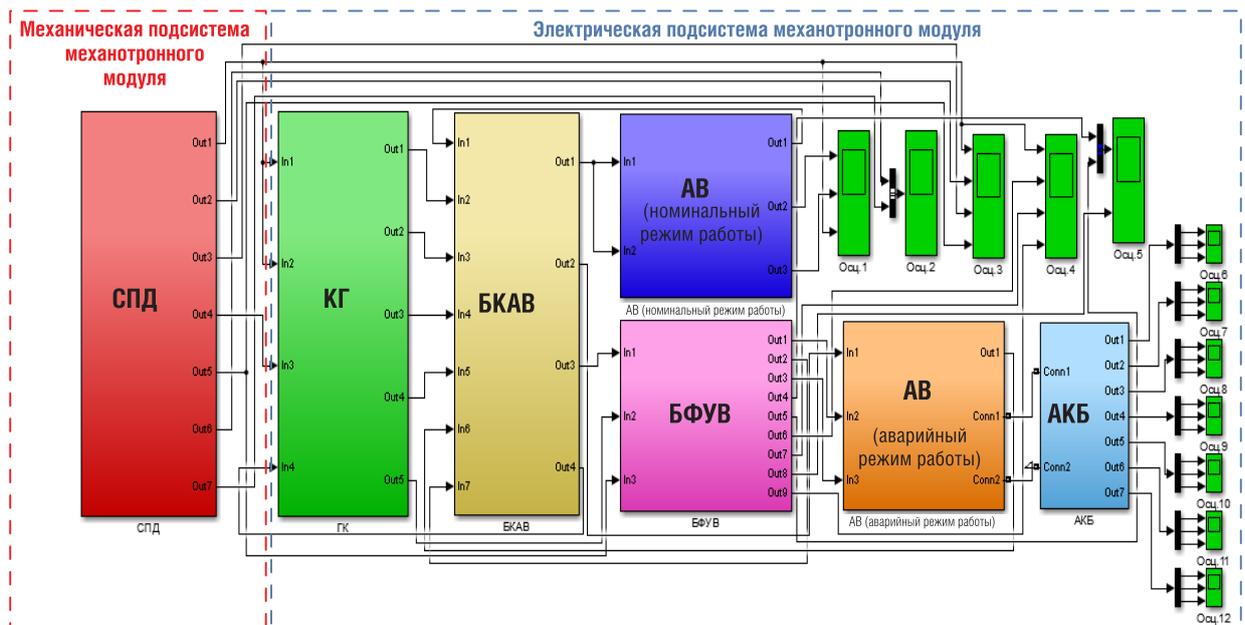


Рис. 12. Структурная схема имитационной модели механотронного модуля: БКАВ – блок коммутации активного выпрямителя; БФУВ – блок формирования управляющего воздействия; АКБ – аккумуляторная батарея

Fig. 12. Block diagram of mechatronic module simulation model: БКАВ – active rectifier switching unit; БФУВ – control action forming unit; АКБ – accumulator battery

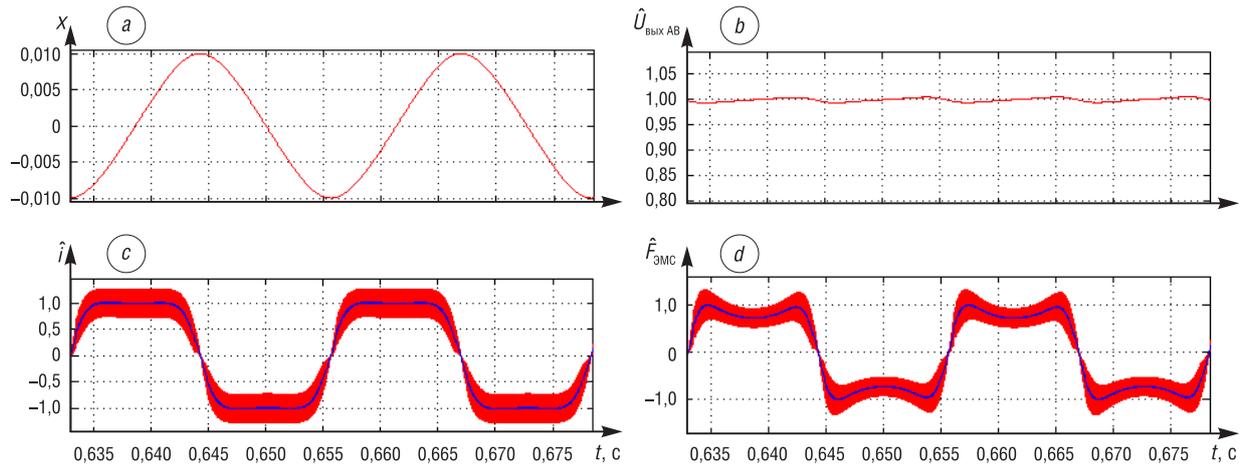


Рис. 13. Временные диаграммы: *a* – координаты перемещения поршневой группы; *b* – напряжения на выходе АВ; *c* – тока в рабочей обмотке КГ; *d* – ЭМС, действующей на поршневую группу со стороны электрической подсистемы
 Fig. 13. Timing diagram: *a* – the coordinates of the moving piston group; *b* – output voltage of the active rectifier; *c* – current in the working winding of the combined generator; *d* – electromagnetic force acting on the piston group from the electrical subsystem

В результате математического моделирования мехатронного модуля получены временные диаграммы: координаты перемещения поршневой группы (рис. 13, *a*), напряжения на выходе АВ (рис. 13, *b*), тока в рабочей обмотке КГ (рис. 13, *c*) и ЭМС, действующей на поршневую группу со стороны электрической подсистемы (рис. 13, *d*).

Из результатов математического моделирования (рис. 13, *b*) видно, что АВ позволяет получить на выходе энергоустановки с КГ постоянное напряжение, размах пульсаций которого не превышает 4%. Кроме того, из рис. 13, *a*, *d* видно, что ЭМС электрической подсистемы действует на механическую подсистему энергоустановки на всем рабочем цикле, что позволяет выполнить условие непрерывного электромеханического преобразования энергии на всем рабочем цикле, а также обеспечить согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки и устранить основные недостатки энергоустановки с СПД (поломку при пропуске зажигания рабочей смеси и неустойчивость работы при значительных колебаниях нагрузки).

Разработка системы управления компенсацией сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы. В силу того что особую сложность вызывает решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы СПД, на рис. 14 представлена

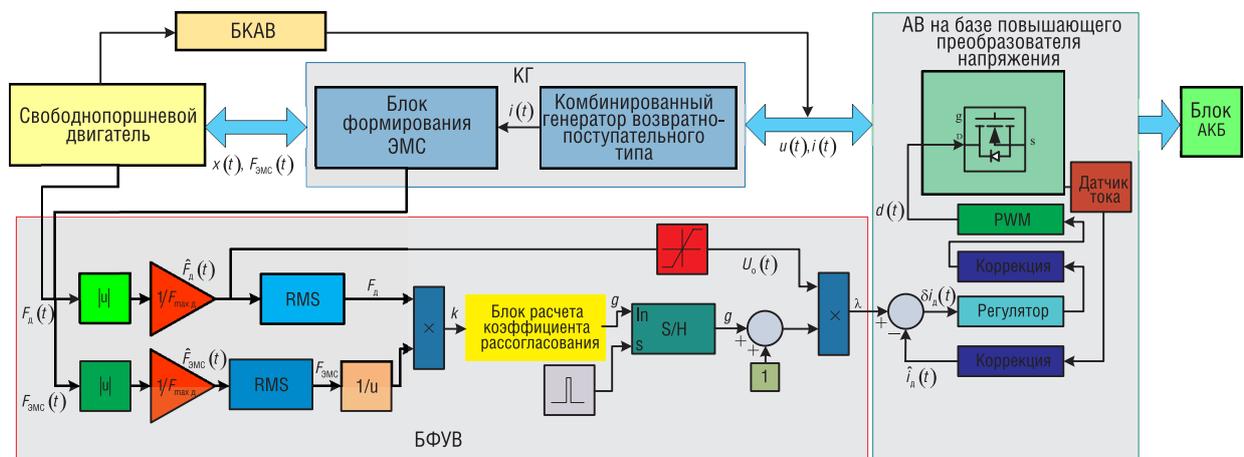


Рис. 14. Структурная схема имитационной модели мехатронного модуля при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы
 Fig. 14. Block diagram of the mechatronic module simulation model for compensation of power mismatch between electrical and mechanical subsystems of the power plant in the extreme positions of the piston group

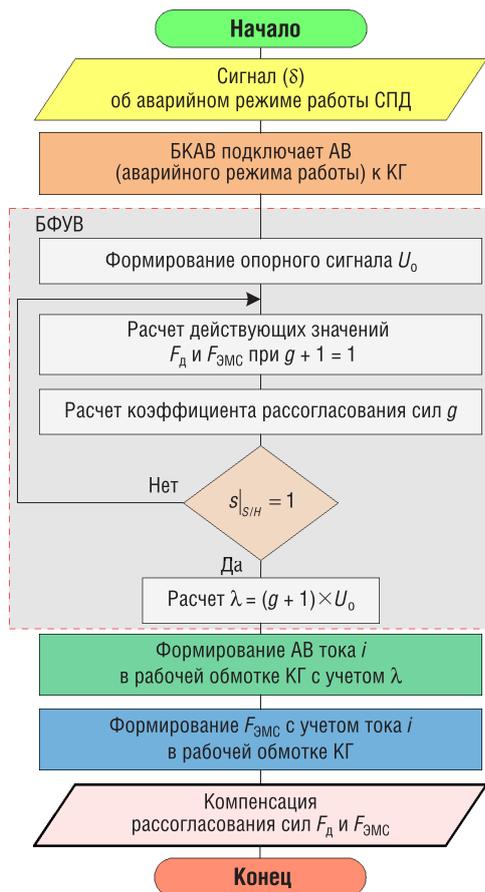


Рис. 15. Блок-схема алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы при аварийном режиме работы СПД

Fig. 15. Block diagram of the compensation algorithm for the misalignment of the electrical and mechanical subsystems of the power plant in the extreme positions of the piston group in the emergency operation of the free piston engine

разработанная автором данной статьи структурная схема имитационной модели механотронного модуля при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы в аварийном режиме работы СПД.

Блок-схема алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы при аварийном режиме работы СПД представлена на рис. 15.

К пояснению алгоритма компенсации. Опорный сигнал $U_0(t)$ совпадает по форме с $\hat{F}_d(t)$. Это позволяет обеспечить в цепи генератора ток $i(t)$, а следовательно, и $F_{ЭМС}(t)$, согласованные во времени с $F_d(t)$. Расчет действующих значений сил осуществляется при $\lambda(t) = 1 \cdot U_0(t)$. Расчет коэффициента рассогласования сил g осуществляется в блоке расчета коэффициента рассогласования (рис. 14). Блок расчета коэффициента рассогласования построен на основе полинома n -й степени. Полином получен при аппроксимации рассчитанных по имитационной модели (рис. 16) коэффициентов рассогласования сил g , в результате многократного машинного анализа функционирования механотронного модуля при аварийном режиме работы СПД. Блок-схема алгоритма расчета коэффициентов рассогласования представлена на рис. 17.

Полученный полином позволяет по отношению действующих значений сил $F_d(t)$ и $F_{ЭМС}(t)$ найти коэффициент рассогласования сил g , обеспечивающий компенсацию сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы при аварийном режиме работы СПД. Степень полинома определяет точность расчета коэффициента рассогласования сил g .

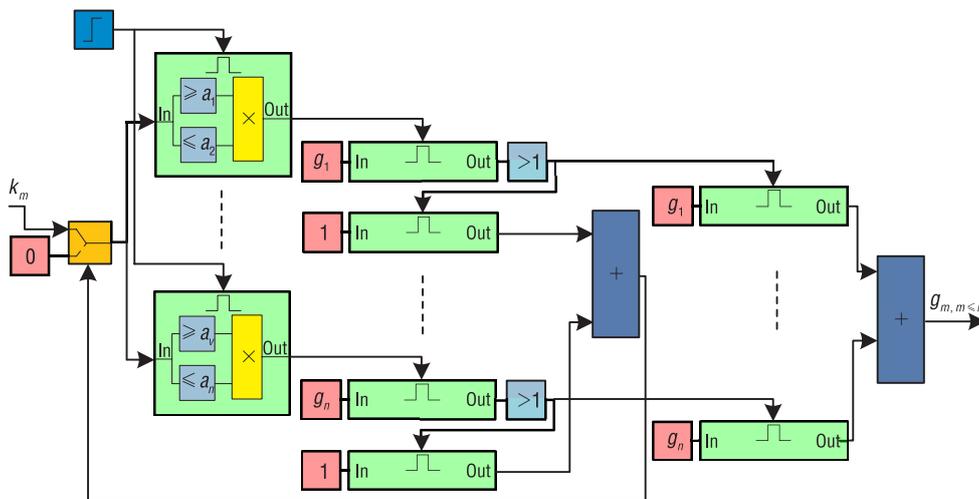


Рис. 16. Структурная схема имитационной модели для расчета коэффициентов рассогласования
 Fig. 16. Structural diagram of a simulation model to calculate the coefficients of the error

Затем при $s|_{S/H} = 1$ (начало торможения) рассчитывается $\lambda(t) = (g + 1) \cdot U_0(t)$. На основании полученной $\lambda(t)$ АВ формирует ток в рабочей обмотке генератора, форма которого совпадает с формой $U_0(t)$, а амплитуда увеличивается пропорционально $(g + 1)$. Затем блок формирования ЭМС на основании тока $i(t)$ формирует ЭМС, которая компенсирует рассогласование сил энергоустановки. В качестве примера на рис. 18 представлены результаты математического моделирования механотронного модуля в режиме компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в энергоустановки.

Видно, что механотронный модуль на базе СПД и КГ с АВ в режиме компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем способен эффективно скомпенсировать в крайних положениях поршневой группы движущую силу СПД. Это в аварийном режиме работы СПД позволит затормозить поршневую группу и тем самым предотвратить повреждение поршневой группы и цилиндра. При этом в момент торможения подвижной части ЭМС электрическая энергия частично запасается в АКБ.

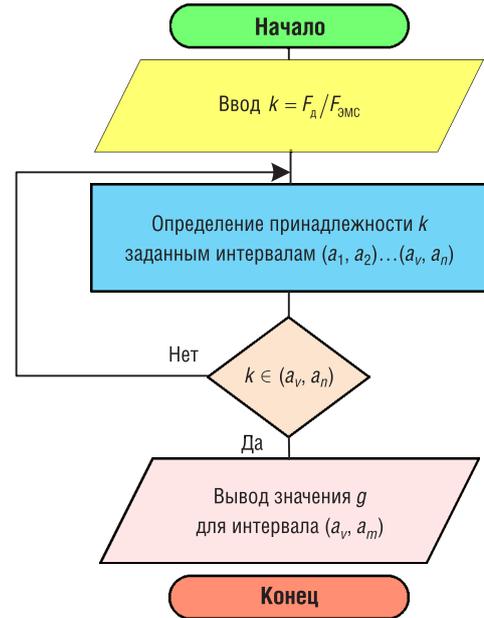


Рис. 17. Блок-схема алгоритма расчета коэффициентов рассогласования

Fig. 17. Block diagram of the algorithm for calculating the coefficients of misalignment

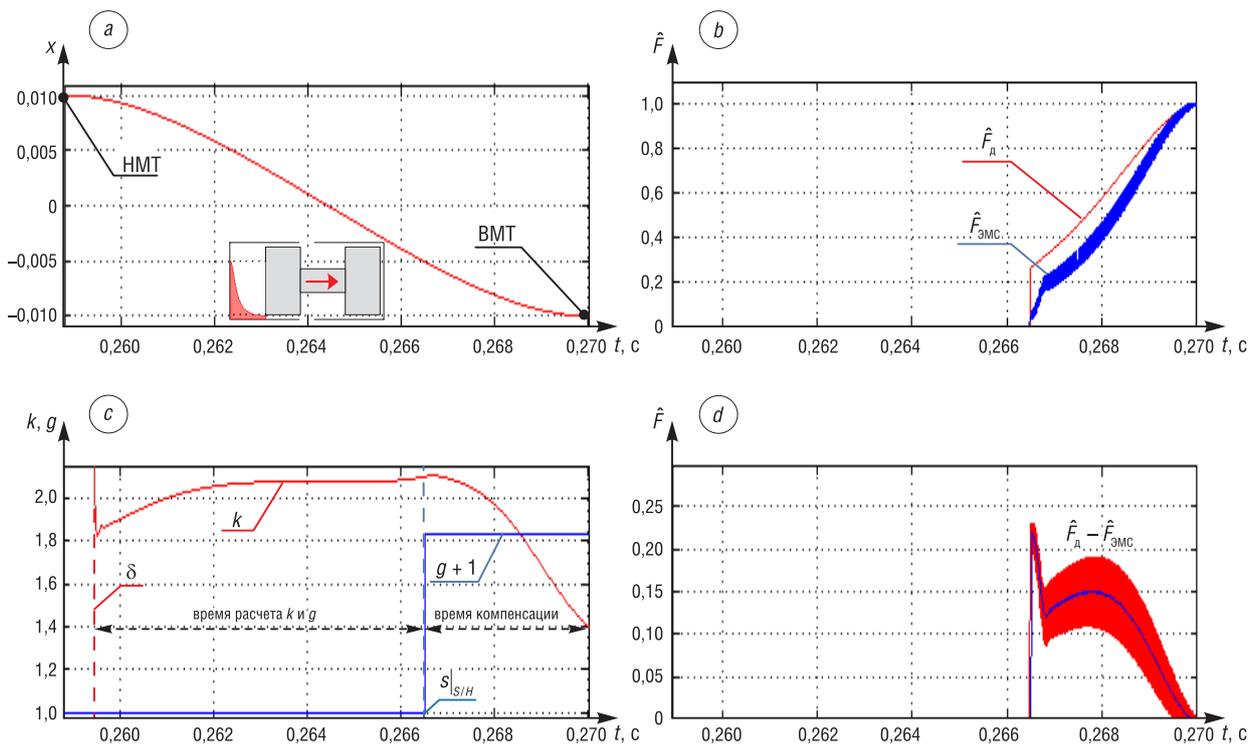


Рис. 18. Временные диаграммы, поясняющие процесс компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы при аварийном режиме работы СПД: *a* – координаты перемещения поршневой группы; *b* – сил действующих со стороны механической и электрической подсистем; *c* – управляющих сигналов и коэффициента рассогласования; *d* – разность сил механической и электрической подсистем

Fig. 18. Time diagrams explaining the process of compensation of misalignment of forces of electrical and mechanical subsystems of the power plant in the extreme positions of the piston group in emergency operation of the free piston engine: *a* – coordinates of movement of the piston group; *b* – forces acting on the part of mechanical and electrical subsystems; *c* – control signals and the coefficient of misalignment; *d* – the difference between the forces of mechanical and electrical subsystems

Таким образом, в результате проведенных исследований: обоснована возможность применения ЭМПЭ возвратно-поступательного типа с продольным нелинейным изменением магнитного потока в энергоустановке с СПД; обосновано, что КГ возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока, работающий на АВ, позволяет сформировать в электрической подсистеме энергоустановки ЭМС, согласованную во времени с силами механической подсистемы энергоустановки на всем рабочем цикле; разработан способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем на всем рабочем цикле, отличающийся использованием в электрической подсистеме энергоустановки электромеханического преобразователя энергии возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки на всем рабочем цикле позволяет обеспечить выполнение условия непрерывного электромеханического преобразования энергии на всем рабочем цикле.

Оценка эффективности. В целях определения эффективности разработанного способа решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки с СПД на всем рабочем цикле проведена оценка удельной массы и КПД КГ с Ж-образным МПр по отношению к ВПЭГ поперечного типа (с С-образным МПр, Ж-образным МПр, с кольцевым и сдвоенным МПр) при одинаковых электромагнитных нагрузках (отчет о НИР № 566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи»). Исходные данные для оценки удельной массы и КПД КГ представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Исходные данные для оценки удельной массы и КПД КГ

Table 1. Initial data for estimating the specific gravity and efficiency of the combined generator

Параметр	Значение
Максимальное значение плотности тока, А/м ²	1 · 10 ⁷
Максимальное значение магнитной индукции в МПр, Тл	1,8
Номинальное напряжение на зажимах генератора, В	220
Минимальный воздушный зазор, мм	0,5
Рабочий ход, мм	25
Частота колебания, Гц	100
Шаг перемещения подвижной части генератор Δx _т , мм	0,04

Для оценки удельной массы и КПД КГ мною разработана имитационная модель КГ с общим МПр, а также ВПЭГ продольного типа, структурная схема которой представлена на рис. 19.

Приращение КПД КГ рассчитывается следующим образом:

$$\Delta\eta = (\eta_{\text{КГ}}/\eta_{\text{поп}} - 1)100 \%, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{КГ}}$ – КПД КГ; $\eta_{\text{поп}}$ – КПД ВПЭГ поперечного типа.

Уменьшение удельной массы КГ составляет:

$$\Delta M_{\text{уд}} = M_{\text{уд.поп}}/M_{\text{уд.КГ}}, \quad (9)$$

где $M_{\text{уд.поп}}$ – удельная масса ВПЭГ поперечного типа; $M_{\text{уд.КГ}}$ – удельная масса КГ.

С учетом исходных данных (см. табл. 1) в мощностном диапазоне 300–1500 Вт с шагом 100 Вт для рассматриваемых типов генераторов рассчитаны $\Delta M_{\text{уд}}$ и $\Delta\eta$. Этапы расчета $\Delta M_{\text{уд}}$ и $\Delta\eta$: электромагнитный расчет рассматриваемых типов генераторов по разработанной универсальной методике (отчет о НИР № 566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи» (Минск, 2018)); на основе полученных результатов с помощью

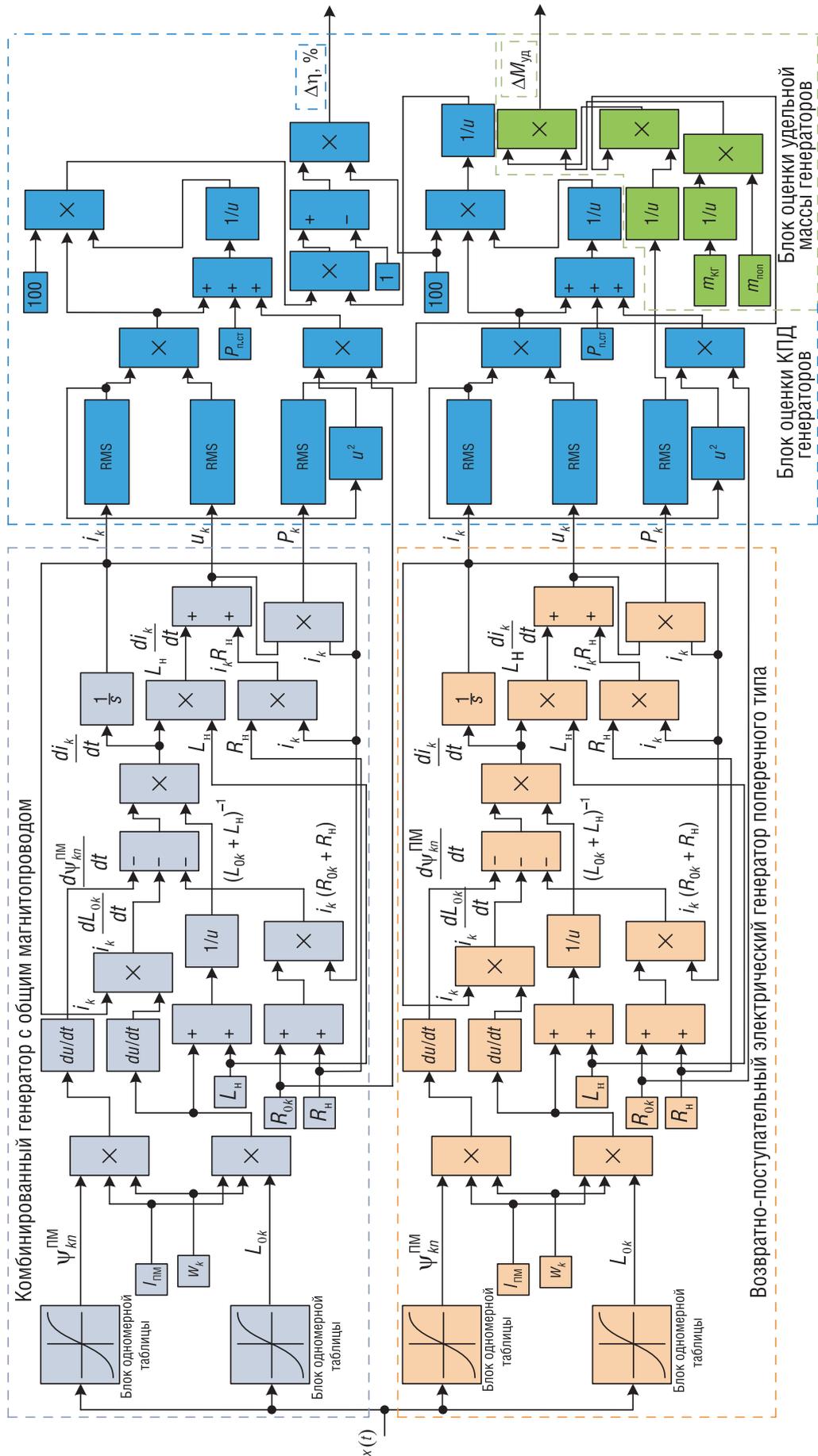


Рис. 19. Структурная схема имитационной модели для оценки КПД с общим МПР и ВПЭГ поперечного типа. Ψ_{kn}^{PM} – потокоцепление k -го контура, обусловленное n -м ПМ, $n \neq k$; L_{0k} – собственная индуктивность k -го контура; m_{KT} – масса ВПЭГ поперечного типа; $P_{п.ст}$ – мощность потерь в стали МПР генератора

Fig. 19. Structural diagram of a simulation model to estimate the combined generator General generator yoke and cross type: Ψ_{kn}^{PM} – flux linkage of the k^{th} loop due to the n^{th} permanent magnet, $n \neq k$; L_{0k} – self-inductance of the k^{th} circuit; m_{KT} – mass of reciprocating transverse type electric generator; $P_{п.ст}$ – power losses in the steel of the magnetic circuit of the generator

разработанной имитационной модели (см. рис. 19) для рассматриваемых типов генераторов рассчитаны $\Delta M_{уд}$ и $\Delta \eta$. Результаты расчета $\Delta M_{уд}$ и $\Delta \eta$ сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета $\Delta M_{уд}$ и $\Delta \eta$
T a b l e 2. Result of calculation $\Delta M_{уд}$ и $\Delta \eta$

КГ с Ж-образным МПр	ВПЭГ поперечного типа							
	с С-образным МПр		с Ж-образным МПр		с кольцевым МПр		сдвоенный	
	$\Delta M_{уд}, \%$	$\Delta \eta, \%$	$\Delta M_{уд}, \%$	$\Delta \eta, \%$	$\Delta M_{уд}, \%$	$\Delta \eta, \%$	$\Delta M_{уд}, \%$	$\Delta \eta, \%$
300–400 Вт	13,14	3,14	13,24	3,21	13,41	2,91	13,40	2,92
400–500 Вт	13,23	3,15	13,26	3,22	13,44	2,92	13,43	2,93
500–600 Вт	13,14	3,16	13,28	3,23	13,46	2,93	13,45	2,94
600–700 Вт	13,18	3,17	13,29	3,24	13,48	2,94	13,46	2,95
700–800 Вт	13,21	3,18	13,27	3,24	13,52	2,94	13,50	2,96
800–900 Вт	13,27	3,17	13,26	3,25	13,55	2,95	13,51	2,97
900–1000 Вт	13,26	3,16	13,27	3,25	13,60	2,95	13,54	2,97
1000–1100 Вт	13,24	3,15	13,28	3,24	13,58	2,94	13,52	2,96
1100–1200 Вт	13,25	3,15	13,27	3,23	13,55	2,93	13,50	2,95
1200–1300 Вт	13,25	3,14	13,24	3,22	13,51	2,92	13,49	2,94
1300–1400 Вт	13,24	3,13	13,23	3,21	13,50	2,91	13,49	2,93
1400–1500 Вт	13,21	3,13	13,21	3,20	13,47	2,90	13,45	2,91

Проведенные вычислительные эксперименты (см. табл. 2) позволили определить, что уменьшение удельной массы КГ возвратно-поступательного типа составляет не более 13,6 % с одновременным повышением КПД генераторов не более чем на 3,3 % по сравнению с ВПЭГ поперечного типа (с С-образным МПр, Ж-образным МПр, с кольцевым и сдвоенным МПр) при одинаковых электромагнитных нагрузках.

Заключение. В целях оценки эффективности применения энергоустановки с КГ возвратно-поступательного типа в АСЭС мобильных средств специального назначения автором настоящей статьи была разработана методика оценки приращения времени непрерывной работы АСЭС (отчет о НИР № 566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи» (Минск, 2018)). Отличительной особенностью данной методики является использование показателя «освобожденная (высвобожденная) масса» для расчета запаса топлива АСЭС. Предложенный показатель позволил учесть влияние удельной массы и КПД КГ возвратно-поступательного типа на общую массу АСЭС мобильных средств специального назначения с учетом запаса топлива. На основе разработанной методики была проведена оценка приращения времени непрерывной работы АСЭС мобильных средств специального назначения (на примере мобильных средств военной связи). В результате анализа (отчет о НИР № 566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи» (Минск, 2018)) установлено, что применение в мобильных средствах военной связи энергоустановки с КГ возвратно-поступательного типа, позволяет увеличить время непрерывной работы АСЭС мобильных средств военной связи до 3,5 раз.

Таким образом, разработанный автором способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки с СПД на всем рабочем цикле, отличающийся использованием в электрической подсистеме энергоустановки ЭМПЭ возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока, позволяет уменьшить удельную массу электрической подсистемы энергоустановки не более чем на 13,6 % при одновременном повышении КПД не более чем на 3,3 %. Данное решение увеличивает время непрерывной работы АСЭС мобильных средств специального назначения (мобильных средств военной связи) до 3,5 раз.

Список использованных источников

1. Пинский, Ф.И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф.И. Пинский // Мобильная техника. – 2004. – №2. – С. 13–17.
2. Sawthorne, W.R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine / W.R. Sawthorne. – Morgantown, 1999. – 113 p.
3. Темнов, Э.С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы: дис. ... канд. техн. наук / Э.С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 л.
4. Петриченко, Д.А. Подход к электромеханическому управлению крайними положениями поршня в свободнопоршневом генераторе / Д.А. Петриченко, Л.Ю. Лежнев // Достижения вуз. науки. – 2014. – №12. – С. 109–117.
5. Татарников, А.П. Разработка свободнопоршневой энергоустановки на базе двухтактного двигателя и линейных электрических машин / А.П. Татарников // Новая наука: стратегии и векторы развития. – 2016. – №5-2. – С. 256–265.
6. Dynamic modeling of a SI/HCCI free-piston engine generator with electric mechanical valves / C.J. Chiang [et al.] // Appl. Energy. – 2013. – Vol. 102. – P. 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.033>
7. Hanipah, M.R. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications / M.R. Hanipah, R. Mikalsen, A.P. Roskilly // Appl. Therm. Eng. – 2015. – Vol. 75. – P. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>
8. Li, Q.F. Simulation of a two-stroke free-piston engine for electrical power generation / Q.F. Li, J. Xiao, Z. Huang // Energy Fuels. – 2008. – Vol. 22, iss. 5. – P. 3443–3449. <https://doi.org/10.1021/ef800217k>
9. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation / J. Mao [et al.] // Appl. Energy. – 2011. – Vol. 88, iss. 4. – P. 1140–1152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.003>
10. The operation of free piston linear generator engine using MOSFET and IGBT drivers / A.A. Ibrahim [et al.] // J. Appl. Sci. – 2011. – Vol. 11, №10. – P. 1791–1796. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1791.1796>
11. Mikalsen, R. The control of a free-piston engine generator. Part 2: Engine dynamics and piston motion control / R. Mikalsen, A. Roskilly // Appl. Energy. – 2010. – Vol. 87, iss. 4. – P. 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.035>
12. The free-piston linear generator potentials and challenges / F. Kock [et al.] // MTZ Worldwide. – 2013. – Vol. 74, №10. – P. 38–43. <https://doi.org/10.1007/s38313-013-0099-z>
13. Менжинский, А.Б. Применение возвратно-поступательного генератора комбинированной конструкции для повышения КПД и уменьшения удельной массы энергоустановок автономных образцов вооружения / А.Б. Менжинский, А.Н. Малашин, И.В. Митянов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – №4. – С. 62–72.
14. Хитерер, М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: учеб. пособие / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. – СПб.: Корона принт, 2013. – 357 с.
15. Менжинский, А.Б. Математическая модель генератора комбинированной конструкции возвратно-поступательного типа / А.Б. Менжинский, А.Н. Малашин, Ю.Г. Коваль // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2018. – №2. – С. 74–85.

References

1. Pinski F. I. Power plants with free piston engine generators. *Mobil'naya Tekhnika* [Mobile Technology], 2004, no. 2, pp. 13–17 (in Russian).
2. Sawthorne, W. R. *Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine*. Morgantown, 1999. 113 p.
3. Temnov E. S. *Development of theoretical bases for the calculation and design of small-sized engine-generator sets as a single dynamic system*. Tula, 2005. 134 p. (in Russian).
4. Petrichenko D. A., Lezhnev L. J. The electromechanical approach to the management of the extreme positions of the piston free piston generator. *Dostizhenia vyzovskoi nauki = Achievements of High School Science*, 2014, no. 12, pp. 109–117 (in Russian).
5. Tatarnikov A. P. Development of a free-piston power plant based on a two-stroke engine and linear electric machines. *Novai nauka: strategii i vektori razvitiia = New science: strategies and vectors of development*, 2016, no. 5–2, pp. 256–265 (in Russian).
6. Chia-Jui Chiang, Jing-Long Yang, Shao-Ya Lan, Tsung-Wei Shei, Wen-Shu Chiang, Bo-Liang Chen. Dynamic modeling of a SI/HCCI free-piston engine generator with electric mechanical valves. *Applied Energy*, 2013, vol. 102, pp. 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.033>
7. Hanipah M. R., Mikalsen R., Roskilly A. P. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 75, pp. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>
8. Li Q. F., Xiao J., Huang Z. Simulation of a two-stroke free-piston engine for electrical power generation. *Energy and Fuels*, 2008, vol. 22, iss. 5, pp. 3443–3449. <https://doi.org/10.1021/ef800217k>
9. Mao J., Zuo Z., Li W., Feng H. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, iss. 4, pp. 1140–1152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.003>

10. Ibrahim A. A., Aziz A. R. A., Abi E. Z. B. Z., Zulkifli S. A. The operation of free piston linear generator engine using MOSFET and IGBT drivers. *Journal of Applied Sciences*, 2011, vol. 11, iss. 10, pp. 1791–1796. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1791.1796>
11. Mikalsen R., Roskilly A. The control of a free-piston engine generator. Part 2: Engine dynamics and piston motion control. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, iss. 4, pp. 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.035>
12. Kock F., Heron A., Rinderknecht F., Friedrich H. E. The free-piston linear generator potentials and challenges. *MTZ Worldwide*, 2013, vol. 74, no. 10, pp. 38–43. <https://doi.org/10.1007/s38313-013-0099-z>
13. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Mityanov I. V. The use of a reciprocating generator of a combined design to increase the efficiency and reduce the specific weight of power plants of autonomous weapons. *Vestnik VoЕННОI akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2017, no. 4, pp. 62–72 (in Russian).
14. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. *Synchronous Electric Reciprocating Machines*. St. Petersburg, Korona-print Publ., 2013. 368 p. (in Russian).
15. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Koval J. G., Mathematical model of the generator of the combined design of reciprocating type. *Vestnik Gomelskogo technicheskogo universiteta = Bulletin of Gomel State Technical University*, 2018, no. 2, pp. 74–85 (in Russian).

Информация об авторе

Менжинский Андрей Борисович – старший преподаватель, кафедра электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volna05011990@mail.ru

Information about the authors

Andrei B. Menzhinsky – Senior Lecturer, Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057 Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volna05011990@mail.ru

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 662.711.4
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331>

Поступила в редакцию 20.06.2019
Received 20.06.2019

М. В. Малько, С. В. Василевич

Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

КИНЕТИКА ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Обсуждаются результаты кинетического исследования пиролиза древесной биомассы (древесина дуба обыкновенного – *Quercus robur*) в статических условиях при температурах 673, 773 и 873 К. В опытах образцы массой порядка 1,4 г выдерживались в нагревательной печи на протяжении некоторого промежутка времени, после чего измерялась их остаточная масса и определялась достигнутая степень разложения. Всего выполнено семь серий опытов: по две серии при температурах 673 и 873 К и три серии при температуре 773 К. Полученные результаты анализировались в рамках одностадийной химической реакции, приводящей к потере исходной массы. Установлено, что с феноменологической точки зрения пиролиз древесной биомассы в условиях опытов соответствует сигмоидальной реакционной модели Авраами–Ерофеева с показателем степени n , изменяющимся в пределах от 0,508 до 0,985. Анализ результатов первых серий опытов привел к значению энергии активации, равному 57,2 кДж/моль, и значению предэкспоненциального фактора, равному 38 с^{-1} . Другие серии опытов дали значение энергии активации, равное 64,9 кДж/моль, и значение предэкспоненциального фактора, равное 130 с^{-1} . Показано, что использование этих значений энергии активации и предэкспоненциального фактора приводит к согласию расчетных значений степени разложения изученных образцов биомассы с экспериментальными в интервале значений степени разложения от 0 до 1. Представленные в работе данные способствуют более полному пониманию кинетики пиролиза биомассы, что необходимо для разработки эффективного оборудования для термохимической переработки растительного сырья.

Ключевые слова: пиролиз, древесная биомасса, кинетика, уравнение Авраами–Ерофеева, аррениусовские параметры

Для цитирования: Малько, М. В. Кинетика пиролиза древесной биомассы в изотермических условиях / М. В. Малько, С. В. Василевич // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 321–331. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331>

M. V. Malko, S. V. Vasilevich

Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

KINETICS OF PYROLYSIS OF WOOD BIOMASS UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS

Abstract. The paper discusses the results of a kinetic study of the pyrolysis of woody biomass (ordinary oak wood – *Quercus robur*) under static conditions at temperatures of 673, 773 and 873 K. In experiments, biomass samples weighing about 1.4 g were kept in a heating furnace for a certain period, after which their residual weight was measured and the degree of decomposition achieved was determined. A total of 7 series of experiments were performed: two series each at temperatures of 673 and 873 K and three series at a temperature of 773 K. The obtained results were analyzed in the framework of a single-stage chemical reaction (one-step global model), leading to a loss of the initial mass. It was established that from the phenomenological point of view, the pyrolysis of woody biomass under experimental conditions corresponds to the sigmoidal reaction model by Avrami–Erofeev with an exponent n ranging from 0.508 to 0.985. The use of the results of the first series of experiments led to an activation energy value of 57.2 kJ/mol and a pre-exponential factor value of 38 s^{-1} . The other series

of experiments gave an activation energy value of 64.9 kJ/mol and a preexponential factor value of 130 s^{-1} . It is shown that the use of these values of the activation energy and the preexponential factor leads to agreement of the calculated values of the degree of decomposition of the studied biomass samples with the experimental ones in the range of values of the degree of decomposition from 0 to 1. The data presented in this work contribute to a more complete understanding of the kinetics of pyrolysis of biomass, which is necessary for the development of effective equipment for the thermochemical processing of vegetable raw materials.

Keywords: pyrolysis, woody biomass, kinetics, Avarami–Erofeev equation, Arrhenius parameters

For citation: Malko M. V., Vasilevich S.V. Kinetics of pyrolysis of wood biomass under isothermal conditions. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 321–331 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331>

Введение. Получение топлива из биомассы представляет большое значение для стран, которые не имеют собственных ресурсов ископаемого топлива, так как это позволяет смягчить зависимость от его поставок. Биомасса доступна практически в каждой стране, и ее эффективное применение в качестве топлива имеет важное социально-экономическое значение. Использование в количестве, не превышающем ее ежегодный прирост, нейтрально в отношении выбросов диоксида углерода в атмосферу, что способствует снижению выбросов этого парникового газа, а следовательно, соответствует решению проблемы предотвращения экологической катастрофы на нашей планете. Отмеченные особенности являются причиной проведения в различных странах мира разноплановых исследований, позволяющих создать предпосылки эффективного использования биомассы для решения энергетических задач.

Важным направлением в области исследования пиролиза биомассы является экспериментальное изучение кинетики химических реакций, определяющих протекание данного процесса. К настоящему времени накоплено большое количество экспериментальных данных, дающих возможность выявить основные особенности кинетики термического разложения биомассы. Установлено, что этот процесс зависит от температуры, давления, типа и размеров объектов пиролиза, их влажности, скорости нагрева и других параметров и факторов.

При исследовании пиролиза биомассы обычно применяются упрощенные подходы, что связано с исключительно сложным механизмом химических реакций самого процесса. Как правило, рассмотрение кинетики химических процессов, протекающих в процессе пиролиза биомассы, основано на феноменологическом рассмотрении этих процессов. Известны два различных подхода в этой области. Во-первых, рассмотрение убыли пиролизуемой биомассы с описанием процесса на основе представления разложения биомассы на основе одной химической реакции. Второй подход основан на рассмотрении процесса образования трех групп продуктов пиролиза: твердое вещество, жидкие компоненты и газообразные компоненты.

Исследование пиролиза биомассы в изотермических условиях предоставляется необходимым с целью выяснения причин большого расхождения в значениях энергии активации и предэкспоненциального фактора, установленных в экспериментальных работах [10].

Метод исследования. В работе выполнено экспериментальное исследование кинетики пиролиза дубовой биомассы (*Quercus robur*) в изотермических условиях при температурах 673, 773 и 873 К. Образцы древесины цилиндрической формы диаметром основания 8 мм, высотой 25 мм, массой ~1,4 г и влажностью ~8 % помещались в специальной кювете в лабораторную печь SNOL 7,2/1300 (AB UMEGA, Литва). Эта печь позволяет поддерживать постоянство температуры в интервале температур с точностью ± 2 К. После прохождения определенного периода времени кювета извлекалась из печи и взвешивалась на электронных весах Stohl. После этого другой аналогичный по массе образец древесной биомассы помещался в печь и выдерживался при той же температуре на протяжении некоторого другого интервала времени. Эта процедура повторялась при постоянной температуре до прекращения разложения древесной биомассы, о чем свидетельствовало достижение постоянной остаточной массы образца. Например, в первой серии опытов при температуре 673 К описанная процедура была повторена 9 раз, начиная со времени выдержки 3 мин и кончая временем выдержки равным 35 мин. В соответствии с данным методом в этой серии опытов было использовано девять различных образцов, имевших исходную массу ~1,4 г.

Аналогичная процедура была использована также при температурах 773 и 873 К. Все экспериментальные данные для указанных температур были получены для каждого отдельного интервала времени с использованием новых образцов дубовой биомассы также с массой ~1,4 г. Данная процедура имеет определенный недостаток, так как, по существу, каждый образец имеет некоторые отличия в структуре, влажности, характере поверхности и других физических свойствах. Однако она была использована ввиду того, что изучение процесса термического разложения одного образца на протяжении промежутка времени, необходимого для полного разложения образца, требовало периодического изъятия образца из печи для взвешивания на электронных весах и помещения его обратно, что приводило к появлению затруднений, отражавшихся на точности экспериментальных данных.

Всего было выполнено семь серий экспериментальных исследований пиролиза: по две серии при температурах 673 и 873 К и три серии при температуре 773 К.

Результаты исследования. Результаты, установленные в первых сериях исследований, приведены в табл. 1–3. Символы m_0 и m_t в этих таблицах обозначают соответственно массу изучаемого образца в момент помещения в печь и в момент извлечения из нее, t – промежуток времени от начала помещения образца в нагревательную печь до изъятия из печи, а α_t – степень разложения образца в момент изъятия его из нагревательной печи.

Значение степени разложения определялось по выражению

$$\alpha_t = \frac{(m_0 - m_t)}{\left(m_0 - m_0 \left(\frac{m_t}{m_0} \right)_{\min} \right)}. \quad (1)$$

В выражении (1) величина $\left(\frac{m_t}{m_0} \right)_{\min}$ является минимальным значением отношения $\frac{m_t}{m_0}$, достигнутым в эксперименте, который выполнен при определенной температуре. Из четвертого столбца табл. 1 следует, что это значение равно 0,1802.

Зависимость степеней разложения изученных образцов биомассы от времени для различных температур представлена в табл. 1–3 и на рис. 1.

Как следует из данных, приведенных в табл. 1–3 и на рис. 1, время достижения одинаковых степеней разложения образцов биомассы сильно снижается с ростом температуры. Это объясняется наличием активационного барьера, который преодолевается более легко с ростом температуры. Величина этого барьера, то есть энергия активации термического разложения изученных образцов биомассы, обсуждается далее в статье.

Т а б л и ц а 1. Результаты исследования пиролиза при температуре 673 К

Table 1. The results of the study of pyrolysis at a temperature of 673 K

t , мин	m_0 , г	m_t , г	m_t/m_0	α_t
0	1,3818	1,3818	1	0
3	1,3729	1,3053	0,9508	0,0601
5	1,4008	1,2269	0,8759	0,1514
8	1,3992	1,1005	0,7865	0,2604
10	1,4198	0,9701	0,6833	0,3863
15	1,3801	0,531	0,3848	0,7505
20	1,3909	0,3325	0,2391	0,9282
25	1,3873	0,2901	0,2091	0,9647
30	1,4263	0,2570	0,1802	1,0000
35	1,3598	0,2461	0,1810	0,9990

Т а б л и ц а 2. Результаты исследования пиролиза при температуре 773 К

Table 2. The results of the study of pyrolysis at a temperature of 773 K

t , мин	m_0 , г	m_t , г	m_t/m_0	α_t
0	1,4003	1,4003	1	0
0,5	1,4142	1,3475	0,9528	0,0569
1	1,3892	1,2320	0,8868	0,1366
2	1,3974	1,0741	0,7686	0,2793
3	1,4101	0,8010	0,5680	0,5215
5	1,3975	0,5062	0,3622	0,7700
7	1,3783	0,3494	0,2535	0,9013
10	1,4026	0,2420	0,1725	0,9990
12	1,4009	0,2406	0,1717	1

Т а б л и ц а 3. Результаты исследования пиролиза при температуре 873 К

Table 3. The results of the study of pyrolysis at a temperature of 873 K

t , мин	m_0 , г	m_t , г	m_t/m_0	α_t
0	1,3835	1,3835	1	0
0,25	1,3109	1,2209	0,9313	0,0829
0,5	1,3835	1,0730	0,7756	0,2709
0,75	1,3812	0,8975	0,6498	0,4226
1	1,3739	0,6317	0,4598	0,6520
1,25	1,3892	0,5025	0,3617	0,7703
1,5	1,3470	0,2833	0,2103	0,9530
1,75	1,2952	0,2341	0,1807	0,9887
2	1,3663	0,2527	0,1850	0,9837
2,25	1,3423	0,2324	0,1731	0,9979
2,5	1,3821	0,2369	0,17140	1,0000
2,75	1,4176	0,2504	0,1766	0,9937
3	1,7160	0,3112	0,1814	0,9880

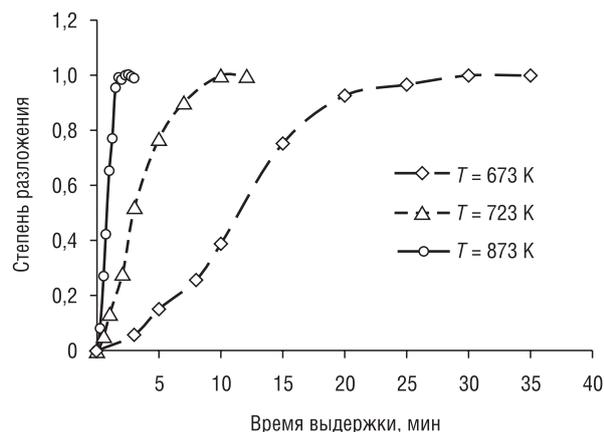
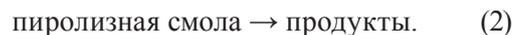


Рис. 1. Зависимость степени разложения образцов биомассы от времени и температуры (первые серии опытов)
 Fig. 1. Dependence of the degree of decomposition of biomass samples on time and temperature (the first series of experiments)

Кинетика термического разложения биомассы. Анализ кинетики разложения смолы в настоящей работе выполнен на основании предположения, что термическое разложение биомассы в отсутствие кислорода или воздуха включает ряд параллельных химических реакций, которые можно заменить некоторой формальной реакцией [1–6]



Этот подход концентрирует внимание на скорости убыли биомассы вследствие пиролиза и не затрагивает кинетику образования твердых, жидких и газообразных компонентов. Такой подход получил название глобальной одноступенчатой реакции.

Кинетическое уравнение реакции при этом запишется в виде [7]

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) f(\alpha). \quad (3)$$

Здесь $k(T)$ – аррениусовская константа скорости, мин^{-1} ; $f(\alpha)$ – дифференциальная функция кинетического уравнения.

Интегрирование уравнения (3) при постоянной температуре дает уравнение скорости реакции, выраженное в интегральном виде:

$$g(\alpha) = kt, \quad (4)$$

где $g(\alpha)$ – интегральная функция кинетического уравнения.

В табл. 4 представлены функции $f(\alpha)$ и $g(\alpha)$, соответствующие различным механизмам разложения твердого тела [7–9].

Значение константы скорости k в соответствии с выражением (4) определяется соотношением

$$k = \frac{g(\alpha)}{t}. \quad (5)$$

Соотношение (5) было использовано в настоящей работе для расчета значений константы скорости реакции (2) при температурах 673, 773 и 873 К на основании установленных экспериментальных значений степени разложения исследованных образцов древесной биомассы. Полученные таким образом значения константы скорости аппроксимировались методом наименьших квадратов как функции времени выдержки. При этом подбирались такие функции, которые дают максимальное значение коэффициента детерминации R^2 . Величина этого коэффициента определяет наличие корреляции между выборками двух переменных величин. В случае, когда R^2 близко к 1, имеет место функциональная зависимость между параметрами одной выборки и параметрами другой выборки. При $R^2 = 0$ корреляция между параметрами одной и параметрами другой выборки отсутствует.

В табл. 5 представлены аппроксимационные уравнения и значения коэффициента детерминации, установленные для термического разложения древесной биомассы при температуре 673 К (вторая серия опытов при 673 К) для всех реакционных моделей, представленных в табл. 4.

Как следует из табл. 5, все реакционные модели, за исключением модели Авраами–Ерофеева с $n = 0,5$ (модель A_2), приводят к значениям коэффициента детерминации близким к 1. Это указывает на наличие функциональной зависимости величин, рассчитанных по уравнению (5), от времени в случае указанных моделей и отсутствие функциональной зависимости от времени в случае модели Авраами–Ерофеева с $n = 0,5$ (модель A_2).

Т а б л и ц а 4. Кинетические уравнения реакций разложения твердого тела

T a b l e 4. Kinetic equations of the reactions of decomposition of a solid body

Модель	$f(\alpha)$	$g(\alpha)$
<i>Модель зародышеобразования</i>		
Степенной закон, P_1	1	α
Степенной закон, $P_{3/2}$	$(2/3)\alpha^{-1/2}$	$\alpha^{2/3}$
Степенной закон, P_2	$2\alpha^{1/2}$	$\alpha^{1/2}$
Степенной закон, P_3	$3\alpha^{2/3}$	$\alpha^{1/3}$
Степенной закон, P_4	$4\alpha^{3/4}$	$\alpha^{1/4}$
<i>Модель сигмоидного уравнения реакции</i>		
Аврами–Ерофеев, $A_{3/2}$	$\left(\frac{3}{2}\right)(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/3}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{2/3}$
Аврами–Ерофеев, A_2	$2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$
Аврами–Ерофеев, A_3	$3(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{2/3}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{1/3}$
Аврами–Ерофеев, A_4	$4(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{3/4}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{1/4}$
Проут–Томкинс, A_n	$\alpha(1-\alpha)$	$\ln \left[\frac{\alpha}{(1-\alpha)} \right]$
<i>Геометрическая модель изменения поверхности или объема</i>		
Поверхность, R_2	$2(1-\alpha)^{1/2}$	$1-(1-\alpha)^{1/2}$
Объем, R_3	$3(1-\alpha)^{2/3}$	$1-(1-\alpha)^{1/3}$
<i>Диффузионное лимитирование</i>		
Одномерная диффузия, D_1	$1/2\alpha$	α^2
Двумерная диффузия, D_2	$[- \ln(1-\alpha)]^{-1}$	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha) + \alpha$
Трехмерная диффузия, D_3	$\frac{\left(\frac{3}{2}\right)(1-\alpha)^{2/3}}{[1-(1-\alpha)^{1/3}]}$	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$
<i>Лимитирование скоростью реакции</i>		
Реакция 1-го порядка, F_1	$1-\alpha$	$-\ln(1-\alpha)$
Реакция 2-го порядка, F_2	$(1-\alpha)^2$	$(1-\alpha)^{-1} - 1$
Реакция 3-го порядка, F_3	$(1-\alpha)^3$	$[(1-\alpha)^{-2} - 1]/2$

Пример функциональной зависимости параметра k от времени демонстрируют рис. 2 и 3, на которых представлены значения этой величины, рассчитанной по выражению (5) по результатам исследования разложения биомассы при температуре 673 К (вторая серия опытов).

Как следует из данных, представленных в табл. 5, только модель Аврами–Ерофеева с $n = 0,5$ (модель A_2) приводит к значениям параметра k , рассчитанного по выражению (5), которые в пределах экспериментальных ошибок можно рассматривать не зависящими от времени выдержки. Это означает, что разложение образцов древесной биомассы по крайней мере при температуре 673 К протекает по реакционной модели Аврами–Ерофеева с $n = 0,5$ (модель A_2). Соответственно, значения параметра k , рассчитанного по выражению (5), являются значениями константы скорости этого процесса.

Аналогичный анализ термического разложения биомассы в настоящей работе был выполнен для всех серий экспериментальных исследований. В результате было установлено, что независимость величины k , рассчитанной по выражению (5), от времени обеспечивает только уравнение Аврами–Ерофеева со значением показателя n , изменяющимся в пределах от 0,508 до 0,985. Основные параметры кинетического анализа, проведенного для всех серий исследования, представлены в табл. 6–8.

Представленные в табл. 6–8 показатели были определены в результате итеративного расчета значений константы скорости для модели Аврами–Ерофеева путем подстановки в выражение

Т а б л и ц а 5. Параметры регрессионного анализа реакционных моделей при температуре 673 К (вторая серия опытов)

Table 5. Parameters of the regression analysis of reaction models at a temperature of 673 K (second series of experiments)

Модель	Аппроксимационное уравнение	Опущенные точки по t	R^2
P_1	$k = 0,000003t^3 - 0,000241t^2 + 0,005762t + 0,004562$	Нет	0,9245
$P_{3/2}$	$k = 0,000002t^3 - 0,000122t^2 + 0,001780t + 0,047417$	Нет	0,9515
P_2	$k = -0,000001t^3 + 0,000089t^2 - 0,003528t + 0,091112$	Нет	0,9851
P_3	$k = -0,000007t^3 + 0,000396t^2 - 0,013027t + 0,161528$	Нет	0,9887
P_4	$k = -0,000011t^3 + 0,000813t^2 - 0,020130t + 0,211383$	Нет	0,9854
$A_{3/2}$	$k = 0,035t^{0,3006}$	$t = 30$ мин	0,8818
A_2	$k = -9 \cdot 10^{-5}t + 0,0776$	То же	0,0298
A_3	$k = 0,1869t^{-0,35}$	То же	0,9758
A_4	$k = 0,2844t^{-0,512}$	То же	0,9936
A_u	$k = 0,4086 \ln(t) - 1,1127$	То же	0,8518
R_2	$k = -0,00005t^2 + 0,0029t + 0,0014$	Нет	0,9494
R_3	$k = -0,00004t^2 + 0,0022t - 0,0007$	Нет	0,9403
D_1	$k = -0,000001t^3 - 0,000029t^2 + 0,003635t - 0,012759$	Нет	0,9245
D_2	$k = -0,000003t^3 + 0,000094t^2 + 0,01174t - 0,005841$	Нет	0,9512
D_3	$k = -0,000007t^3 + 0,002568t^2 - 0,043116t + 0,440249$	$t = 30$ мин	0,9848
F_1	$k = 0,0057t + 0,0012$	$t = 30$ мин	0,9784
F_2	$k = 0,0118 \cdot \exp(0,1868t)$	$t = 30$ и 35 мин	0,9861
F_3	$k = 0,0059 \cdot \exp(0,3143t)$	$t = 30$ и 35 мин	0,9783

$g(\alpha)$ для этой модели значений показателя n в интервале от 0,5 до 1,0. Такие расчеты проводились до достижения практически нулевого значения коэффициента детерминации. С использованием установленного таким способом значения показателя n рассчитывались усредненные значения константы скорости, приведенные в табл. 6–8.

Аррениусовская зависимость термического разложения древесной биомассы, построенная по данным первых серий опытов, представлена на рис. 4.

Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости, установленных в первых сериях опытов, приводит к следующему выражению:

$$\ln(k) = -\frac{7,74535}{T} + 6,87543. \quad (6)$$

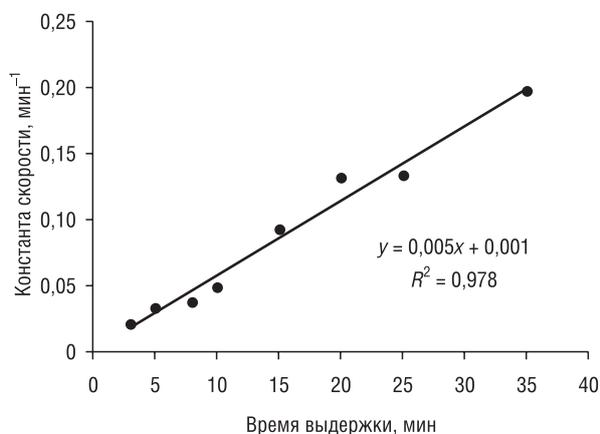


Рис. 2. Значения параметра k , рассчитанного при температуре 673 К для реакционной модели F_1 (реакция первого порядка)

Fig. 2. The values of the parameter k , calculated at a temperature of 673 K for the reaction model F_1 (first order reaction)

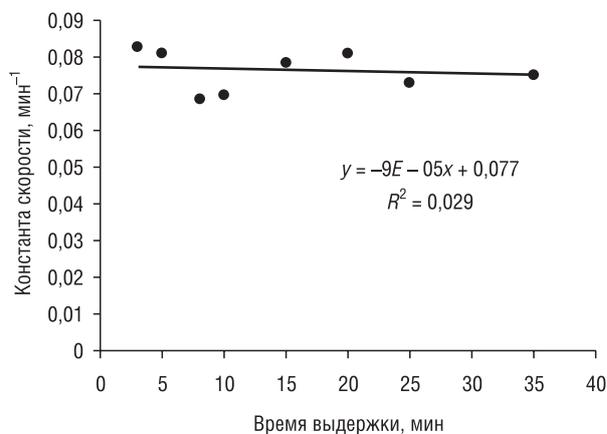


Рис. 3. Значения параметра k , рассчитанного при температуре 673 К для модели A_2 (модель Аврами–Ерофеева A_2)

Fig. 3. The values of the parameter k , calculated at a temperature of 673 K for model A_2 (model Avarami–Erofeev A_2)

Точность аппроксимации определяется следующими величинами:

$$R^2 = 0,9386, p \text{ (одностороннее)} = 0,080. \quad (7)$$

Расчеты с использованием постоянных в выражении (6) приводят к значениям энергии активации $E = 57,2$ кДж/моль и предэкспоненциального фактора $2,31 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$. В соответствии с этими величинами аррениусовское выражение для константы скорости запишется в виде

$$k = (2,31 \cdot 10^3) \cdot \exp\left(-\frac{57200}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (8)$$

На рис. 5 представлена аррениусовская зависимость константы скорости, определенная на основании данных, установленных во вторых сериях опытов.

Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости, установленных во вторых сериях опытов, приводит к следующему выражению:

$$\ln(k) = -\frac{7,8006}{T} + 8,9591. \quad (9)$$

Точность аппроксимации определяется следующими величинами:

$$R^2 = 0,9935, p \text{ (одностороннее)} = 0,025. \quad (10)$$

Расчеты с использованием постоянных в выражении (6) приводят к значениям энергии активации $E = 64,9$ кДж/моль и предэкспоненциального фактора $7,78 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$. В соответствии с этими величинами аррениусовское выражение для константы скорости запишется в виде

$$k = (7,78 \cdot 10^3) \cdot \exp\left(-\frac{64900}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (11)$$

Значения константы скорости, рассчитанные по (8), были использованы для определения степени разложения образцов биомассы, исследованных в первых сериях опытов при температурах 673, 773 и 873 К.

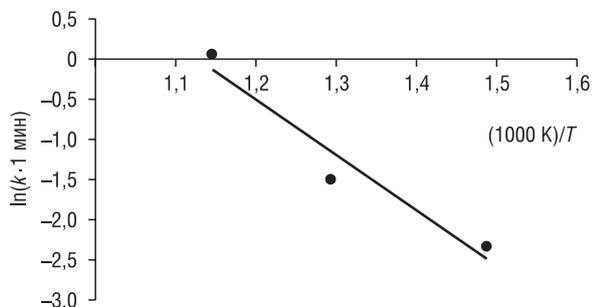


Рис. 4. Аррениусовская зависимость константы скорости реакции термического разложения древесной биомассы по данным первых серий опытов

Fig. 4. Arrhenius dependence of the rate constant of the reaction of thermal decomposition of woody biomass according to the first series of experiments

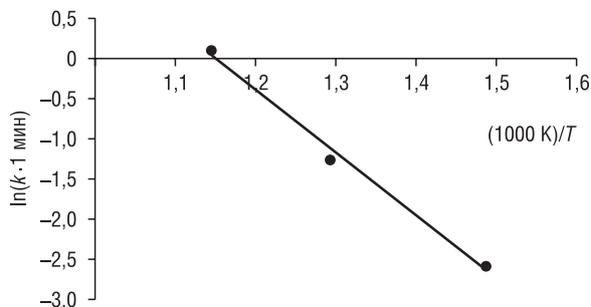


Рис. 5. Аррениусовская зависимость константы скорости реакции термического разложения древесной биомассы по данным вторых серий опытов

Fig. 5. Arrhenius dependence of the rate constant of the reaction of thermal decomposition of woody biomass according to the second series of experiments

Т а б л и ц а 6.
П а р а м е т р ы т е р м и ч е с к о г о р а з л о ж е н и я
о б р а з ц о в д р е в е с н о й б и о м а с с ы
п р и т е м п е р а т у р е 673 К

Table 6. Parameters of thermal decomposition of wood biomass samples at a temperature of 673 K

Серия	n	R ²	k, мин ⁻¹
Первая	0,623	2 · 10 ⁻⁵	0,09847
Вторая	0,508	3 · 10 ⁻⁵	0,07615
Средние значения	0,566	–	0,08731

Т а б л и ц а 7.

П а р а м е т р ы т е р м и ч е с к о г о р а з л о ж е н и я
о б р а з ц о в д р е в е с н о й б и о м а с с ы
п р и т е м п е р а т у р е 773 К

Table 7. Parameters of thermal decomposition of wood biomass samples at a temperature of 773 K

Серия	n	R ²	k, мин ⁻¹
Первая	0,985	9 · 10 ⁻⁵	0,2247
Вторая	0,621	2 · 10 ⁻⁵	0,2852
Третья	0,626	10 ⁻⁴	0,1761
Средние значения	0,744	–	0,2286

Т а б л и ц а 8.

П а р а м е т р ы т е р м и ч е с к о г о р а з л о ж е н и я
о б р а з ц о в д р е в е с н о й б и о м а с с ы
п р и т е м п е р а т у р е 873 К

Table 8. Parameters of thermal decomposition of wood biomass samples at a temperature of 873 K

Серия	n	R ²	k, мин ⁻¹
Первая	0,582	3 · 10 ⁻⁶	1,0685
Вторая	0,509	6 · 10 ⁻⁵	1,1001
Средние значения	0,546	–	1,0843

Расчет проводился на основании интегрального уравнения Авраами–Ерофеева

$$kt = [-\ln(1 - \alpha)]^n. \quad (12)$$

Это уравнение можно разрешить относительно степени разложения α следующим образом:

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\left(kt\right)^{\frac{1}{n}}\right). \quad (13)$$

Подстановка в (13) значений константы скорости, рассчитанных по (8), значения соответствующего показателя n и времени выдержки позволяет рассчитать степень разложения образца для этого времени выдержки.

При расчетах были использованы значения показателя n , установленные в первых сериях опытов. Расчетные и экспериментальные степени разложения в первых сериях опытов представлены на рис. 6–8.

Как показывают данные на этих рисунках, использование выражений (8) и (12) приводит к согласию расчетных значений степени разложения изученных образцов биомассы с экспериментальными в интервале значений степени разложения от 0 до 1.

В табл. 9 приведены значения средней погрешности расчетных значений степени термического разложения биомассы в первых сериях экспериментов, рассчитанные по выражению

$$\epsilon = 100\% \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\alpha_{i,c} - \alpha_{i,e}}{\alpha_{i,e}} \right|}{N}. \quad (14)$$

Здесь N – число точек, для которых выполнено определение экспериментальной степени разложения; $\alpha_{i,c}$ и $\alpha_{i,e}$ – соответственно расчетное и экспериментальное значение степени разложения в i -й временной точке.

Т а б л и ц а 9. Средние погрешности (ϵ) расчетных значений степени разложения в первых сериях опытов

T a b l e 9. The average errors (ϵ) calculated values of the degree of decomposition in the first series of experiments

Константа скорости	673 К	773 К	873 К
Расчет по выражению (8)	10,5	19,3	9,3
Расчет по выражению (11)	20,2	20,2	3,6

Анализ данных табл. 9 показывает, что выражения (8) и (11) приводят к примерно одинаковым погрешностям в значениях степени разложения биомассы. Эти погрешности по величине

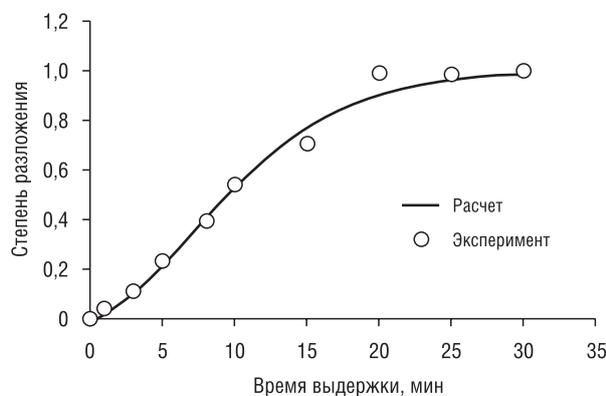


Рис. 6. Степени разложения биомассы при температуре 673 К (первая серия опытов)

Fig. 6. The degree of decomposition of biomass at a temperature of 673 K (the first series of experiments)

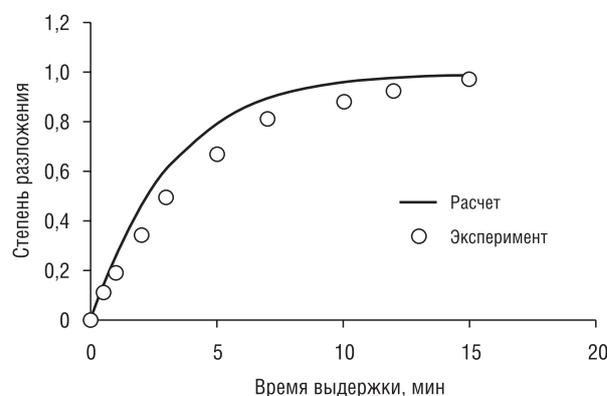


Рис. 7. Степени разложения биомассы при температуре 773 К (первая серия опытов)

Fig. 7. The degree of decomposition of biomass at a temperature of 773 K (the first series of experiments)

соответствуют погрешностям экспериментальных значений степени разложения, что позволяет использовать в расчетах любое из этих выражений. Данное обстоятельство не позволяет сделать вывод о том, какое из определенных в настоящей работе значений энергии активации является более обоснованным. Очевидно, правильным является утверждение о том, что энергия активации пиролиза изученных образцов биомассы находится в интервале значений 57,2–64,9 кДж/моль, а значение предэкспоненциального фактора составляет от 38,5 до 130 с^{-1} . Эти величины качественно согласуются с данными, определенными в других исследованиях разложения биомассы на основе рассмотрения глобального одноступенчатого подхода [3, 10]. Так, в работе [3] на основании данных, установленных в исследованиях пиролиза пеньки маниоки, значение энергии активации определено в пределах от 68,4 до 76,5 кДж/моль. Указанное согласие в значении энергии активации является дополнительным аргументом в пользу вывода о корректности значений энергии активации и предэкспоненциального фактора, полученных в настоящем исследовании.

Обсуждение результатов исследования. Кинетический анализ, выполненный на основе экспериментальных исследований пиролиза биомассы при температурах 673, 773 и 873 К показал, что термическое разложение изученных образцов биомассы в интервале температур 673–873 К протекает в соответствии с реакционной моделью Аврамы–Ерофеева.

Особенность этого процесса заключается в том, что показатель n уравнения Аврамы–Ерофеева оказывается разным для различных образцов биомассы, то есть является переменной величиной. Так, по данным анализа семи серий экспериментальных исследований его значение находится в интервале от 0,508 до 0,985. Возможной причиной этого эффекта является различие в естественной микроструктуре изученных образцов биомассы. Другой возможной причиной является дополнительное изменение структуры, происходящее в процессе приготовления образца. Известно, что методы приготовления образцов оказывают существенное влияние на кинетику твердофазных процессов. Наличие упомянутых эффектов может приводить к появлению существенного различия значений энергии активации и предэкспоненциального фактора при изучении кинетики пиролиза биомассы.

Существуют и другие факторы, влияющие на значение энергии активации и предэкспоненциального фактора, такие, например, как биологический вид пиролизуемого сырья, его размеры, влажность, методы анализа разложения и рассматриваемая реакционная модель.

Отмеченные факторы и являются возможными причинами различия в значениях энергии активации и предэкспоненциального фактора, обнаруженного не только в настоящей работе, но и в работах других исследователей. По данным [10], значения энергии активации, установленные в различных исследованиях, изменяются в пределах от 50 до 270 кДж/моль. Самые низкие значения при этом определены для случая одноступенчатого глобального подхода, который был использован и в настоящей работе.

Наличие отмеченного расхождения в значениях энергии активации указывает на то, что не имеется таких констант скорости пиролиза биомассы, которые возможно использовать при расчетно-теоретическом исследовании физико-химических процессов пиролиза любого вида биомассы. А это означает, что в качестве констант скорости химических реакций, протекающих в процессе пиролиза биомассы, можно использовать только такие константы скорости, которые установлены для биомассы аналогичного вида, для аналогичного размера пиролизуемых образцов, их влажности и соответствия других параметров. Отсюда следует вывод о необходимости определения кинетических характеристик процессов при тех же условиях.

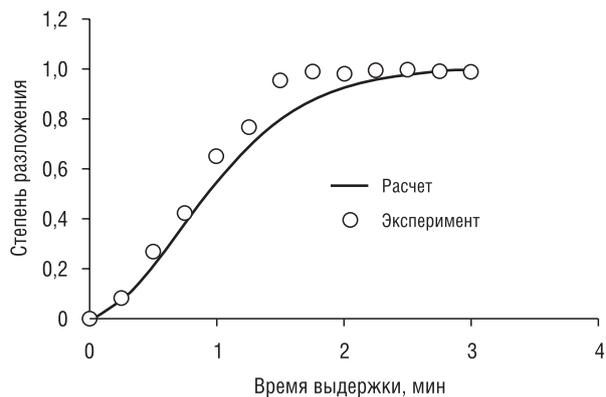


Рис. 8. Степени разложения биомассы при температуре 873 К (первая серия опытов)

Fig. 8. The degree of decomposition of biomass at a temperature of 873 K (the first series of experiments)

Выводы. Выполнены экспериментальные исследования кинетики пиролиза образцов древесной биомассы (древесина дуба обыкновенного – *Quercus robur*) в изотермических условиях при температурах 673, 773 и 873 К.

Установлено, что термическое разложение биомассы соответствует реакционной модели Аврами–Ерофеева с показателем n , изменяющимся от образца к образцу.

Определены значения энергии активации, соответствующие одноступенчатому глобальному подходу ($E = 57,2\text{--}64,9$ кДж/моль).

Установлены аррениусовские выражения для расчета значений константы скорости пиролиза древесной биомассы (образцы древесины дуба обыкновенного), позволяющие с точностью, соответствующей точности экспериментальных величин, корректно определить степень разложения образцов биомассы в интервале температур 673–873 К в интервале значений степени разложения от 0 до 1.

Список использованных источников

1. Theoretical Investigations of the Effects of Isothermal and Non-isothermal Heating Conditions on the Kinetics of Biomass Particle / M.G. Sobamowo [et al.] // *Am. J. Biomass and Bioenergy*. – 2016. – Vol. 5, №1. – P. 1–23. <https://doi.org/10.7726/ajbb.2016.1001>
2. Prakash, N. Kinetic Modeling in Biomass Pyrolysis – A Review / N. Prakash, T. Karunanithi // *J. Appl. Sci. Res.* – 2008. – Vol. 4, №12. – P. 1627–1636.
3. Weerachanchai, P. Comparison of Pyrolysis Kinetic Models for Thermogravimetric Analysis of Biomass / P. Weerachanchai, Ch. Tangsathitkulchai, M. Tangsathitkulchai // *Suranaree J. Sci. Technol.* – 2010. – Vol. 17, №4. – P. 387–400.
4. Di Blasi, C. Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis / C. Di Blasi // *Prog. Energy Combust. Sci.* – 2008. – Vol. 34, №1. – P. 47–90. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.001>
5. Babu, B.V. Heat transfer and Kinetics in the Pyrolysis of Shrinking Biomass Particle / B.V. Babu, A.S. Chaurasia // *Chem. Eng. Sci.* – 2004. – Vol. 59. – P. 1999–2012. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.01.050>
6. Thermal decomposition of biomass wastes. A kinetic study / M. Becidan [et al.] // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2007. – Vol. 46. – P. 2428–2437. <https://doi.org/10.1021/ie061468z>
7. Vyazovkin, S. Model-free and Model-fitting Approaches to Kinetic Analysis of Isothermal and Nonisothermal Data / S. Vyazovkin, Ch. A. Wight // *Thermochim. Acta.* – 1999. – Vol. 340–341. – P. 53–68. [https://doi.org/10.1016/s0040-6031\(99\)00253-1](https://doi.org/10.1016/s0040-6031(99)00253-1)
8. Han, Yunqing. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics [Electronic resource]: Theses and Dissertations – Mechanical Engineering / Yunqing Han. – Lexington, Kentucky, 2014. – Mode of access: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&context=me_etds – Date of access: 15.05.2019.
9. Ebrahimi-Kahrizangi, R. Evaluation of reality of Coats-Redfern method for kinetic analysis of non-isothermal TGA / R. Ebrahimi-Kahrizangi, M.H. Abbasi // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* – 2008. – Vol. 18, iss. 1. – P. 217–221. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60039-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60039-4)
10. Kinetics of the Thermal Decomposition of Biomass / A. Saddawit [et al.] // *Energy Fuels.* – 2010. – Vol. 24, №2. – P. 1274–1282. <https://doi.org/10.1021/ef900933k>

References

1. Sobamowo M. G., Ojolo S. J., Kehinde A. J., Osheku C. A. Theoretical Investigations of the Effects of Isothermal and Non-isothermal Heating Conditions on the Kinetics of Biomass Particle. *American Journal of Biomass and Bioenergy*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 1–23. <https://doi.org/10.7726/ajbb.2016.1001>
2. Prakash N., Karunanithi T. Kinetic Modeling in Biomass Pyrolysis – A Review. *Journal of Applied Sciences Research*, 2008, vol. 4, no. 12, pp. 1627–1636.
3. Weerachanchai P., Tangsathitkulchai Ch., Tangsathitkulchai M. Comparison of Pyrolysis Kinetic Models for Thermogravimetric Analysis of Biomass. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 387–400.
4. Di Blasi C. Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, vol. 34, no. 1, pp. 47–90. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.001>
5. Babu B. V., Chaurasia A. S. Heat Transfer and Kinetics in the Pyrolysis of Shrinking Biomass Particle. *Chemical Engineering Science*, 2004, vol. 59, pp. 1999–2012. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.01.050>
6. Becidan M., Várhegyi G., Hustad J. E., Skreiberg Ø. Thermal decomposition of biomass wastes. A kinetic study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, vol. 46, pp. 2428–2437. <https://doi.org/10.1021/ie061468z>
7. Vyazovkin S., Wight Ch. A. Model-free and Model-fitting Approaches to Kinetic Analysis of Isothermal and Nonisothermal Data. *Thermochimica Acta*, 1999, vol. 340–341, pp. 53–68. [https://doi.org/10.1016/s0040-6031\(99\)00253-1](https://doi.org/10.1016/s0040-6031(99)00253-1)
8. Han Yunqing. *Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics: Theses and Dissertations – Mechanical Engineering*. Lexington, Kentucky, 2014. Available: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&context=me_etds (accessed 15.05.2019).

9. Ebrahimi-Kahrizsangi R., Abbasi M. H. Evaluation of reliability of Coats-Redfern method for kinetic analysis of non-isothermal TGA. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, vol. 18, iss. 1, pp. 217–221. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60039-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60039-4)

10. Saddawit A., Jones J. M., Williams A., Wójtowicz M. A. Kinetics of the Thermal Decomposition of Biomass. *Energy Fuels*, 2010, vol. 24, no. 2, pp. 1274–1282. <https://doi.org/10.1021/ef900933k>

Информация об авторах

Малько Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Information about the authors

Mikhail V. Malko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b. 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Siarhei V. Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Head of Laboratory, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b. 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIO ELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

УДК 621.391.26
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-332-346>

Поступила в редакцию 17.11.2017
Received 17.11.2017

В. П. Тузлуков

Белорусская государственная академия авиации, Минск, Беларусь

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАЗНЕСЕНИЕ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ
С ШИРОКОПОЛОСНЫМ МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ И КОДОВЫМ
РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ**

Аннотация. Разнесение сигналов, передаваемых от базовой станции (центра управления полетом) к мобильной станции или летательному аппарату, например беспилотнику, используя систему с множественным доступом и кодовым разделением каналов, предоставляет возможность получать такую же вероятность ошибки на бит, как и в случае разнесенного приема сигналов без усложнения структуры антенной решетки приемной антенны летательного аппарата. Предварительное кодирование совместно с предварительной фильтрацией передаваемых сигналов с учетом знания информации о параметрах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания, выполняемое передающим устройством базовой станции, может применяться для обеспечения многолучевого распространения передаваемого сигнала без необходимости использования многоканального приемного устройства для разнесенных сигналов бортовой аппаратурой летательного аппарата. Мы изучаем возможность реализации нескольких методов разнесения сигналов, передаваемых от центра управления полетом к летательному аппарату, используя систему с широкополосным множественным доступом и кодовым разделением каналов. Мы также исследуем оптимальный метод для сочетания разнесения передаваемых сигналов и предварительного кодирования, который дает возможность получить вероятность ошибки на бит очень близкую к оптимальной вероятности ошибки на бит при оптимальном сложении разнесенных сигналов по всем пространственным и частотным каналам разнесенного приема. Мы используем алгоритм долгосрочного прогнозирования параметров канала связи с целью адаптации рассматриваемых методов к условиям быстрого изменения во времени параметров канала связи с замираниями при многолучевом излучении передаваемых сигналов.

Ключевые слова: разнесенный прием сигналов, многолучевое разнесение сигналов, вероятность ошибки, отношение сигнал/помеха, пространственно-временное разнесение сигналов

Для цитирования: Тузлуков, В. П. Пространственно-временное разнесение сигналов в системах с широкополосным множественным доступом и кодовым разделением каналов / В. П. Тузлуков // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 332–346. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-332-346>

V. P. Tuzlukov

Belarussian State Aviation Academy, Minsk, Belarus

SPACE-TIME DIVERSITY SIGNAL PROCESSING EMPLOYED BY W-CDMA SYSTEMS

Abstract. Transmit diversity under transmission of signals from the base station to mobile station using the code-division multiple-access (CDMA) system allows us obtaining the performance gains close to the mobile station receiver diversity without complexity of the mobile station receiver antenna array. The multipath diversity can be achieved using the pre-RAKE precoding at the transmitter that could be employed and there is no need to install the RAKE receiver at the mobile station. We investigate several transmitter diversity techniques employed by wideband CDMA (W-CDMA) systems. We also study a possibility to combine transmitter diversity and precoding that achieves the gain of maximum ratio combining of all space and frequency diversity branches jointly with long-term prediction algorithm. It was demonstrated that the performance of

the space-time pre-RAKE method approaches the performance of the maximum ratio combining for all space and frequency diversity branches. It is shown that all closed loop methods depend on the long range prediction to approximate the ideal performance in the fast fading environment.

Keywords: diversity signal processing, multipath diversity, probability of error, signal-to-noise ratio, space-time diversity signal processing, Rake receiver

For citation: Tuzlukov V. P. Space-time diversity signal processing employed by W-CDMA systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 332–346 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-332-346>

Введение. Широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов широко используется при передаче и приеме сигналов в радиосвязи, спутниковой связи, мобильной связи и т. д. Пропускная способность канала связи между летательным аппаратом и центром управления полетом может быть улучшена при применении различных технологий и методов, включая разнесенный прием сигналов, используя систему направленных передающих антенн или антенную решетку и систему обнаружения для многоканального приема. В настоящее время технологии, увеличивающие пропускную способность канала связи от центра управления полетом к летательному аппарату, пока не получили должного развития. Не стоит большого труда понять, что требования к пропускной способности, определяемые предполагаемым сервисом обработки данных, например интернет, сильно нагружают канал связи между центром управления полетом и летательным аппаратом. Следовательно, очень важно определить такие технологии, которые улучшают пропускную способность канала связи между центром управления полетом и летательным аппаратом.

Принимая во внимание очень строгие ограничения и требования к бортовой аппаратуре летательного аппарата и учитывая параметры канала связи, быстро изменяющиеся во времени при наличии замираний, применение предварительной фильтрации в совокупности с многоэлементными приемными антеннами не является желаемым решением проблемы улучшения пропускной способности канала связи между центром управления полетом и летательным аппаратом. Разнесение сигналов, передаваемых по каналу связи между центром управления полетом и летательным аппаратом, используя антенную решетку передающей антенны или систему направленных передающих антенн, обеспечивает снижение вероятности ошибки на бит, как и в случае разнесенного приема сигналов приемным устройством летательного аппарата, без усложнения структурно-схематической архитектуры бортовой аппаратуры летательного аппарата при использовании нескольких приемных антенн.

Базовые методы передачи сигналов позволяют осуществлять процедуру обработки сигналов в передающем устройстве центра управления полетом летательного аппарата, где предоставляется широкая возможность увеличения потребляемой мощности и компьютеризации передающего оборудования, упрощая тем самым структуру бортовой аппаратуры и, следовательно, приемного устройства летательного аппарата. Предлагались различные решения использования разнесения сигналов, передаваемых центром управления полета к летательному аппарату, с целью улучшения пропускной способности канала связи между центром управления полетом и летательным аппаратом при минимальном усложнении структуры передающего терминала центра управления полетом.

Предлагаемые методы включают пространственно-временное кодирование [1, 2]; разнесение сигналов, используя задержку во времени; ортогональное разнесение при передаче сигналов; разнесение передаваемых сигналов с переключением по частоте; селективное разнесение передаваемых сигналов; использование адаптивной антенной решетки передающей антенны и системы направленных передающих антенн [3–8]. Некоторые технологии, например, такие как адаптивная антенная решетка передающей антенны или селективное разнесение передаваемых сигналов, требуют наличие сигнала обратной связи между летательным аппаратом и центром управления полетом для передачи информации о параметрах канала связи в центр управления полетом. Назовем такие технологии адаптивными.

При наличии обратной связи между летательным аппаратом и центром управления полетом мы получаем уменьшение вероятности ошибки на бит по сравнению с неадаптивными технологиями. Полная информация о параметрах канала связи используется для определения и расчета

комплексных весовых функций, необходимых при использовании адаптивной антенной решетки передающей антенны или системы направленных передающих антенн, а также для выбора передающей антенны или элемента передающей антенны с наибольшим коэффициентом передачи мощности сигнала по каналу связи для селективного разделения передаваемых сигналов [9, 10].

Технология множественного доступа с кодовым разделением каналов применяется для использования параметров канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала. В этом случае требуется наличие многоканального приемного устройства на борту летательного аппарата для приема многочисленных копий сигнала, переданного посредством многолучевого излучения передаваемого сигнала, то есть приемное устройство для разнесенных сигналов. При многолучевом разнесении передаваемых сигналов передающая антенна излучает один сигнал, а в точку приема приходят одновременно множество копий сигнала, определяемое порядком разнесения сигнала. Многолучевое разнесение сигналов, передаваемых центром управления полетом летательному аппарату, приводит к усложнению структурно-схематической архитектуры приемного устройства бортового оборудования летательного аппарата и, следовательно, к увеличению потребляемой мощности и массы.

Для разрешения этой проблемы в [11–13] были предложены методы предварительной фильтрации сигналов с учетом информации о параметрах канала связи, выполняемой передающей аппаратурой центра управления полетом, и оптимальным сложением разнесенных сигналов, выполняемым приемным устройством летательного аппарата. При использовании этих методов сочетание предварительной фильтрации сигналов с учетом наличия информации о параметрах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала и сложения разнесенных сигналов выполняется непосредственно перед трансляцией информационных сигналов по каналу связи из центра управления полетом к летательному аппарату. Таким образом, приемное устройство летательного аппарата может быть сконструировано на основе простого согласованного фильтра, что резко снижает потребляемую мощность и массу бортового оборудования летательного аппарата.

В силу того что использование системы направленных передающих антенн является оптимальным решением при наличии гладких замираний в канале связи, вероятность ошибки на бит имеет нижнюю границу, обусловленную наличием скалярных весовых функций. Кроме того, эта система требует наличия многоканального приемного устройства на борту летательного аппарата для приема разнесенных сигналов, переданных посредством многолучевого излучения передаваемого сигнала. Мы исследуем метод разнесения сигналов, основанный на предварительной пространственно-временной фильтрации передаваемых сигналов с учетом наличия информации о параметрах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания, и проводим сравнительный анализ с методами селективного разнесения сигналов и методами, основанными на использовании системы направленных передающих антенн.

Рассматриваемый метод позволяет получить характеристику вероятности ошибки на бит очень близкую к оптимальной характеристике вероятности ошибки на бит при оптимальном сложении разнесенных сигналов для всех пространственных и частотных каналов разнесенного приема без использования многоканального приемного устройства для разнесенных сигналов на борту летательного аппарата. Подобное решение исследовалось в [13] для систем, использующих средства обеспечения дуплексной связи с временным разделением каналов.

Все технологии, а именно селективное разнесение передаваемых сигналов, система направленных передающих антенн, предварительная фильтрация передаваемых сигналов, требуют наличия знания о параметрах канала связи. На практике параметры канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала быстро изменяются во времени. В связи с этим обновление информации о параметрах канала связи в масштабе реального времени невозможно даже при использовании обратной связи между летательным аппаратом и центром управления полетом. Подобное явление приводит к ухудшению характеристики вероятности ошибки на бит. Алгоритм долгосрочного прогнозирования параметров канала связи при наличии многолучевого излучения передаваемого сигнала, порождающего замирания, может быть использован для улучшения характеристики вероятности ошибки на бит [14–18].

Улучшение характеристики вероятности ошибки на бит при использовании алгоритма долгосрочного прогнозирования параметров канала связи обусловлено большим объемом памяти, получаемым при использовании более низкой частоты дискретизации, задаваемой фиксированным порядком разнесения. В настоящей работе мы используем алгоритм долгосрочного прогнозирования параметров канала связи при многолучевом излучении передаваемого сигнала, порождающего замирания, с целью улучшения характеристики вероятности ошибки на бит при использовании методов пространственного разнесения антенн с обратной связью в случае быстро изменяющихся во времени значений параметров канала связи при многолучевом излучении передаваемого сигнала [14, 15, 19].

Модель системы. Моделирование с учетом алгоритма долгосрочного прогнозирования параметров канала связи с замираниями основывается на свойствах широкополосного множественного доступа с кодовым разделением каналов связи [20]. Блок-схема системы представлена на рис. 1. Сверточное кодирование с половинной частотой и длиной кодового ограничения, равного 9, используется совместно с параметрами генератора полиномов 561 и 753 в форме восьмеричных чисел. Минимальная кодовая длина равна 12. Глубина чередования равна 10 мс. Ортогональные коды получаются, используя древовидную структуру, аналогичную [20]. Каналы связи, ассоциированные с различными элементами передающей антенны, обладают независимыми и идентично распределенными рэлеевскими замираниями, которые можно моделировать, используя модель Джейка с 9 элементарными излучателями [21]. Импульсная переходная характеристика i -й антенны может быть представлена в следующем виде:

$$h_i(t) = \sum_{j=0}^{L-1} h_{ij}(t) \delta(t - jT_c), \quad (1)$$

где L – число отраженных сигналов при многолучевом излучении передаваемого сигнала или число каналов многолучевого излучения передаваемого сигнала, T_c – длительность элементарного сигнала. Весовые функции каждого направления многолучевого излучения передаваемого сигнала независимы и идентично распределены. Мощность передаваемых сигналов нормализована к единице. Каждый канал при многолучевом излучении передаваемого сигнала подвергается воздействию аддитивного белого шума со спектральной плотностью мощности $N_0/2$ Вт/Гц. Используется квадратурная фазовая модуляция [22].

При обсуждении характеристики вероятности ошибок на бит для различных технологий разнесения передаваемых сигналов мы предполагаем наличие единственной некодированной системы с характерной формой импульса (сигнала), ортогональной сдвигу этого сигнала (импульса) на интервал, равный длительности элементарного сигнала T_c . Мы также полагаем, что передающее устройство центра управления полетом обладает полной информацией о параметрах (коэффициентах) канала связи с многолучевым излучением, порождающим замирания. При моделировании мы не принимаем во внимание автоматическую самоортогональность (автоматическую ортогональность), поскольку рассматривается система с широкополосным множественным доступом и кодовым разделением каналов, передаваемые данные кодируются, и принимается во внимание быстрое изменение во времени параметров канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания, при оценивании характеристики вероятности ошибки на бит.

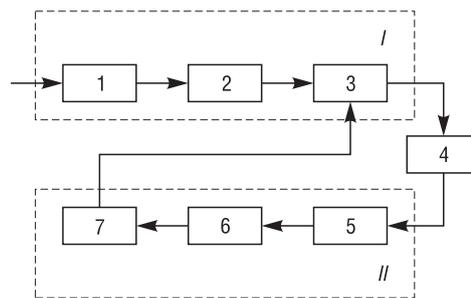


Рис. 1. Модель системы широкополосного множественного доступа с кодовым разделением каналов: *I* – базовая станция, *II* – мобильная станция; 1 – кодирование и уплотнение импульсных сигналов, 2 – расширение спектра, 3 – предварительная фильтрация, 4 – канал связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, 5 – демодулятор, 6 – декодирующее устройство, 7 – устройство, формирующее алгоритм прогнозирования параметров канала связи

Fig. 1. W-CDMA system model: *I* – base station, *II* – mobile station; 1 – pulse coding and multiplexing, 2 – spectrum spreading, 3 – pre-filtering, 4 – multipath wave propagation, 5 – demodulator, 6 – decoder, 7 – generation of the prediction algorithm of channel parameters

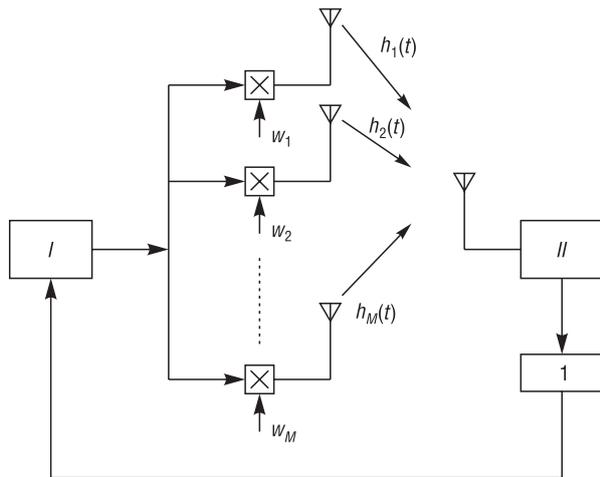


Рис. 2. Система направленных передающих антенн (антенная решетка передающей антенны) базовой станции: *I* – базовая станция; *II* – мобильная станция; 1 – устройство, формирующее алгоритм прогнозирования параметров канала связи

Fig. 2. Transmit antenna array system of the base station: *I* – base station; *II* – mobile station; 1 – generation of the prediction algorithm of channel parameters

Система направленных передающих антенн и селективное разнесение передаваемых сигналов представляют собой технологии разнесения передаваемых сигналов с замкнутой петлеобразной обратной связью между бортовым оборудованием летательного аппарата и передающим устройством центра управления полетом. Предполагается, что большое количество передающих антенн или большая по размерам антенная решетка передающей антенны используются центром управления полетом, и только одна приемная антенна располагается на борту летательного аппарата.

Система направленных передающих антенн представлена на рис. 2. Для системы направленных передающих антенн каждая антенна передает когерентный сигнал, представляющий собой одинаковую кодированную последовательность информационных символов, но использующий свою специфическую весовую функцию. Каждая передающая антенна имеет индивидуальный сигнал управления, который дает возможность приемному устрой-

ству бортового оборудования летательного аппарата индивидуально оценивать параметры или коэффициенты канала связи с многолучевым излучением [20]. Цель такой схематической архитектуры заключается в выборе весовых функций, используемых передающим устройством центра управления полетом, в результате чего полная мощность сигнала, принимаемого приемным устройством бортового оборудования летательного аппарата, становится максимальной.

Рассмотрим M передающих антенн и канал связи с гладкими замираниями. Определим $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_M]$ как вектор-строку, где h_i – коэффициент замирания многолучевого канала связи между i -й передающей антенной центра управления полетом и приемной антенной летательного аппарата. Тогда весовые функции системы направленных передающих антенн могут быть представлены в виде $\mathbf{W} = \mathbf{h}^H / \sqrt{\mathbf{h}\mathbf{h}^H}$ [5], где \mathbf{h}^H – эрмитово преобразование вектора \mathbf{h} . Если существует L направлений многолучевого излучения сигнала для каждой передающей антенны, тогда вектором весовых функций, который максимизирует полную мощность сигнала, принимаемого приемной антенной летательного аппарата, является собственный вектор \mathbf{v}_{\max} , соответствующий наибольшему собственному значению λ_{\max} матрицы $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$ размером $M \times M$ [6], где

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_M] \text{ и } \mathbf{h}_i = [h_{i_0}, h_{i_1}, \dots, h_{i_M}]^T \quad (2)$$

– вектор, содержащий коэффициенты L многолучевых излучений передаваемого сигнала между i -й передающей антенной центра управления полетом и приемной антенной летательного аппарата. В случае гладких замираний канала связи характеристика вероятности ошибок на бит системы направленных передающих антенн эквивалентна характеристике вероятности ошибок на бит при оптимальном суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала с порядком разнесения M (число передающих антенн). Однако технология системы направленных передающих антенн не обеспечивает оптимальную характеристику вероятности ошибок на бит при многолучевом излучении передаваемого сигнала из-за присутствия замираний в канале связи. Кроме того, эта технология требует наличия многоканального приемного устройства для разнесенных сигналов на борту летательного аппарата.

При методе селективного разнесения передаваемых сигналов выделенный канал связи данного пользователя переключается на предназначенную систему с наибольшей мощностью принимаемого сигнала. Идеальная характеристика вероятности ошибок на бит при этой технологии совпадает с характеристикой вероятности ошибок на бит при разнесенном приеме. Частота

переключения селективного разнесения передаваемых сигналов определяет частоту, с которой сигнал выбора передающей антенны возвращается в передающее устройство центра управления полетом, в данном случае – это частота переключения передающих антенн. Различные частоты переключения передающих антенн приводят к различным характеристикам вероятности ошибок на бит системы.

Нижняя граница характеристики вероятности ошибок на бит при этой технологии достигается в том случае, когда переключение передающей антенны выполняется для каждого переданного символа, так называемое селективное разнесение при передаче каждого бита. Эта нижняя граница определяется следующим образом. Предположим, что многоканальное приемное устройство для разнесенных сигналов с оптимальным сложением сигналов каждого канала используется бортовой аппаратурой летательного аппарата. Тогда функция распределения вероятностей коэффициента замираний при многолучевом излучении передаваемого сигнала в канале связи на выходе многоканального приемного устройства для разнесенных сигналов определяется как

$$F_{q_b^s}(q) = M! \int_0^q \int_0^{q_1} \dots \int_0^{q_{L-1}} f_{q_b}(q_M) \dots f(q_1) dq_M \dots dq_2 dq_1, \tag{3}$$

где

$$f_{q_b}(q) = \frac{1}{q_b^L (L-1)!} q^{L-1} \exp(-q/q_b) \tag{4}$$

– плотность распределения вероятностей для суммирования по мощности с учетом L направлений многолучевого излучения передаваемого сигнала в канале связи; q_b – среднее значение отношения сигнал/помеха для одного направления многолучевого излучения передаваемого сигнала в канале связи, которое, по предположению, является идентичным для всех направлений многолучевого излучения передаваемого сигнала в канале связи и определяется как

$$q_b = \frac{\mathcal{E}_b}{\mathcal{N}_0} E\{h_{ij}\}, \tag{5}$$

где \mathcal{E}_b – энергия на бит передаваемого сигнала; h_{ij} – коэффициент замираний для любого из направлений многолучевого излучения передаваемого сигнала; $E\{\dots\}$ – математическое ожидание случайной величины. Тогда вероятность ошибок на бит определяется как

$$P_{STD_{L \times M}}^{error} = \int_0^\infty f_{q_b^s}(q) P_{BPSK}^{error}(q) dq, \tag{6}$$

где $f_{q_b^s}(q)$ – плотность распределения вероятностей, определяемая дифференцированием (3);

$$P_{BPSK}^{error}(q) = Q(\sqrt{2q}) \tag{7}$$

– вероятность ошибок на бит для системы с двоичной фазовой модуляцией; $Q(x)$ – Q -функция, определяемая как [23]

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-0,5t^2) dt. \tag{8}$$

В частности, вероятность ошибок на бит при селективном разнесении передаваемого каждого бита в условиях гладких замираний в независимых каналах связи при многолучевом излучении передаваемого сигнала с идентичным распределением параметров замираний и наличии M передающих антенн может быть представлена в следующем виде [24]:

$$P_{STD}^{error} = \sum_{k=0}^{M-1} \frac{M}{2(k+1)} (-1)^k \binom{M-1}{k} \left(1 - \sqrt{\frac{q_b}{k+1+q_b}} \right). \tag{9}$$

Для каналов связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала разнесение по частоте может осуществляться, используя многоканальное приемное устройство для разнесенных сигналов. Предварительная фильтрация передаваемых сигналов с учетом весовых функций, содержащих информацию о коэффициентах (параметрах) канала связи с многолучевым

излучением передаваемого сигнала, выполняемая передающей аппаратурой центра управления полетом, гарантирует характеристику вероятности ошибок на бит очень близкую к характеристике вероятности ошибок на бит в случае применения многоканального приемного устройства с оптимальным суммированием дифференциально взвешенных сигналов каждого канала при использовании единственного согласованного фильтра в приемном устройстве бортового оборудования летательного аппарата [11–13].

Эта технология предварительного кодирования известна как сложение разнесенных сигналов при предварительной фильтрации передаваемых сигналов с учетом знания информации о параметрах (коэффициентах) канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала.

На рис. 3 представлена описываемая технология, когда сигнал передается одной антенной решеткой передающей антенны (или многоэлементной передающей антенной) через канал связи с многолучевым распространением передаваемого сигнала, замирания в котором описываются следующей импульсной переходной характеристикой $\sum_{i=0}^{L-1} h_i(t)\delta(t - iT_c)$ [25]. Как можно заметить из рис. 3, коэффициенты предварительной фильтрации являются комплексно сопряженными величинами по отношению к коэффициентам канала связи с многолучевым излучением. Порядок использования этих коэффициентов при предварительной фильтрации обратный порядку использования коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания.

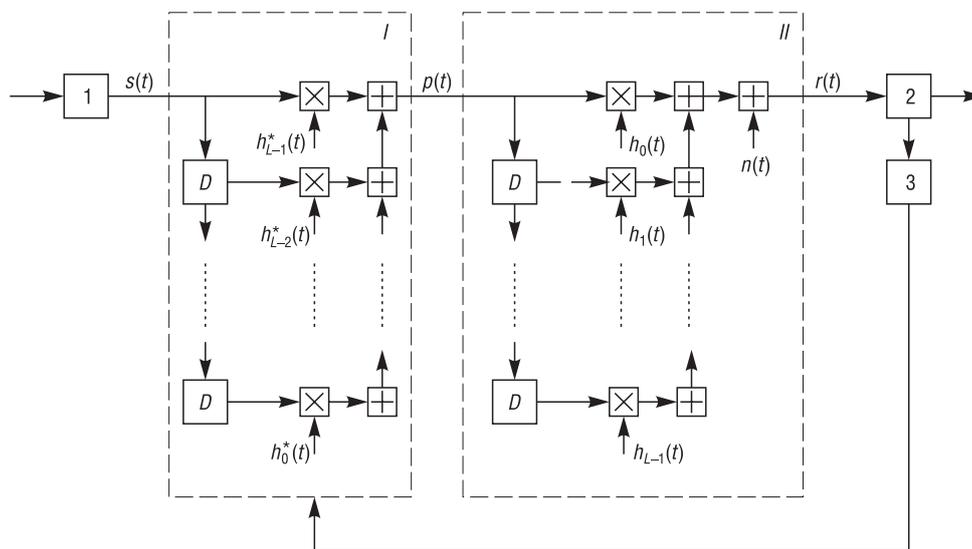


Рис. 3. Комбинация предварительной фильтрации и разнесения передаваемых сигналов: *I* – предварительная фильтрация; *II* – канал связи с многолучевым излучением; *D* – блок задержки во времени; 1 – расширение спектра и масштабирование; 2 – фильтр, согласованный с сигналом $s[t - (L - 1)T_c]$; 3 – устройство, формирующее алгоритм прогнозирования параметров канала связи

Fig. 3. Composition of pre-filtering and transmission diversity: *I* – pre-filtering; *II* – multipath wave propagation channel; *D* – delay scheme; 1 – spectrum spread and scaling; 2 – matched filter, 3 – generation of the prediction algorithm of channel parameters

Пространственно-временное разнесение сигналов. При использовании центром управления полетом системы направленных передающих антенн при наличии канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала вследствие замираний невозможно обеспечение оптимальной характеристики вероятности ошибок на бит, то есть невозможно получить характеристику вероятности ошибок, присущую оптимальному сложению разнесенных сигналов по всем пространственным и частотным каналам разнесенного приема [6], что обусловлено использованием скалярных весовых функций в системе направленных передающих антенн.

В настоящей работе исследуется метод пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов с учетом информации о параметрах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, который оптимальным образом сочетает мощность

сигналов, передаваемых по различным направлениям многолучевого излучения, ассоциированными со всеми передающими антеннами центра управления полетом, используя предварительное кодирование и соответствующее сжатие (масштабирование) по частоте. Для m -й передающей антенны предварительная фильтрация широкополосного сигнала $s(t)$ выполняется таким образом, что форма передаваемого импульса может быть представлена в виде [26]

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^{L-1} |h_{m,j}(t)|^2}} \sum_{j=0}^{L-1} h_{m,L-1-j}^*(t) s(t - jT_c), \quad (10)$$

где $s(t)$ – передаваемый информационный сигнал; $h_{m,j}(t)$ – коэффициент канала связи с многолучевым излучением, соответствующий j -му направлению m -й передающей антенны. Полагаем, что приемное устройство бортовой аппаратуры летательного аппарата состоит из единственного фильтра, согласованного по всем параметрам с информационным сигналом $s[t - (L - 1)T_c]$. Принимаемый сигнал в момент времени $t - (L - 1)T_c$ может быть задан в форме [27]

$$r(t) = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^{L-1} |h_{m,j}(t)|^2} b + n(t), \quad (11)$$

где b – переданный символ с двоичной фазовой модуляцией; $n(t)$ – помеха после фильтрации. Такая операция эквивалентна оптимальному сложению разнесенных сигналов при наличии $L \times M$ каналов разнесенного приема. В этом случае вероятность ошибок на бит определяется, используя результаты, полученные в [28], следующим образом:

$$P^{error} = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{q_b}{1+q_b}} \right) \right]^{L \times M} \sum_{k=0}^{L \times M - 1} \binom{L \times M - 1 + k}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{q_b}{1+q_b}} \right) \right]^k. \quad (12)$$

Алгоритм долгосрочного прогнозирования. Как показано в [14–16], алгоритм долгосрочного прогнозирования, основанный на критерии минимального значения среднеквадратической ошибки, может использоваться для точного оценивания наперед, по крайней мере на несколько миллисекунд, быстро изменяющихся во времени параметров канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания.

В настоящей работе используется определение минимального значения среднеквадратической ошибки индивидуальных комплексных коэффициентов канала связи с многолучевым излучением, ассоциированных со всеми возможными направлениями многолучевого излучения передаваемого сигнала [14]. Этот алгоритм основан на методе линейного предсказания при использовании авторегрессионного алгоритма моделирования канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала. Полагаем, что мы дискретизируем или квантуем функцию изменения параметров канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала с частотой $f_s = 1/T_s$, где $f_s \geq f_D$, f_D – максимальная доплеровская частота или сдвиг. Канал связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала описывается процессом $c(t)$, характеризующимся комплексным рэлеевским распределением. Полагаем, что $c_n = c(iT_s)$. Нашей целью является предсказание значения c_n на основе наблюдения ℓ предыдущих значений выборки, то есть $c_{n-\ell}, c_{n-\ell+1}, \dots, c_{n-2}, c_{n-1}$. Мы определяем автокорреляционную матрицу \mathbf{R} с коэффициентами $R_{ij} = E\{c_{n-i} c_{n-j}^*\}$ и автокорреляционный вектор \mathbf{r} с коэффициентами $r_i = E\{c_n c_{n+i}^*\}$. Тогда минимальное значение среднеквадратической ошибки предсказания значения коэффициента c_n определяется как $\hat{c}_n = \sum_{i=1}^{\ell} d_i c_{n-i}$, где $\mathbf{d} = \{d_i\}, i = 1, \dots, \ell$ и $\mathbf{d} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}$. При проведении моделирования $\ell = 500$ и выборка наблюдения состоит из 2000 значений для определения автокорреляционной функции коэффициента c_n . Размер выборки может быть сокращен, и возможно избежать инверсии автокорреляционной матрицы при использовании адаптивного долгосрочного предсказания [15].

Для систем с широкополосным множественным доступом и кодовым разделением каналов частота дискретизации f_s выбирается равной 1,6 кГц, что приводит к задержке во времени при расчете параметров канала связи с многолучевым излучением, равной 0,625 мс. Кроме того, желательно получать информацию о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала на будущий момент времени, превосходящий один интервал дискретизации,

равный $(1,6 \text{ кГц})^{-1}$, если частота переключения передающей антенны меньше 1,6 кГц, например 400 Гц [14, 15, 24].

Описанный алгоритм долгосрочного прогнозирования используется для получения предсказываемых значений текущих и ожидаемых (последующих) коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, определяемых выборочными значениями функции $c(t)$. В случае использования метода селективного разнесения передаваемых сигналов эти коэффициенты используются для выбора передающей антенны, обеспечивающей наибольшую мощность сигнала, принимаемого бортовым оборудованием летательного аппарата. При использовании системы направленных передающих антенн эти коэффициенты используются для расчета весовых функций для каждой передающей антенны центра управления полетом.

В заключение необходимо отметить, что для предварительной фильтрации и для пространственно-временной предварительной фильтрации эти коэффициенты используются при фильтрации широкополосных сигналов перед их трансляцией по каналу связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания. Технологии разнесения сигналов, используемые как при применении системы направленных передающих антенн, так и при эксплуатации пространственно-временной предварительной фильтрации, требуют наличия информации о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала для каждого переданного информационного символа. Поскольку информация о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала передается с борта летательного аппарата в центр управления полетом посредством обратной связи с частотой 1,6 кГц, необходимо использовать интерполяцию для получения промежуточных значений коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала.

Для этих технологий предсказываются начало текущего слота и начало следующего слота дискретизации, используя предыдущие значения коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала. В этом случае указанные значения используются для расчета промежуточных коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала в промежутке между двумя слотами так, что мы получаем непрерывно информацию о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания.

Моделирование: результаты и дискуссия. При проведении моделирования мы не использовали те идеальные предположения, которые обсуждались в данной статье. Компьютерное моделирование применяется для оценивания вероятности ошибок на бит для описанных технологий. При проведении моделирования мы использовали модель системы с множественным доступом и кодовым разделением каналов при несущей частоте равной 2 ГГц; скорость летательного аппарата выбиралась 370 км/ч; частота передачи элементарных посылок сигнала равнялась 4,096 МГц; скорость передачи информационных сигналов от центра управления полетом до летательного аппарата выбиралась, как и в [20], равной 128 Кбит/с. Передаваемые данные кодировались.

Полагаем, что бортовое оборудование летательного аппарата не осуществляло оценку ошибок передаваемой информации. Результаты моделирования представляются на основе использования модели гауссовской помехи. Все результаты моделирования, как при оптимальном сложении разнесенных сигналов в месте приема, при отсутствии разнесения передаваемых сигналов, при селективном разнесении каждого бита передаваемых сигналов, продемонстрированные на рисунках в виде вероятности ошибок на бит как функции отношения сигнал/помеха на бит, представлены для случая, когда информация о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала известна.

На рис. 4 представлены результаты для селективного разнесения сигналов с частотой переключения, равной 1,6 кГц, при наличии многоканального приемного устройства для разнесенных сигналов на борту летательного аппарата (предварительная фильтрация с разнесением каналов передающим устройством базовой станции или центра управления полетом отсутствует) и пространственно-временной предварительной фильтрации, осуществляемой передающим устройством базовой станции или центра управления полетом летательного аппарата с учетом знания информации о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала.

Технология селективного разнесения сигналов с частотой дискретизации, равной 1,6 кГц, и пространственно-временной предварительной фильтрации, осуществляемой передающим устройством с учетом знания информации о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением, при использовании алгоритма долгосрочного предсказания сравниваются при одинаковых начальных условиях и технических параметрах, когда задерживаемая во времени информация о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала используется для выбора передающей антенны из системы направленных передающих антенн или для определения весовых функций, используемых при предварительной фильтрации передаваемых сигналов.

Использование алгоритма долгосрочного прогнозирования позволяет получить выигрыш от 0,5 до 1,0 дБ относительно отношения сигнал/помеха для одного и того же значения вероятности ошибок на бит для всех рассмотренных технологий. В [14, 15, 24] демонстрируется тот факт, что долгосрочное прогнозирование коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания, становится более успешным при уменьшении частоты переключения до 400 Гц. Из рис. 4 видно, что пространственно-временная предварительная фильтрация передаваемых сигналов с учетом информации о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала превосходит по характеристике вероятности ошибок на бит селективное разнесение передаваемых сигналов для всех частот переключения и обеспечивает преимущество в 1,0 дБ относительно отношения сигнал/помеха для одного и того же значения вероятности ошибок на бит при частоте переключения, равной 1,6 кГц.

Поскольку пространственно-временная предварительная фильтрация использует полную информацию о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала и не подвержена воздействию помех при многолучевом излучении передаваемого сигнала, порядок оптимального сложения разнесенных сигналов в месте приема точно такой же, как и при пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов, и характеристика вероятности ошибки на бит в этом случае является нижней границей для всех технологий и методов разнесения передаваемых сигналов. В используемых на практике системах с широкополосным доступом и кодовым разделением каналов ортогональные коды, используемые для разделения пользователей в случае множества мобильных станций, порождают помехи, образующиеся при многолучевом излучении передаваемого сигнала. Вследствие этих помех, ошибок прогнозирования коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, система с пространственно-временной предварительной фильтрацией передаваемых сигналов не обладает идеальной характеристикой вероятности ошибок на бит, задаваемой,

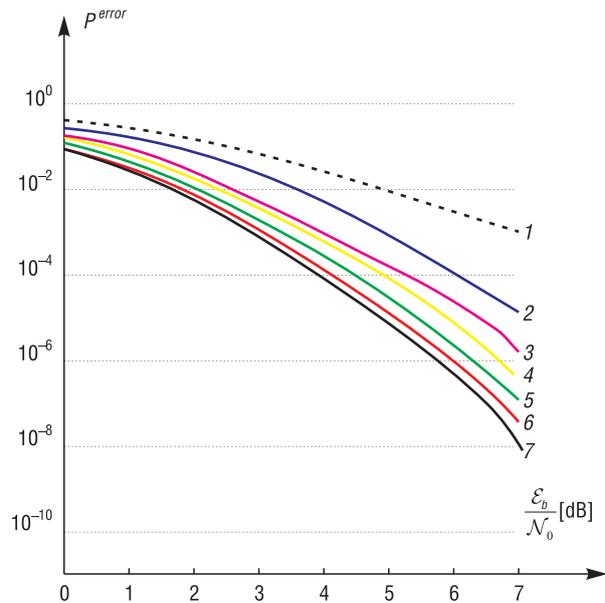


Рис. 4. Сравнение селективного разнесения передаваемых сигналов и пространственно-временной предварительной фильтрации: канал связи с четырехлучевым излучением передаваемого сигнала; две передающие антенны; $f_D = 200$ Гц; 1 – разнесение отсутствует; 2 – селективное разнесение с частотой 1,6 кГц без прогнозирования; 3 – селективное разнесение с частотой 1,6 кГц с прогнозированием; 4 – селективное разнесение для каждого бита; 5 – пространственно-временная предварительная фильтрация без прогнозирования; 6 – пространственно-временная предварительная фильтрация с прогнозированием; 7 – оптимальное сложение разнесенных сигналов для канала связи с восьмилучевым излучением передаваемого сигнала

Fig. 4. Comparison between the selective transmission diversity and space-time pre-Rake procedure: four paths; two transmit antennas; $f_D = 200$ Hz; 1 – no transmit diversity; 2 – selective transmission diversity with frequency 1.6 kHz, “no” prediction; 3 – selective transmission diversity with frequency 1.6 kHz, “yes” prediction; 4 – selective transmission diversity per bit; 5 – space-time pre-Rake procedure, “no” prediction; 6 – space-time pre-Rake procedure, “yes” prediction; 7 – optimal diversity combining at eight paths

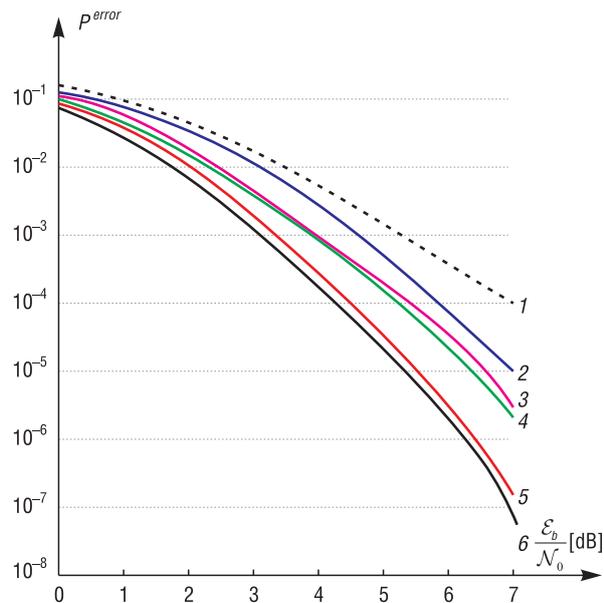


Рис. 5. Сравнение системы направленных передающих антенн и пространственно-временной предварительной фильтрации: канал связи с четырехлучевым излучением передаваемого сигнала; две передающие антенны; $f_D = 200$ Гц; 1 – оптимальное сложение разнесенных сигналов для канала связи с четырехлучевым излучением передаваемого сигнала; 2 – система направленных передающих антенн без прогнозирования; 3 – система направленных передающих антенн с прогнозированием; 4 – пространственно-временная предварительная фильтрация без прогнозирования; 5 – пространственно-временная предварительная фильтрация с прогнозированием; 6 – оптимальное сложение разнесенных сигналов для канала связи с восьмилучевым излучением передаваемого сигнала

Fig. 5. Comparison between the transmitting antenna array and pre-Rake procedure: four paths; two transmit antennas; $f_D = 200$ Hz; 1 – optimal diversity combining at four paths; 2 – transmit antenna array system, “no” prediction; 3 – transmit antenna array system, “yes” prediction; 4 – space-time pre-Rake procedure, “no” prediction; 5 – space-time pre-Rake procedure, “yes” prediction; 6 – optimal diversity combining at eight paths

каждого бита и для случая отсутствия разнесения передаваемых сигналов и определялось по результатам моделирования для других технологий и методов разнесения передаваемых сигналов. Исследование отношения сигнал/помеха в месте приема позволяет определить непосредственно преимущества технологии разнесения сигналов для различных методов сложения при наличии разного рода каналов связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала.

Из результатов моделирования видно, что использование пространственно-временной предварительной фильтрации совместно с алгоритмом долгосрочного прогнозирования коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала позволяет приблизиться к оптимальной характеристике вероятности ошибки на бит в случае быстрого изменения во времени значений коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала при использовании системы направленных передающих антенн (или антенной решетки). Однако это преимущество достигается за счет значительного функционального и схемотехнического усложнения оборудования. Поскольку нагрузка обратной связи между летательным аппаратом

например, при оптимальном сложении разнесенных сигналов в месте приема при восьми-канальном многолучевом излучении передаваемого сигнала.

На рис. 5 представлены характеристики вероятности ошибок на бит для пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов с учетом информации о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания в канале связи, и системы направленных передающих антенн центра управления полетом летательного аппарата с многоканальным приемным устройством для разнесенных сигналов на борту летательного аппарата [6]. Алгоритм долгосрочного прогнозирования, описанный выше, используется для обеспечения возможности пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов и для расчета весовых функций, необходимых для системы направленных передающих антенн. Из рис. 5 видно, что характеристика вероятности ошибки на бит пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов с учетом знания информации о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания в канале связи, превосходит аналогичную характеристику вероятности ошибок на бит системы направленных передающих антенн при наличии каналов связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания в канале связи.

На рис. 4 и 5 вероятность ошибок на бит представлена как функция отношения сигнал/помеха на кодированный бит. Это отношение сигнал/помеха оценивалось теоретически для селективного разнесения при передаче

и центром управления полетом очень высокая, фильтрация и алгоритм долгосрочного прогнозирования выполняются с помощью аппаратного оборудования центра управления полетом летательного аппарата, так как в этом случае усложнение в структурно-функциональной организации передающего устройства центра управления полетом летательного аппарата не вызывает каких-либо проблем, касающихся потребляемой мощности и массы оборудования.

Использование системы направленных передающих антенн позволяет уменьшить нагрузку обратной связи между летательным аппаратом и центром управления полетом и уменьшить мощность сигнала обратной связи для расчета комплексной весовой функции на одну антенну системы направленных передающих антенн при условии, что алгоритм долгосрочного предсказания и фильтрация выполняются приемным устройством оборудования летательного аппарата. Таким образом, аппаратная сложность оборудования летательного аппарата будет выше в случае использования системы направленных передающих антенн центром управления полетом летательного аппарата по сравнению с использованием пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов, выполняемой передающей аппаратурой центра управления полетом летательного аппарата с учетом знания коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания в канале связи.

Кроме того, использование системы направленных передающих антенн не обеспечивает значительного преимущества характеристики вероятности ошибок на бит по сравнению с применением технологии селективного разнесения передаваемых сигналов в случае незначительного количества передающих антенн центра управления полетом летательного аппарата. Аппаратурно-функциональная сложность в случае применения технологии селективного разделения передаваемых сигналов минимальная, поскольку требуется наличие только обратной связи битов выбора антенны для выбора антенны, передающей сигнал в канал связи с наибольшей мощностью. Технология селективного разнесения передаваемых сигналов может без особой сложности сочетаться с предварительной фильтрацией передаваемых сигналов, оставаясь наименее сложной по аппаратно-функциональной реализации по сравнению с использованием технологии пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов [18].

Таким образом, методы и технологии, обсуждаемые в настоящей работе, предоставляют широкие возможности для компромисса между аппаратно-функциональной сложностью реализации и характеристикой вероятности ошибок на бит. Причем технология селективного разнесения передаваемых сигналов является простейшей в смысле аппаратно-функциональной реализации, но наименее эффективной в отношении мощности сигнала, транслируемого по каналу связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания в канале связи. В то время как пространственно-временная предварительная фильтрация передаваемых сигналов с учетом информации о коэффициентах канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания в канале связи, являясь наиболее сложной в смысле аппаратно-функциональной реализации, позволяет получать характеристику вероятности ошибок на бит, близкую к оптимальной.

Выводы. Технология пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов с учетом знания значений коэффициентов канала связи с многолучевым излучением, порождающим замирания в канале связи, выполняемая передающей аппаратурой центра управления полетом летательного аппарата, сравнивалась с технологией селективного разнесения передаваемых сигналов и системой направленных передающих антенн при использовании реальных каналов связи с многолучевым излучением, порождающим замирания в канале связи, для систем с широкополосным множественным доступом и кодовым разделением каналов при наличии замираний.

Характеристика вероятности ошибок на бит при использовании пространственно-временной предварительной фильтрации передаваемых сигналов с учетом знания значений коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания в канале связи, выполняемой аппаратурой центра управления полетом летательного аппарата, приближается к характеристике вероятности ошибок на бит для оптимального сложения разнесенных сигналов в месте приема для всех пространственных и частотных каналов разнесенного приема.

Показано, что все технологии и методы, использующие закрытую петлеобразную обратную связь между приемным устройством бортового оборудования летательного аппарата и центром управления полетом, используют алгоритм долгосрочного прогнозирования коэффициентов канала связи с многолучевым излучением передаваемого сигнала, порождающим замирания в канале связи, с целью аппроксимации идеальной характеристики вероятности ошибки на бит при быстро изменяющихся во времени значений коэффициентов канала связи с многолучевым излучением, порождающим замирания в канале связи.

Список использованных источников

1. Tarokh, V. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction / V. Tarokh, N. Seshadri, A. R. Calderbank // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1998. – Vol. 44, №2. – P. 744–765. <https://doi.org/10.1109/18.661517>
2. Hochwald, B. A transmitter diversity scheme for wideband CDMA systems based on space-time spreading / B. Hochwald, T.L. Marzetta, C.B. Papadias // *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*. – 2001. – Vol. 19, №1. – P. 48–60. <https://doi.org/10.1109/49.909608>
3. Hottinen, A. Transmit diversity by antenna selection in CDMA downlink / A. Hottinen, R. Wichman // *IEEE 5th International Symposium in Spread Spectrum Techniques and Applications*. – 1998. – №3. – P. 767–770. <https://doi.org/10.1109/isssta.1998.722481>
4. Raitola, M. Transmission diversity in wideband CDMA / M. Raitola, A. Hottinen, R. Wichman // *IEEE 49th Vehicular Technology Conference*. – 1999. – №2. – P. 1545–1549. <https://doi.org/10.1109/vetec.1999.780606>
5. Rohani, K. A comparison of base station transmit diversity methods for third generation cellular standards / K. Rohani, M. Yarrison, K. Kuchi // *IEEE 49th Vehicular Technology Conference*. – 1999. – №1. – P. 351–355. <https://doi.org/10.1109/vetec.1999.778075>
6. Frank, C.D. Optimal transmit array weighting for DS-CDMA with channel feedback / C.D. Frank // *Conference on Information Sciences and Systems*. – 2000. – №1. – P. WA3 28–33.
7. Shapira, J. *CDMA Radio with Repeaters* / J. Shapira, S. Miller. – N. Y.: Springer, USA, 2007. – 358 p.
8. Chen, H. *The Next Generation CDMA Technology* / H. Chen. – Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2007. – <https://doi.org/10.1002/9780470022962.ch10>
9. Alkhawaldeh, S.A. CDMA with transmit antenna diversity technique for broadband propagation systems / S.A. Alkhawaldeh // *World Appl. Sci. J.* – 2012. – Vol. 17, №9. – P. 1159–1166.
10. Kushwah, A. Performance estimation of 2x3 MIMO-MC-CDMA in Rayleigh fading channel / A. Kushwah, S. Manglasheril // *Int. J. Comput. Trends Technol. (IJCTT)*. – 2014. – Vol. 9, №1. – P. 32–35. <https://doi.org/10.14445/22312803/IJCTT-V9P105>
11. Esmailzadeh, R. Pre-RAKE diversity combination for direct sequence spread spectrum communications systems / R. Esmailzadeh, M. Nakagawa // *Proceedings of ICC'93 – IEEE International Conference on Communications, 23–26 May 1993*. – Vol. 1. – P. 463–467. <https://doi.org/10.1109/ICC.1993.397218>
12. Esmailzadeh, R. Pre-RAKE diversity combining in time division duplex CDMA mobile communications / R. Esmailzadeh, E. Sourour, M. Nakagawa // *IEEE 6th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. – 1995. – P. 431–435. <https://doi.org/10.1109/25.764996>
13. Jeong, I. A novel transmission diversity system in TDD-CDMA / I. Jeong, M. Nakagawa // *IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*. – 1998. – Vol. 3. – P. 771–775. <https://doi.org/10.1109/isssta.1998.722482>
14. Transmitter antenna diversity and adaptive signaling using long range prediction for fast fading DS/CDMA mobile radio channels / S. Hu [et al.] // *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. – 1999. – Vol. 2. – P. 824–828. <https://doi.org/10.1109/wcnc.1999.796779>
15. Duel-Hallen, A. Long-range prediction of fading signals: enabling adaptive transmission for mobile radio channels / A. Duel-Hallen, S. Hu, H. Hallen // *IEEE Signal Processing Magazine, Special Issue on Advances in Wireless and Mobile Communications*. – 2000. – Vol. 17, №3. – P. 62–75. <https://doi.org/10.1109/79.841729>
16. Eyceoz, T. Deterministic channel modeling and long-range prediction of fast fading mobile radio channels / T. Eyceoz, A. Duel-Hallen, H. Hallen // *IEEE Communications Letters*. – 1998. – Vol. 2, №9. – P. 254–256. <https://doi.org/10.1109/4234.718494>
17. Desai, N. Space diversity for wireless communications systems – a review / N. Desai, G. Makawana // *Int. J. Eng. Sci. Innovative Technol. (IJESIT)*. – 2013. – Vol. 2, №3. – P. 405–410.
18. *Communications Systems: New Research* / ed. V. Tuzlukov. – N. Y.: NOVA Science Publishers Inc., 2013. – 423 p.
19. Tuzlukov, V. Signal processing by generalized receiver in DS-CDMA wireless communication systems / V. Tuzlukov // *Contemporary Issues in Wireless Communications* / ed. M. Khatib. – INTECH, 2015. – Ch. 4. – P. 79–158. <https://doi.org/10.5772/58990>
20. Rappaport, T.S. *Wireless Communications* / T.S. Rappaport. – New Jersey: Prentice Hall, 1996. – 736 p.
21. Jakes, W.C. *Microwave Mobile Communications* / W.C. Jakes. – N. Y.: IEEE Press., 1993. – 635 p. <https://doi.org/10.1109/9780470545287>
22. Tuzlukov, V. Bit error probability of quadriphase DS-CDMA wireless communication systems based on generalized approach to signal processing / V. Tuzlukov // *Telecommun. Rev.* – 2013. – Vol. 23, №4. – P. 501–515.

23. Управление приемом и передачей сигналов в двусторонних системах с многократным пространственным разнесением / О. Р. Никитин [и др.] // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2012. – № 5 (1). – С. 65–70.
24. Tuzlukov, V. *Signal Processing in Radar Systems* / V. Tuzlukov. – Boca Raton; London; New York; Washington, D.C: CRC Press, 2012. – 601 p.
25. Копысов, А. Н. Исследование алгоритма разнесенного приема частотно-временных сигналов декаметрового диапазона / А. Н. Копысов, И. З. Климов, М. В. Тюлькин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 9–16.
26. Tuzlukov, V. Detection of spatially distributed signals by generalized receiver using radar sensor arrays / V. Tuzlukov // *Advances in Communications and Media Research*. – N. Y.: NOVA Science Publishers Inc., 2015. – Ch. 6. – P. 143–177.
27. Артемов, М. Л. Пространственное многоканальное адаптивное обнаружение радиосигналов в частотной области при неидентичных каналах приема / М. Л. Артемов, Е. Л. Абрамова, М. П. Сличенко // Радиотехника. – 2014. – № 11. – С. 5–10.
28. Tuzlukov, V. Error probability performance of quadriphase DS-CDMA wireless communication systems based on generalized approach to signal processing / V. Tuzlukov // *WSEAS Transactions on Communications*. – 2014. – Vol. 13, № 13. – P. 116–129.

References

1. Tarokh V., Seshadri N., Calderbank A. R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1998, vol. 44, no. 2, pp. 744–765. <https://doi.org/10.1109/18.661517>
2. Hochwald B. A., Marzetta T. L., Papadias C. B. A transmitter diversity scheme for wideband CDMA systems based on space-time spreading. *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, 2001, vol. 19, no. 1, pp. 48–60. <https://doi.org/10.1109/49.909608>
3. Hottinen A., Wichman R. Transmit diversity by antenna selection in CDMA downlink. *IEEE 5th International Symposium in Spread Spectrum Techniques and Applications*, 1998, no. 3, pp. 767–770. <https://doi.org/10.1109/isssta.1998.722481>
4. Raitola M., Hottinen A., Wichman R. Transmission diversity in wideband CDMA. *IEEE 49th Vehicular Technology Conference*, 1999, no. 2, pp. 1545–1549. <https://doi.org/10.1109/vetec.1999.780606>
5. Rohani K., Yarrison M., Kuchi K. A comparison of base station transmit diversity methods for third generation cellular standards. *IEEE 49th Vehicular Technology Conference*, 1999, no. 1, pp. 351–355. <https://doi.org/10.1109/vetec.1999.778075>
6. Frank C. D. Optimal transmit array weighting for DS-CDMA with channel feedback. *Conference on Information Sciences and Systems*, 2000, no. 1, pp. WA3 28–33.
7. Shapira J., Miller S. *CDMA Radio with Repeaters*. New York, Springer, USA, 2007. 358 p.
8. Chen H. *The Next Generation CDMA Technology*. Chichester, John Wiley & Sons Inc., 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470022962.ch10>
9. Alkhalwaldeh S. A. CDMA with transmit antenna diversity technique for broadband propagation systems. *World Applied Sciences Journal*, 2012, vol. 17, no. 9, pp. 1159–1166.
10. Kushwah A., Manglasheril S. Performance estimation of 2x3 MIMO-MC-CDMA in Rayleigh fading channel. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 32–35. <https://doi.org/10.14445/22312803/IJCTT-V9P105>
11. Esmailzadeh R., Nakagawa M. Pre-RAKE diversity combination for direct sequence spread spectrum communications systems. *Proceedings of ICC '93 – IEEE International Conference on Communications, 23–26 May 1993*, vol. 1, pp. 463–467. <https://doi.org/10.1109/ICC.1993.397218>
12. Esmailzadeh R., Sourour E., Nakagawa M. Pre-RAKE diversity combining in time division duplex CDMA mobile communications. *IEEE 6th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1995, pp. 431–435. <https://doi.org/10.1109/25.764996>
13. Jeong I., Nakagawa M. A novel transmission diversity system in TDD-CDMA. *IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, 1998, vol. 3, pp. 771–775. <https://doi.org/10.1109/isssta.1998.722482>
14. Hu S., Eyceoz T., Duel-Hallen A., Hallen H. Transmitter antenna diversity and adaptive signaling using long range prediction for fast fading DS/CDMA mobile radio channels. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 1999, vol. 2, pp. 824–828. <https://doi.org/10.1109/wcnc.1999.796779>
15. Duel-Hallen A., Hu S., Hallen H. Long-range prediction of fading signals: enabling adaptive transmission for mobile radio channels. *IEEE Signal Processing Magazine, Special Issue on Advances in Wireless and Mobile Communications*, 2000, vol. 17, no. 3, pp. 62–75. <https://doi.org/10.1109/79.841729>
16. Eyceoz T., Duel-Hallen A., Hallen H. Deterministic channel modeling and long-range prediction of fast fading mobile radio channels. *IEEE Communications Letters*, 1998, vol. 2, no. 9, pp. 254–256. <https://doi.org/10.1109/4234.718494>
17. Desai N., Makawana G. Space diversity for wireless communications systems – a review. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 2013, vol. 2, no. 3, pp. 405–410.
18. Tuzlukov V. (ed.). *Communications Systems: New Research*. New York, NOVA Science Publishers Inc., USA. 2013. 423 p.
19. Tuzlukov V. Signal processing by generalized receiver in DS-CDMA wireless communication systems. Khatib M. (ed.). *Contemporary Issues in Wireless Communications. Chapter 4*. INTECH, 2015. Pp. 79–158. <https://doi.org/10.5772/58990>
20. Rappaport T. S. *Wireless Communications*. New Jersey, Prentice Hall, 1996. 736 p.

21. Jakes W. C. *Microwave Mobile Communications*. New York, IEEE Press., 1993. 635 p. <https://doi.org/10.1109/9780470545287>
22. Tuzlukov V. Bit error probability of quadriphase DS-CDMA wireless communication systems based on generalized approach to signal processing. *Telecommunications Review*, 2013, vol. 23, no. 4, pp. 501–515.
23. Nikitin O. P., Polushin P. A., Sinitzyn D. V., Matucha V. A. Signal processing and system control at multipath diversity transmission. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*, 2012, no. 5 (1), pp. 65–70 (in Russian).
24. Tuzlukov V. *Signal Processing in Radar Systems*. Boca Raton, London, New York, Washington, CRC Press, 2012. 601 p.
25. Kopysov A. N., Klimov I. Z., Tuylkin M. V. Study of diversity combining of space-time decimeter signals. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Smart Systems in Industry], 2010, vol. 16, no. 2, pp. 9–16 (in Russian).
26. Tuzlukov V. Detection of spatially distributed signals by generalized receiver using radar sensor arrays. *Advances in Communications and Media Research. Chapter 6*. New York, NOVA Science Publishers Inc., 2015, pp. 143–177.
27. Artemov M. L., Abramova E. L., Slichenko M. P. Space multichannel adaptive detection of radio signals in frequency domain under non-identical channels. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2014, no. 11, pp. 5–10 (in Russian).
28. Tuzlukov V. Error probability performance of quadriphase DS-CDMA wireless communication systems based on generalized approach to signal processing. *WSEAS Transactions on Communications*, 2014, vol. 13, no. 13, pp. 116–129.

Информация об авторе

Тузлуков Вячеслав Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220096, Минск, Республика Беларусь). E-mail: slava.tuzlukov@mail.ru

Information about the author

Vyacheslav P. Tuzlukov – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Technical Maintenance of Aviation and Radio Electronic Equipment, Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220096, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slava.tuzlukov@mail.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

УДК 004.3;519.718.2;519.873;629.78
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-347-358>

Поступила в редакцию 25.10.2018
Received 25.10.2018

Л. И. Кульбак, О. П. Чиж, Н. Н. Парамонов, А. Г. Рымарчук, Т. С. Мартинович

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КЛАСТЕРНОЙ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Аннотация. Исследование показателей надежности проводилось на примере кластерной суперкомпьютерной конфигурации «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ» (далее – кластер), разработанной в рамках научно-технической программы Союзного государства «СКИФ-Недра» (2015–2018 гг.). Кластер представляет собой стационарную суперкомпьютерную конфигурацию, предназначенную для решения ресурсоемких прикладных задач в центрах обработки данных (ЦОД). Вычислительные платформы и другие модули кластера располагаются в одной 19" стойке типа APC Netshelter высотой 42U. Теоретическая пиковая производительность кластера – 100 Тфлопс. Приведены базовые архитектурные принципы, реализованные в кластере, состав и структурно-функциональная схема кластера.

Предложено методическое обеспечение расчета надежности кластера, базирующееся на предыдущих исследованиях авторов. Обоснована структурная схема надежности (СН) кластера, состоящая из двух частей – ядра кластера и совокупности вычислительных средств (узлов) (СВС). В ядро кластера и в СВС входят составные части (СЧ), отказы которых приводят к снижению производительности кластера, причем в ядро входят СЧ, отказы которых приводят к снижению производительности кластера до нуля. Обоснован выбор основных показателей надежности ядра кластера и СВС, приведены формулы расчета этих показателей. Проведен анализ последствий отказов комплектующих кластер СЧ. С учетом этого анализа определена СН ядра кластера, позволяющая определить формулу расчета показателей надежности ядра кластера. Предложена математическая модель надежности (граф состояний) СВС кластера и формулы для вычисления средней наработки на отказ и на сбой СВС кластера.

Определена надежность СЧ кластера, для которых отсутствуют достоверные сведения по их надежности, на основании СН этих СЧ. Проведена оценка надежности кластера в целом, основанная на вычислении показателей по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов, а также по данным эксплуатации суперкомпьютеров семейства «СКИФ». С учетом этой оценки и полученных расчетных соотношений рассчитаны показатели надежности кластера для двух вариантов (при наличии и отсутствии резерва вычислительных узлов).

Высокие значения показателей надежности кластера были достигнуты благодаря принятым в процессе его разработки архитектурным и структурным решениям, направленным на повышение его живучести. Полученный расчет показателей надежности разработанного кластера позволит определить наиболее эффективные стратегии его эксплуатации, а также подходы к проектированию и применению кластерных суперкомпьютерных конфигураций.

Ключевые слова: кластер, суперкомпьютер, надежность, показатели надежности, расчет надежности, резервирование

Для цитирования: Оценка надежности кластерной суперкомпьютерной конфигурации / Л. И. Кульбак [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 347–358. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-347-358>

L. I. Kulbak, O. P. Tchij, N. N. Paramonov, A. G. Rymarchuk, T. S. Martinovich

United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

RELIABILITY ASSESSMENT OF CLUSTER SUPERCOMPUTER CONFIGURATION

Abstract. The study of reliability indicators was carried out on the example of a cluster supercomputer configuration of “SKIF-GEO” (further cluster) worked out within the framework of the scientific and technical program “SKIF-Nedra” (2015–2018, Program of the Union State of Russia and Belarus). The cluster is a stationary supercomputer configuration designed to

solve resource-intensive applications in data processing centers (DPC). Computing platforms and other cluster modules are located in the same 19" rack height of 42U. Theoretical peak performance of cluster – 100 Tflop/s. The basic architectural principles implemented in the cluster, the composition and structural-functional scheme of the cluster are given.

A methodological support for calculating the reliability of the cluster, based on previous studies by the authors, is proposed. Taking into account these studies, the structural scheme of reliability (SSR) of the cluster, consisting of two parts – the cluster core and the combination of computing facilities (nodes) (CCF), is substantiated. The component parts (CP) include components of the cluster, the failure of which leads to a decrease in performance to zero. CCF includes CP of cluster, the failures of which lead to a decrease in cluster performance. The choice of the main indicators of the reliability of the cluster core and CCF is grounded and formulas for calculating these indicators are given. The analysis of the consequences of failures of cluster components is made. Taking into account the analysis, the SSR of the cluster core is determined, which allows to derive a formula for calculating the cluster core reliability indicators. A mathematical model of reliability (state graph) of an CCF cluster is proposed, which allows one to derive formulas for calculating the mean time to failure and the mean time for a failure of the CCF of cluster.

An assessment of the reliability of CP cluster, for which there is no reliable information on their reliability, is determined based on the SSR of these CP. An assessment of the reliability of the cluster as a whole, based on the calculation of reliability indicators based on reference data on the reliability of components and components, as well as on data from the operation of supercomputers of family "SKIF" has been carried out. Taking into account this estimation and the calculated ratios obtained, the cluster reliability indicators for two options were calculated (in the presence and absence of a reserve of computing nodes).

High values of cluster reliability indicators were achieved due to the architectural and structural solutions adopted in the process of its development, aimed at increasing its survivability.

Keywords: cluster, supercomputer, reliability, reliability indicators, reliability calculation, reservation

For citation: Kulbak L. I., Tchij O. P., Paramonov N. N., Rymarchuk A. G., Martinovich T. S. Reliability assessment of cluster supercomputer configuration. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 347–358 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-347-358>

Введение. В 2015–2018 гг. Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси принимал участие в выполнении научно-технической программы Союзного государства «СКИФ-Недра», в рамках которой разрабатывалась кластерная суперкомпьютерная конфигурация «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ» (далее – кластер). Данная стационарная суперкомпьютерная конфигурация предназначена для решения ресурсоемких прикладных задач в центрах обработки данных. Нашей задачей было исследование и расчет показателей ее надежности на примере разрабатываемого кластера.

В кластере реализованы следующие базовые архитектурные принципы:

- классическая кластерная архитектура с распределенной памятью;
- организация трех сетей: системной сети InfiniBand для MPI-обменов, сети InfiniBand для файловых операций ввода/вывода и командной (вспомогательной) сети Gigabit Ethernet для оптимизации параллельного выполнения программ;
- использование мультиядерных процессоров архитектуры x86-64;
- применение в вычислительных узлах кластерных конфигураций только тех процессоров, архитектура которых соответствует требованиям технологии OpenCL;
- эксплуатация в структуре кластера двух выделенных управляющих узлов (основного и резервного) для управления вычислениями и подключения пользователей из внешней локальной сети;
- настройка и мониторинг вычислительных узлов (ВУ) кластера в соответствии с протоколами IPMI.

Состав кластера. В кластере реализована работа под управлением ОС типа Linux на основе последних версий дистрибутива Fedora с обновлениями для повышения производительности. Для работы с сетевой средой InfiniBand применяются программные средства проекта OFED – набор ПО с открытым исходным кодом для развертывания и управления сетей InfiniBand. В качестве средств разработки параллельных программ используется связка из стандартных компиляторов дистрибутива Linux (C/C++, Fortran) и библиотеки MPI. Для программных средств пакетной обработки заданий взята свободно распространяемая версия системы пакетной обработки PBS – Torque. В роли планировщика задач применяется свободно распространяемый программный пакет Maui.

Вычислительные платформы и другие модули кластера располагаются в одной стойке типа APC Netshelter шириной 19" и высотой 42U (195,8 см). Теоретическая пиковая производительность составляет 100 Тфлопс.

Состав кластера и его технические характеристики приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Состав кластера «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ»
 T a b l e 1. The composition of the cluster “SKIF-GEO-DPC RB”

Наименование	Количество	Технические характеристики
Платформа вычислительных узлов Supermicro SYS-2029BT-HTR-OTO-48 OPTIMIZED	9 (36 ВУ)	Четыре ВУ на платформе 2U; оперативная память ВУ 8×32 ГБ; каждый ВУ включает два 18-ядерных процессора Intel Xeon Gold 6140 (14 нм, 36 потоков, 2,3 ГГц, турбо 3,7 ГГц, AVX-512, 140 Вт), 2 жестких диска 2,5" 1ТБ SATA; 2 блока питания (БП) – основной и горячий резерв
Платформа управляющего узла (УУ)	1	Один УУ на платформе 1U; УУ включает один 18-ядерный процессор Intel Xeon Gold 6140, оперативную память 6×32 ГБ; 10 жестких дисков 2.5" 1 ТБ SATA; 2 БП – основной и горячий резерв
Коммутатор сети InfiniBand (IB)	2	Коммутатор IB EDR 100 Гбит/с, Mellanox 36 портов MSB7890-E; 2 БП – основной и горячий резерв; резервный вентилятор
Коммутатор сети Gigabit Ethernet (GbE)	1	Коммутатор GbE управляемый с 48 портами D-Link DGS-1510-52X; MTBF – 416789,03 ч
Файловый сервер	1	Supermicro SSG 6028R-TDWNR с адаптерами 100 Гбит/с, 8×4 ТБ; 2 БП – основной и горячий резерв
Распределитель электропитания стоечный	6	Блок розеток
Источник бесперебойного питания (отдельное изделие вне стойки)	1	MGE GALAXY 300, 400 В, 3:3, 30 кВА

Структурно-функциональная схема кластера показана на рис. 1.

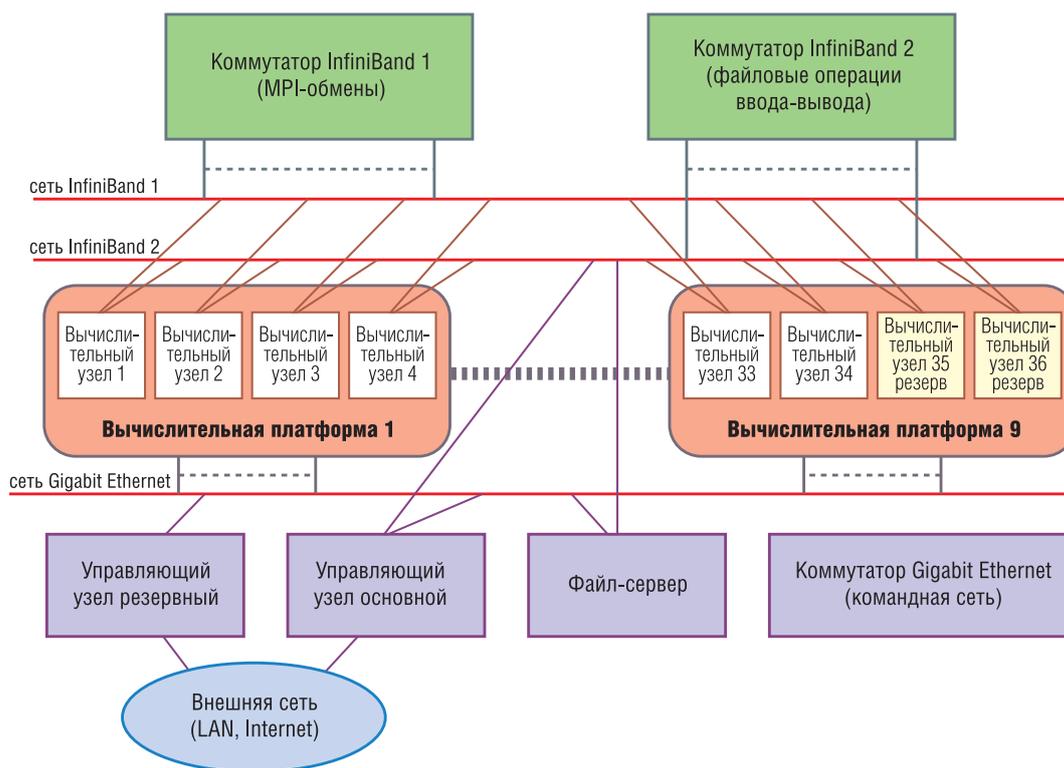


Рис. 1. Структурно-функциональная схема кластера

Fig. 1. Structural and functional scheme of the cluster

Входящие в структуру кластера коммутаторы InfiniBand, принадлежащие различным сетям, взаимозаменяемы. Управляющий узел при необходимости может выполнять функции файл-сервера. При этом управляющие узлы зарезервированы. Непосредственно в работе кластера могут использоваться 34 вычислительных узла, два вычислительных узла находятся в подготовленном резерве.

Методическое обеспечение расчета надежности кластера. Наиболее полное изложение методики оценки надежности кластерных вычислительных систем приведено в [1]. Согласно [1] структурная схема надежности (СН) кластера состоит из двух частей – ядра и совокупности вычислительных средств (узлов) (СВС). В ядро кластера и в СВС входят составные части (СЧ), отказы которых приводят к снижению производительности кластера, причем в ядро входят СЧ, отказы которых приводят к снижению производительности кластера до нуля.

Авторы предлагают в качестве основного показателя кластера использовать коэффициент сохранения эффективности $K_{\text{эф.кластера}}$, а как дополнительные показатели надежности – среднюю наработку на отказ $T_{\text{о.кластера}}$ и среднюю наработку на сбой $T_{\text{сб.кластера}}$. Для определения надежности ядра кластера рекомендуется применять коэффициент готовности $K_{\text{г.я}}$, среднюю наработку на отказ $T_{\text{о.я}}$ и среднюю наработку на сбой $T_{\text{сб.я}}$.

Как основной показатель надежности СВС в [1] определен коэффициент сохранения эффективности $K_{\text{эф.СВС}}$, а в качестве дополнительных показателей надежности предлагаются средняя наработка на отказ $T_{\text{о.СВС}}$ и средняя наработка на сбой $T_{\text{сб.СВС}}$.

Исходя из определений ядра и СВС получаем, что

$$K_{\text{эф.кластера}} = \begin{cases} K_{\text{эф.СВС}} & \text{при работоспособном ядре кластера} \\ 0 & \text{при неработоспособном ядре кластера} \end{cases} \quad (1)$$

Вероятность пребывания ядра кластера в работоспособном состоянии в произвольный момент времени представляет собой коэффициент готовности ядра $K_{\text{г.я}}$, следовательно, (1) можно записать в виде

$$K_{\text{эф.кластера}} = K_{\text{г.я}} K_{\text{эф.СВС}}. \quad (2)$$

Наработку на сбой кластера следует вычислять по формуле

$$T_{\text{ср.сб.кластера}} = \frac{T_{\text{ср.сб.СВС}} T_{\text{ср.сб.я}}}{T_{\text{ср.сб.СВС}} + T_{\text{ср.сб.я}}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{ср.сб.кластера}}$, $T_{\text{ср.сб.СВС}}$ и $T_{\text{ср.сб.я}}$ – средняя наработка на сбой кластера, СВС и ядра кластера соответственно.

Анализ надежности кластера, как и любого технического объекта, следует начинать с характеристики последствий отказов комплектующих кластер СЧ (табл. 2).

В результате анализа влияния отказов СЧ кластера на его показатели надежности определена СН ядра кластера (рис. 2).

Интенсивность отказов ядра кластера $\Lambda_{\text{я}}$ в соответствии с рис. 2 следует рассчитывать как

$$\Lambda_{\text{я}} = \Lambda_{\text{р.пл.УУ}} + \Lambda_{\text{р.к.ІВ}} + \Lambda_{\text{к.GbE}} + \Lambda_{\text{ИБП}}, \quad (4)$$

Т а б л и ц а 2. Характеристики последствий отказов СЧ кластера
T a b l e 2. Characteristics of the consequences of failures in the cluster components

СЧ кластера	Последствия отказа
Вычислительный узел	Сбой кластера в случае его участия в расчете. Повреждение в случае не участия в расчете
Вычислительная платформа	Сбой кластера в случае его участия в расчете. Повреждение в случае не участия в расчете
Управляющий узел	Повреждение кластера при отказе одного управляющего узла. Отказ кластера при отказе обоих управляющих узлов
Коммутатор InfiniBand	Сбой кластера при отказе одного коммутатора. Отказ кластера при отказе обоих коммутаторов
Коммутатор Gigabit Ethernet	Отказ кластера
Файловый сервер	Сбой кластера
Источник бесперебойного питания (ИБП)	Отказ кластера
Блок розеток	Отказ кластера

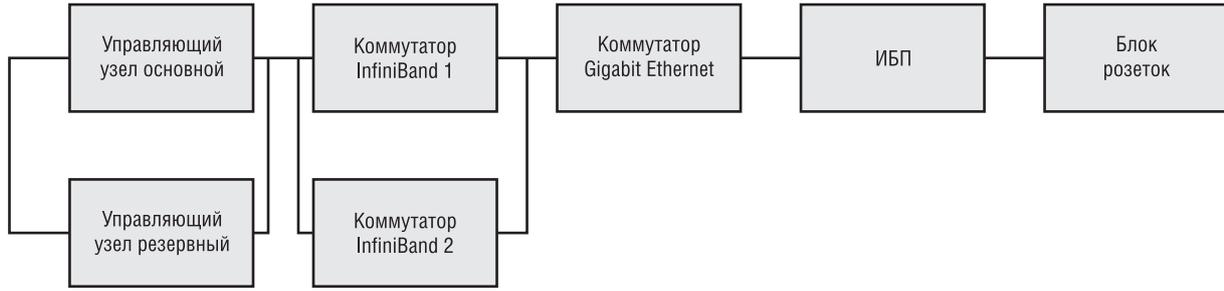


Рис. 2. Структурная схема надежности ядра кластера
 Fig. 2. Structural scheme of the reliability of the cluster core

где $\Lambda_{р.пл.УУ}$, $\Lambda_{р.к.ІВ}$, $\Lambda_{к.ГбЕ}$, $\Lambda_{ИБП}$ – интенсивности отказов резервированной платформы управляющего узла (УУ), резервированного коммутатора InfiniBand, коммутатора Gigabit Ethernet и ИБП кластера соответственно.

Интенсивность отказов резервируемых элементов ССН (платформы УУ и коммутаторов InfiniBand) Λ_p вычисляется следующим образом:

$$\Lambda_p = (T_{o,p})^{-1}, \tag{5}$$

где $T_{o,p}$ – средняя наработка на отказ резервированного элемента ССН, определяемая, согласно [4], по формуле

$$T_{o,p} = (\mu + 2\Lambda_3) / 2\Lambda_3^2, \tag{6}$$

в которой $\mu = 1/T_{в.р}$ – интенсивность восстановления резервированного элемента ССН ($T_{в.р}$ – среднее время восстановления резервированного элемента); Λ_3 – интенсивность отказов элемента из резерва.

Средняя наработка на отказ ядра кластера $T_{o,я}$ определяется как

$$T_{o,я} = 1 / \Lambda_я. \tag{7}$$

Среднее время восстановления ядра кластера $T_{в,я}$ находится по формуле

$$T_{в,я} = T_{o,я} (\Lambda_{р.пл.УУ} T_{в.р.пл.УУ} + \Lambda_{р.к.ІВ} T_{в.р.к.ІВ} + \Lambda_{к.ГбЕ} T_{в.к.ГбЕ} + \Lambda_{ИБП} T_{в.ИБП}), \tag{8}$$

где $T_{в.р.пл.УУ}$, $T_{в.р.к.ІВ}$, $T_{в.к.ГбЕ}$, $T_{в.ИБП}$ – среднее время восстановления резервируемой платформы УУ, резервированного коммутатора InfiniBand, коммутатора Gigabit Ethernet и ИБП кластера соответственно.

Коэффициент готовности ядра равен

$$K_{г,я} = \frac{T_{o,я}}{T_{o,я} + T_{в,я}}. \tag{9}$$

В структурную схему расчета наработки на сбой входят те элементы, отказы которых приводят к сбоям ядра (рис. 3).

В соответствии с рис. 3 средняя наработка на сбой ядра кластера $T_{ср.сб,я}$ будет равна

$$T_{ср.сб,я} = (\Lambda_{пл.УУ} + \Lambda_{к.ІВ} + \Lambda_{ФС})^{-1}, \tag{10}$$

где $\Lambda_{пл.УУ}$, $\Lambda_{к.ІВ}$, $\Lambda_{ФС}$ – интенсивности отказов платформы УУ, коммутатора InfiniBand и файл-сервера (ФС) кластера соответственно.



Рис. 3. Структурная схема расчета наработки на сбой ядра кластера
 Fig. 3. Structural scheme for calculating the operating time for the cluster core failure

Математическая модель надежности СВС кластера. Примем для СВС следующую основную стратегию восстановления ВУ: восстановление ВУ в СВС начинается сразу после обнаружения их отказов и осуществляется с использованием резервных ВУ; восстановление резервных ВУ должно осуществляться в течение не более 168 ч; сбой кластера фиксируется лишь тогда, когда ВУ, отказавший в СВС, участвовал в расчете, в противном случае фиксируется повреждение.

Отметим, что состояние СВС меняется при каждом отказе и восстановлении ВУ. Формально граф состояний СВС должен иметь $(N + 1)$ состояний, где N – исходное число ВУ в составе СВС доступных ПО кластера. Реальное время восстановления ВУ выбирается таким, чтобы в СВС накапливалось незначительное (порядка единиц) число неработоспособных ВУ. Примем допустимое число неработоспособных ВУ в составе СВС $n = 2$ и в дальнейшем покажем, что вероятность нахождения СВС в состоянии трех отказавших ВУ очень мала.

Урезанный граф состояний СВС приведен на рис. 4, где S_0 – исходное состояние СВС, когда все ВУ в СВС работоспособны и доступны ПО кластера; S_1, S_2, S_3 – состояния, при котором в СВС находятся соответственно 1, 2 и 3 неработоспособных ВУ; V_0 – интенсивность восстановления ВУ; N – исходное число ВУ в составе СВС доступных ПО кластера; $\Lambda_{ВУ}$ – интенсивность отказов ВУ.

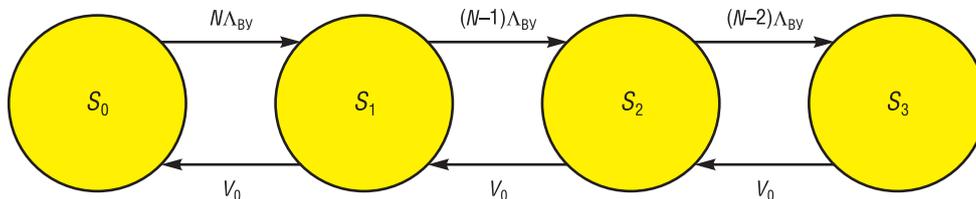


Рис. 4. Урезанный граф состояний совокупности вычислительных средств

Fig. 4. The truncated state graph of the combination of computing facilities

По размеченному графу состояний (рис. 4) можно составить систему уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned} N\Lambda_{ВУ}P_0 &= V_0P_1, \\ [V_0 + (N - 1)\Lambda_{ВУ}]P_1 &= N\Lambda_{ВУ}P_0 + V_0P_2, \\ [V_0 + (N - 2)\Lambda_{ВУ}]P_2 &= (N - 1)\Lambda_{ВУ}P_1 + V_0P_3, \\ \sum_0^3 P_i &= 1, \end{aligned} \tag{11}$$

где P_i – вероятность пребывания СВС в состоянии S_i .

Корнями системы уравнений (11) являются:

$$P_1 = B_1P_0, \tag{12}$$

где $B_1 = N\Lambda_{ВУ} / V_0;$ (13)

$$P_2 = B_2P_0, \tag{14}$$

где $B_2 = \{N\Lambda_{ВУ}[V_0 + (N - 1)\Lambda_{ВУ}]\} / V_0^2;$ (15)

$$P_3 = B_3P_0, \tag{16}$$

где $B_3 = \{N\Lambda_{ВУ}[V_0 + (N - 1)\Lambda_{ВУ}][V_0 + (N - 2)\Lambda_{ВУ} - V_0N][(N - 1)\Lambda^2]\} / V_0^3;$ (17)

$$P_0 = [1 + B_1 + B_2 + B_3]^{-1}. \tag{18}$$

Средний коэффициент сохранения эффективности следует рассчитывать по формуле

$$K_{\text{ср.эф.СВС}} = \sum_{i=0}^2 K_{\text{эф.}i} P_i, \tag{19}$$

где $K_{\text{эф.}i}$ – коэффициент сохранения эффективности в i -м состоянии СВС.

$$K_{эф,i} = (N - i) / N, \quad i = 0, 1, 2, \tag{20}$$

$$T_{ср,S_i} = \frac{1}{\sum_{j=0}^i P_j \Lambda_{ВУ}} \sum_{j=0}^i \frac{1}{N - j}, \tag{21}$$

где $T_{ср,S_i}$ – средняя наработка до S_i -го состояния графа СВС.

Если принять в качестве критерия отказа СВС накопление в ее составе более двух отказавших вычислительных узлов $n > 2$, то среднюю наработку на отказ и среднюю наработку на сбой СВС следует вычислять по выражению

$$T_{ср.сб.СВС} = \frac{1}{(P_0 + P_1 + P_2) \Lambda_{ВУ}} \sum_{i=0}^2 \frac{1}{N - i}. \tag{22}$$

Реально допустимо n значительно больше 2, но это приводит к такой средней наработке на отказ, которую можно не учитывать при оценке средней наработки на отказ кластера.

Оценка надежности СЧ кластера, для которых отсутствуют достоверные сведения по их надежности. Вычислительный узел. Анализ графы «Технические характеристики» табл. 1 позволил построить ССН вычислительного узла (рис. 5).

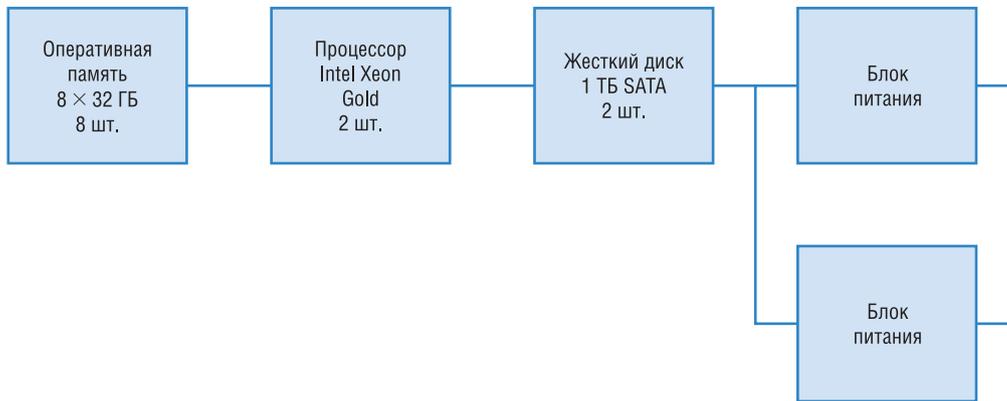


Рис. 5. Структурная схема надежности вычислительных узлов кластера

Fig. 5. Reliability block diagram of the computing nodes of cluster

Интенсивность отказов ВУ $\Lambda_{ВУ}$ в соответствии с ССН (рис. 5) можно определить так:

$$\Lambda_{ВУ} = 8\Lambda_{оп} + 2\Lambda_{пр} + 2\Lambda_{д} + \Lambda_{БП,р}, \tag{23}$$

где $\Lambda_{оп}$, $\Lambda_{пр}$, $\Lambda_{д}$, $\Lambda_{БП,р}$ – интенсивности отказов оперативной памяти, процессора, жесткого диска и резервированного блока питания соответственно, причем последняя рассчитывается как

$$\Lambda_{БП,р} = \frac{2\Lambda_{БП}^2}{\mu_{БП} + 2\Lambda_{БП}}, \tag{24}$$

где $\Lambda_{БП}$ – интенсивность отказов блока питания; $\mu_{БП}$ – интенсивность восстановления резервированного блока питания.

В табл. 3 приведены значения интенсивности отказов комплектующих элементов ССН вычислительных и управляющих узлов.

В результате расчетов, выполненных по формулам (23) и (24) с использованием данных табл. 3 при $\mu_{БП} = 0,006$ 1/ч, получено $\Lambda_{ВУ} = 15,041 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Т а б л и ц а 3. Интенсивности отказов элементов ССН вычислительных и управляющих узлов

Table 3. Failure rates of elements of the structural diagram of the reliability of computing and control nodes

Составная часть вычислительных узлов	Интенсивность отказов, 10^{-6} 1/ч
Оперативная память 32 ГБ	1,00
Процессор Intel Xeon Gold 6140	1,00
Жесткий диск 1 ТБ SATA	2,50
Блок питания	11,11
Системная плата УУ	3,33

Платформа управляющего узла. В соответствии с табл. 1 ССН платформы управляющего узла примет вид, который изображен на рис. 6.

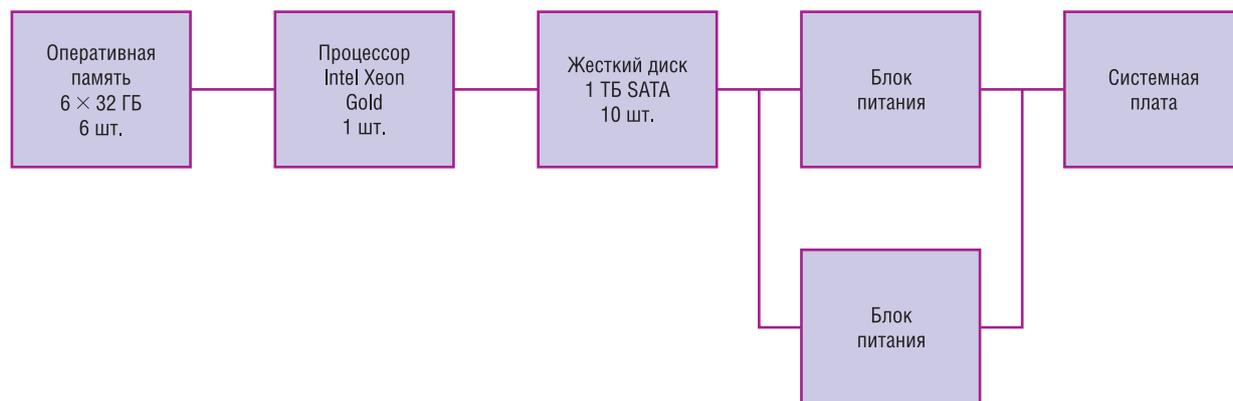


Рис. 6. Структурная схема надежности платформы управляющего узла кластера

Fig. 6. Reliability block diagram of the platform of cluster control node

Согласно ССН на рис. 6 интенсивность отказов платформы управляющего узла $\Lambda_{\text{пл.уу}}$ рассчитывается по формуле

$$\Lambda_{\text{пл.уу}} = \Lambda_{\text{пр}} + 6\Lambda_{\text{оп}} + 10\Lambda_{\text{д}} + \Lambda_{\text{БП.р}} + \Lambda_{\text{СП}}, \quad (25)$$

где $\Lambda_{\text{СП}}$ – интенсивность отказов системной платы (СП).

В результате расчетов, выполненных по формулам (24) и (25) с использованием данных табл. 3 при $\mu_{\text{БП}} = 0,006$ 1/ч, получено $\Lambda_{\text{пл.уу}} = 35,341 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Оценка надежности кластера в целом. Заметим, что в соответствии с ГОСТ 27.301–95 «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения» под расчетным методом определения надежности объекта понимается метод, основанный на вычислении показателей надежности по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов объекта.

Оценка надежности ядра кластера. В табл. 4 приведены интенсивности отказов элементов ССН ядра кластера.

Произведем расчеты средней наработки на отказ зарезервированных элементов ССН и их интенсивности отказов по формулам (5) и (6). В результате этих расчетов с использованием данных табл. 4 при их среднем времени восстановления $T_{\text{в.р}} = 168$ ч ($\mu = 0,006$ 1/ч), получено:

для резервированной платформы управляющего узла: $T_{\text{о.р.пл.уу}} = 5231385$ ч, $\Lambda_{\text{р.пл.уу}} = 0,1911539 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;

Т а б л и ц а 4. Интенсивности отказов элементов ССН ядра кластера

Table 4. Failure rates of elements of the structural diagram of the reliability of the cluster core

СЧ кластера	Интенсивность отказов, 10^{-6} 1/ч	Источник данных
Вычислительный узел	15,04	Расчет
Управляющая узел	35,34	Расчет
Коммутатор InfiniBand	10,00	[4]
Коммутатор Gigabit Ethernet	16,91	По данным эксплуатации СКИФ
Файловый сервер	12,07	[3]
ИБП 30	2,11	По данным эксплуатации СКИФ
Блок розеток	7,03	По данным эксплуатации СКИФ

для резервированных коммутаторов InfiniBand: $T_{\text{о.р.к.ИВ}} = 40 \cdot 10^6$ ч, $\Lambda_{\text{р.к.ИВ}} = 0,025 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

В соответствии с ССН ядра кластера (см. рис. 2) в табл. 5 приведен расчет надежности ядра кластера при условии среднего времени восстановления элементов ССН 24 ч.

Ядро кластера имеет по расчету следующие значения показателей надежности:

интенсивность отказов $\Lambda_{\text{я}} = 26,266 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;
средняя наработка на отказ $T_{\text{о.я}} = 38072$ ч;
коэффициент готовности $K_{\text{г.я}} = 0,999371$.

Средняя наработка на сбой ядра кластера при расчете по формуле (10) составляет 17418 ч, или 2 года.

Т а б л и ц а 5. Ядро кластера. Количественные значения показателей надежности

Table 5. The cluster core. Reliability calculation

Наименование элемента ССН	Интенсивность отказов, 10^{-6} 1/ч	Средняя наработка на отказ, ч	Условная вероятность отказа
Зарезервированный коммутатор InfiniBand	0,025	$40 \cdot 10^6$	0,00095
Коммутатор Gigabit Ethernet	16,91	416 667	0,64380
Зарезервированная платформа УУ	0,191	5 231 385	0,00858
Источник бесперебойного питания	2,110	473 934	0,09476
Блок розеток	7,03	229 084	0,31573

Оценка надежности СВС кластера. Оценку надежности СВС выполним для двух вариантов: вариант А1 – наличие восстанавливаемого резерва ВУ; вариант А2 – отсутствие резерва ВУ.

Для оценки показателей надежности СВС принимаются следующие значения переменных, используемых в формулах расчета показателей надежности СВС:

исходное количество ВУ в СВУ $N = 34$;

интенсивность отказов ВУ $\Lambda_{ВУ}$ равна $15,04 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;

среднее время восстановления отказавшего ВУ с учетом наличия резервных ВУ $T_{в,ВУ} = 1$ ч (в связи с наличием подготовленного резерва);

интенсивность восстановления ВУ с учетом наличия резервных ВУ $V_0 = 1/T_{в,ВУ} = 1,0$ 1/ч.

среднее время восстановления отказавшего ВУ без учета наличия резервных ВУ $T_{в,ВУ} = 168$ ч (в связи с отсутствием резерва);

интенсивность восстановления отказавшего ВУ без учета наличия резервных ВУ $V_0 = 1/T_{в,ВУ} = 0,00595$ 1/ч.

С учетом принятых данных для варианта А1 (наличие восстанавливаемого резерва ВУ) по формулам (12)–(22) получены следующие результаты:

$$B_1 = 5,1136 \cdot 10^{-4}; B_2 = 2,538 \cdot 10^{-7}; B_3 = 1,2215 \cdot 10^{-10};$$

$$P_1 = 5,111 \cdot 10^{-4}; P_2 = 2,5367 \cdot 10^{-7}; P_3 = 1,2209 \cdot 10^{-10}; P_0 = 0,999489;$$

$$K_{ср.эф.СВС} = 0,999985; T_{сб.СВС} = 193\,601 \text{ ч} = 22,1 \text{ года.}$$

Для варианта А2 (отсутствие резерва ВУ) результаты следующие:

$$B_1 = 8,5908 \cdot 10^{-2}; B_2 = 7,1632 \cdot 10^{-3}; B_3 = 5,7918 \cdot 10^{-4};$$

$$P_1 = 7,8552 \cdot 10^{-2}; P_2 = 6,5498 \cdot 10^{-3}; P_3 = 5,2959 \cdot 10^{-4}; P_0 = 0,914369;$$

$$K_{ср.эф.СВС} = 0,996775; T_{сб.СВС} = 10\,846 \text{ ч} = 1,24 \text{ года.}$$

Расчет надежности кластера в целом. В соответствии с формулами (2), (7) и (3) получены значения показателей надежности кластера для варианта А1:

$$K_{ср.эф.кластера} = K_{г.я} K_{ср.эф.СВС} = 0,999371 \cdot 0,999985 = 0,999356;$$

$$T_{о.кластера} = T_{о.я} = 38\,072 \text{ ч} = 4,35 \text{ года};$$

$$T_{сб.кластера} = 15\,980 \text{ ч} = 1,82 \text{ года.}$$

Для варианта А2:

$$K_{ср.эф.кластера} = K_{г.я} K_{ср.эф.СВС} = 0,999371 \cdot 0,996775 = 0,996148;$$

$$T_{о.кластера} = T_{о.я} = 38\,072 \text{ ч} = 4,35 \text{ года};$$

$$T_{сб.кластера} = 6684 \text{ ч} = 0,76 \text{ года.}$$

Оценка эффекта использования резерва вычислительных узлов. Рассмотрим два варианта использования резервных элементов ВУ. Вариант 1 – резервные ВУ не подлежат восстановлению и используются до их израсходования. Вариант 2 – резервные ВУ восстанавливаются и в течение всего срока службы кластера используются.

Для решения этого вопроса представляется целесообразным СВС представить моделью надежности в виде резервированной системы с замещением, основными элементами которой (системы) является вся совокупность ВУ в СВС, зарезервированных двумя ненагруженными ВУ. В данном случае значение средней наработки на отказ этой системы будет характеризовать эффект от использования соответствующего варианта резервирования ВУ.

Среднюю наработку до отказа $T_{o,CBC}$ такой системы, согласно [4], для варианта 1 резервирования следует проводить по формуле

$$T_{o,CBC} = 1 / N \Lambda_{ВУ}, \quad (26)$$

а для варианта 2 резервирования в следующем виде:

$$T_{o,CBC} = 1 / (N^3 \Lambda_{ВУ}^3 T_{в.р}^2), \quad (27)$$

где $T_{в.р}$ – среднее время восстановления резервного ВУ.

В результате вычислений по (26) средняя наработка до отказа СВС при варианте 1 резервирования СВС составляет $T_{o,CBC} = 1957$ ч = 0,22 года; по формуле (27) средняя наработка до отказа СВС при варианте 2 резервирования – $T_{o,CBC} = 264972$ ч = 30,2 года.

Из приведенных результатов расчетов средней наработки до отказа СВС следует, что вариант 2 использования резерва ВУ является гораздо эффективнее.

Оценка использования варианта восстановления СВС при достижении потенциальной производительности кластера до уровня ниже допустимого (допущение временной деградации кластера). В [5] рассматривался вариант восстановления СВС кластера только после снижения потенциальной производительности до установленного уровня.

Рассмотрим этот вариант на исследуемом кластере. Согласно [5] средняя наработка СВС между восстановлениями ВУ $T_{в.СВС}$ должна вычисляться по формуле

$$T_{в.СВС} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} 1 / (N - i)}{\Lambda_{ВУ}}, \quad i = 0, 1, \dots, n - 1, \quad (28)$$

где n – допустимое количество отказавших вычислительных узлов в составе СВС (допустимый уровень снижения производительности СВС).

Расчеты по формуле (28) позволили сформировать параметры допустимой деградации СВС (табл. 6).

Т а б л и ц а 6. Параметры допустимой деградации СВС

Table 6. Parameters of allowable degradation of a set of computing facilities

n	$K_{эф.СВС}$	$T_{в.СВС}$, год
6	0,824	1,12
12	0,647	3,24
17	0,500	5,15
24	0,294	9,02
26	0,235	10,63

Из табл. 6 следует, что если допустить восстановление СВС только после накопления в нем шести неработоспособных ВУ, то это произойдет через 1,12 года, при этом потенциальная производительность СВС снизится до значения 0,824.

Таким образом, при принятых следующих исходных данных:

номинальное количество вычислительных узлов в СВС – $N = 34$;

два варианта восстановления ВУ: наличие восстанавливаемого резерва ВУ в СВС со средним временем восстановления 1 ч при среднем времени восстановления резервных ВУ 168 ч (вариант 1); отсутствие резерва ВУ

при среднем времени восстановления ВУ в СВС 168 ч (вариант 2);

среднее время восстановления ядра кластера – 24 ч,

а также данных по интенсивностям отказов комплектующих кластер элементов (см. табл. 3), выполнен расчет показателей надежности кластера, результаты которого приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. Расчетные значения показателей надежности кластера

Table 7. The calculated values of the cluster reliability indicators

Вариант восстановления вычислительных узлов	$K_{ср.эф.кластера}$	$T_{o.кластера}$, год	$T_{сб.кластера}$, год
Вариант 1	0,999356	4,35	1,82
Вариант 2	0,996148	4,35	0,76

Заклучение. Высокие значения показателей надежности кластера были достигнуты благодаря принятым в процессе его разработки архитектурным и структурным решениям, направленным на повышение его надежности, таким как:

- параллельная вычислительная кластерная среда, которая позволяет сохранить работоспособность кластера при отказе определенного количества вычислительных узлов;
- наличие двух восстанавливаемых резервных вычислительных узлов, двух сетей ИВ с взаимозаменяемыми коммутаторами, третьей (командной) сети GbE, резервного управляющего узла;
- резервирование источников питания вычислительных узлов;
- возможность использования управляющего узла в качестве файл-сервера;
- мониторинг работоспособности кластера.

В процессе исследований произведена также оценка использования кластера с допущением временной деградации его производительности. Выполнена оценка наработки на отказ СВС при критерии отказа только одного ВУ в СВС для случая израсходования двух резервных ВУ (случай 1) и применении восстанавливаемого резерва в течение срока использования кластера (случай 2). Для первого случая средняя наработка СВС составила 0,22 года, для второго случая – 30,2 года. Из приведенных результатов расчетов следует, что применение стратегии с восстанавливаемым резервом ВУ, используемым в течение всего срока службы кластера, является более эффективным.

Полученный расчет показателей надежности разработанного кластера позволит определить наиболее эффективные стратегии его эксплуатации, а также подходы к проектированию и применению кластерных суперкомпьютерных конфигураций.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научно-технической программы «Исследования и разработка высокопроизводительных информационно-вычислительных технологий для увеличения и эффективного использования ресурсного потенциала углеводородного сырья Союзного государства» («СКИФ-Недра») (проект 2.1.1.1).

Acknowledgments

This work was carried out as part of the Scientific and Technical Program “Research and development of high-performance information and computing technologies to increase and efficiently use the resource potential of the hydrocarbon raw materials of the Union State” (“SKIF-Nedra”) (Project 2.1.1.1).

Список использованных источников

1. Анищенко, В.В. Модели надежности кластерных вычислительных систем / В.В. Анищенко, Л.И. Кульбак, Т.С. Мартинович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – № 1. – С. 89–99.
2. Cisco SFS M7000E InfiniBand Blade Switch for Dell M1000E [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/sfs-m7000e-infiniband-switch/> – С. 38–45. – Дата доступа: 11.01.2018
3. Сравнение кластера надежности и «обычного» сервера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.team.ru/server/stbl_compare.shtml – Дата доступа: 24.08.2018
4. Козлов, Б.А. Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Совет. радио, 1975. – 472 с.
5. Анищенко, В.В. Выбор стратегии восстановления работоспособности кластерной вычислительной системы / В.В. Анищенко, Л.И. Кульбак, Т.С. Мартинович // Информатика. – 2007. – № 1 (13). – С. 114–122.

References

1. Anishchenko V. V., Kulbak L. I., Martinovich T.S. Reliability models of cluster computing systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2008, no. 1, pp. 89–99 (in Russian).
2. Cisco SFS M7000E InfiniBand Blade Switch for Dell M1000E. Available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/sfs-m7000e-infiniband-switch> (accessed 11 January 2018).
3. *Comparing the reliability cluster and the normal server*. Available at: http://www.team.ru/server/stbl_compare.shtml (accessed 24 August 2018).
4. Kozlov B. A., Ushakov I. A. *A Short Guide to Calculating the Reliability of Electronic Equipment*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975. 472 p. (in Russian).
5. Anishchenko V. V., Kulbak L. I., Martinovich T.S. Strategy choice of working capacity restoration for cluster computer systems. *Informatika = Informatics*, 2007, no. 1 (13), pp. 114–122 (in Russian).

Информация об авторах

Кульбак Леонид Игоревич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lkulbak@yandex.ru

Чиж Олег Петрович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией высокопроизводительных систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: otchij@newman.bas-net.by

Парамонов Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nick@newman.bas-net.by

Рымарчук Александр Григорьевич – главный конструктор проекта, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rymarchuk@newman.bas-net.by

Мартиневич Татьяна Сергеевна – научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: martintan@newman.bas-net.by

Information about the authors

Leonid I. Kulbak – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lkulbak@yandex.ru

Oleg P. Tchij – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of High-Performance Systems, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: otchij@newman.bas-net.by

Nikolaj N. Paramonov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nick@newman.bas-net.by

Aleksandr G. Rymarchuk – Chief Designer of the project, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rymarchuk@newman.bas-net.by

Tatyana S. Martinovich – Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: martintan@newman.bas-net.by

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 343.985
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-359-365>

Поступила в редакцію 05.04.2019
Received 05.04.2019

О. В. Рыбальский¹, В. И. Соловьев², С. С. Чернявский¹, В. В. Журавель³, В. К. Железняк⁴

¹*Національна академія внутрішніх дел, Київ, Україна*

²*Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Северодонецк, Украина*

³*Київський науково-дослідницький експертно-криміналістический центр МВД України, Київ, Україна*

⁴*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ ЭКСПЕРТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО АНАЛИЗУ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Обоснован вероятностный подход к принятию экспертных решений по анализу сложных объектов с применением информационных технологий. Криминалистическая идентификация сложных объектов проводится путем сравнения идентификационных признаков, получаемых из спорных (исследуемых) и образцовых (экспериментальных) идентифицируемых объектов. Для сравнения их необходимо сначала измерить, а уже затем сравнить между собой, то есть найти меру близости между сравниваемыми идентификационными признаками. При этом возникают два аспекта оценки достоверности результатов сравнения. Первый из них относится к определению вероятности полного совпадения параметров идентификационных признаков двух разных объектов. То есть это аспект доказательства строгой индивидуальности характеристик исследуемых объектов, признанный во всем мире и позволяющий использовать категорическую форму формулировки вывода эксперта. К данному аспекту относится расчет вероятности совпадения дактилокарт двух различных личностей. Второй аспект связан с вероятностным характером процессов как возникновения идентификационных признаков в сложных объектах, так и их выделения, измерения и сравнения при проведении криминалистических исследований. Данному аспекту присущ вероятностный подход к оценке результатов криминалистических исследований сложных объектов. Показано, что результат любой экспертизы, включающей в себя измерения конкретных величин, характеризуется наличием случайной составляющей, и его необходимо представлять в вероятностной форме. Существуют три отдельные определяемые вероятностью случайные величины, которые характеризуют экспертизу и инструментарий, предназначенный для идентификационных исследований сложных объектов, что и обуславливает необходимость представления выводов эксперта в вероятностной форме. При создании и внедрении в практику инструментария для проведения экспертиз сложных объектов должны быть построены кривые величин вероятности ошибки I и II рода и установлена его минимальная эффективность, определяющая пригодность данного инструментария для проведения экспертных исследований.

Ключевые слова: вероятность, идентификационный признак, криминалистическая идентификация, сложный объект, случайная величина, случайный процесс, экспертиза

Для цитирования: Вероятностный подход к принятию экспертных решений по анализу сложных объектов / О. В. Рыбальский [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 359–365. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-359-365>

O. V. Rybalskiy¹, V. I. Solovyov², S. S. Chernyavskiy¹, V. V. Zhuravel³, V. K. Zheleznyak⁴

¹*National Academy of Internal Affairs, Kyiv, Ukraine*

²*Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine*

³*Kiev Scientific Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

⁴*Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus*

PROBABILISTIC APPROACH TO ACCEPTANCE OF EXPERT DECISIONS ON EXAMINATIONS OF DIFFICULT OBJECTS

Abstract. The aim of the article is to ground the probabilistic approach to the acceptance of expert decisions on examinations of difficult objects with the use of the information technologies conducted on the basis of the used methodologies of realization of examinations.

Criminalistics identification researches of difficult objects are conducted by comparison of the identification signs got from debatable (investigated) and exemplary (experimental) identifying objects. For comparison at first it is necessary to measure them, and already after it to compare inter se, i.e. to find the measure of closeness between the compared identification signs. And here are two aspects of estimation of authenticity of results of comparison.

First from them belongs to determination of probability of complete coincidence of parameters of identification signs of two different objects. In other words, it is the aspect of proof of strict individuality of descriptions of the investigated objects, confessed in the whole world and allowing to use the categorical form of formulation of conclusion of expert. The calculation of probability of coincidence of fingerprint cards of two different personalities belongs exactly to this aspect.

The second aspect is related to probabilistic character of processes of both origin of identification signs in difficult objects and their selection, measuring and comparison during realization of criminalistics researches. Exactly he is related to the probabilistic going near the estimation of results of criminalistics researches of difficult objects.

It is shown that the result of any examination of difficult object, related to measuring of concrete sizes, is characterized by the presence of random constituent and its result must be presented in a probabilistic form. There are three separate random values determined by probability, characterizing examination and tool intended for identification researches of difficult objects. At creation of tool for realization of examinations of difficult objects and its introduction into practice, the curves of values of probability errors of I and II family must be made and its minimum efficiency must be determined. Exact efficiency of tool must serve as a criterion for its suitability for realization of expert researches.

Keywords: probability, identification sign, criminalistics authentication, difficult object, random value, casual process, examination

For citation: Rybalskiy O. V., Solovyov V. I., Chernyavskiy S. S., Zhuravel V. V., Zheleznyak V. K. Probabilistic approach to near acceptance of expert decisions on examinations of difficult objects. *Vesti Natsyyanal'noi akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 359–365 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-359-365>

Введение. Проблемы вероятностной оценки результатов криминалистических исследований возникли в криминалистике с появлением объективных методов идентификации личности. С началом использования методики бертильонажа, а тем более дактилоскопии перед криминалистами встал вопрос оценки идентификации личности. Была поставлена задача: выяснить, насколько можно доверять результатам измерений и сделанным на их основании выводам, и не могут ли совпасть эти результаты у двух разных людей. Криминалистика впервые обратилась к понятию оценки эффективности (или достоверности) полученных результатов.

Из работы Ю. Торвальда [1] вытекает, что задача была решена сначала на интуитивном уровне, а затем теоретически путем расчета вероятности совпадений у двух разных личностей значительного количества идентификационных признаков. Этот расчет вполне удовлетворил представителей правосудия во всем мире, так как вероятность совпадения была ничтожна и составляла $64 \cdot 10^{-9}$ [1]. Вследствие этого результаты идентификации личности на основе дактилоскопии признаются абсолютно достоверными. Однако никакой заслуживающей доверия экспериментальной проверки полученных теоретических результатов не производилось в силу невозможности ее осуществления по причине огромного объема требуемых работ. В то же время результаты практического применения дактилоскопии говорят сами за себя: за все время применения данной методики не было выявлено ни одного случая неправильной идентификации из-за полного совпадения идентификационных признаков. Это поясняется отсутствием случайных составляющих в сравниваемых идентификационных признаках, так как для их сравнения не используются результаты измерений каких-либо величин, а сравниваются только результаты подсчета выявленных признаков. Поэтому требование к формулировке результата дактилоскопического идентификационного исследования в категорической форме вполне обосновано и не вызывает никаких возражений.

Иначе обстоят дела с экспертизами, которые связаны с исследованиями сложных объектов с применением информационных технологий. В таких экспертизах выводы получают, исходя из большого числа измерений значительного количества параметров. Однако и здесь часто суд требует экспертного решения в категорической форме, что говорит о непонимании физической сущности процессов, происходящих при проведении таких экспертиз. Это требование опирается на постановление Верховного Суда СССР от 16 марта 1971 г. «О судебной экспертизе по уголовным делам» (Бюллетень Верховного Суда СССР. 1971. №2), которым экспертное заключение с вероятностным выводом эксперта не признается в качестве доказательства в суде. Исследователи, занимавшиеся разработкой этого вопроса, исходили из указанного постановления, не пытаясь вникнуть в смысл проблемы, что прекрасно отражено, например, в монографии А. Ш. Каганова [2].

Цель статьи – обосновать вероятностный подход к принятию экспертных решений по экспертизам сложных объектов, проводимым с применением информационных технологий.

Вероятностный характер идентификационных криминалистических исследований. Известно, что криминалистические идентификационные исследования сложных объектов проводятся путем сравнения идентификационных признаков, выделяемых из спорных (исследуемых)

мых) и образцовых (экспериментальных) идентифицирующих объектов. Для сравнения выделенные признаки необходимо сначала измерить, а уже затем сравнить между собой, то есть найти меру близости между сравниваемыми идентификационными признаками. В результате возникают два аспекта оценки достоверности результатов сравнения.

Первый из них, классический, относится к определению вероятности полного совпадения параметров идентификационных признаков двух разных объектов. Иными словами, это аспект доказательств строгой индивидуальности характеристик исследуемых объектов, признанный во всем мире и позволяющий использовать категорическую форму формулировки вывода эксперта. Именно к этому аспекту относится расчет вероятности совпадения дактилокарт двух различных личностей.

Второй аспект связан с вероятностным характером процессов как возникновения идентификационных признаков в сложных объектах, так и их выделения, измерения и сравнения при проведении криминалистических исследований. Именно он обуславливает вероятностный подход к оценке результатов криминалистических исследований сложных объектов.

Сначала рассмотрим, как наиболее очевидный, процесс измерения параметров выделенных идентификационных признаков. Известно, что произведенные одним и тем же измерительным инструментом измерения многих деталей, изготовленных по одним чертежам и размерам, как и многократные измерения одной детали разными экземплярами одного типа измерительного инструмента, никогда не дают одинакового результата [3]. Результаты измерений в таких случаях могут быть представлены только в виде набора измеренных случайных величин. А уже эти величины обрабатываются методами математической статистики, что и позволяет получить, например, усредненные значения измеренных величин [3]. С технической точки зрения эта закономерность поясняется тем, что любой предмет может быть изготовлен с точностью, которая определяется уровнем совершенства инструмента, предназначенного для его производства. Кроме того, инструмент изнашивается в процессе работы. Точность изготовления называется «полем допусков». Это же относится и к точности изготовления измерительных инструментов.

Таким образом, процесс измерения любых величин носит вероятностный характер. А поскольку измерение выделенных признаков при идентификации сложного объекта разворачивается во времени, то последовательность полученных величин образует случайный процесс.

Рассмотрим процесс возникновения идентификационных признаков. Любой сложный объект собирается из отдельных деталей, а каждая из них имеет свои индивидуальные размеры или другие особенности. Взаимодействуя друг с другом во время работы, они образуют внутренние идентификационные связи [4], которые проявляются в виде следов взаимодействия, разворачивающихся во времени [5]. Поэтому следы взаимодействия, возникающие при работе сложного предмета, также представляют собой случайный процесс. Его индивидуальность может быть однозначно определена набором статистических характеристик, носящих строго индивидуальный характер (например, оценочные значения плотности вероятности). Такие характеристики можно использовать в качестве идентификационных признаков, как и отдельные составляющие этого процесса, на которые делается акцент при проведении экспертизы (например, регулярные спектральные составляющие или мультифрактальные структуры, выделяемые из шума, образованного исследуемым объектом). Следовательно, идентификационные признаки, порождаемые исследуемым сложным объектом, также носят вероятностный характер.

В процессе проведения экспертизы таких объектов участвует еще один элемент – экспертный инструментальный (методики и средства экспертизы), который также является сложным техническим объектом, а потому его точность также носит вероятностный характер. Он используется при выделении, измерении и сравнении идентификационных признаков и представляет собой, как правило, аппаратно-программный комплекс. Таким образом, выделение, измерение и сравнение вероятностных величин производятся инструментом, точность которого также носит вероятностный характер. При этом сравнение идентификационных признаков является операцией установления меры близости между случайными величинами параметров, выделенных из образца и исследуемого объекта. Полностью совпасть эти величины принципиально не могут, так как они выделены из разных объектов. Поэтому результат такой операции всегда будет

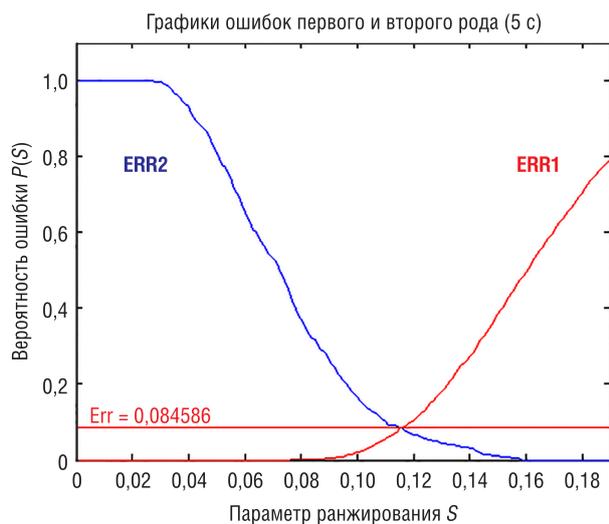


Рис. 1. Кривые ошибок I и II рода при ранжировании дикторов для речевых сообщений длительностью от 2 до 5 с

Fig. 1. Curves of errors of I and II family at ranging of announcers for speech reports by duration from 2 to 5 s

Поэтому построение любого современного экспертного инструментария должно опираться на определение его эффективности в виде графиков величин ошибок I и II рода. Пример таких графиков показан на рис. 1.

Следует отметить, что ранее такие графики при создании и принятии нового экспертного инструментария не строились (а если и строились, то их достоверность желала лучшего приближения к действительности). Это поясняется необходимостью проведения тысяч экспериментов на обширном эмпирическом материале. Выполнить такие объемы экспериментов без специальных средств автоматизации, опирающихся на современные компьютеры и программное обеспечение, невозможно. Но с появлением новой информационной технологии – нейронных сетей глубокого обучения, такая возможность появилась. При этом построение таких кривых на основе этой технологии (относящейся к технологиям искусственного интеллекта) не требует больших временных и денежных затрат.

Графики на рис. 1 означают, что оценочное значение округленной до трех знаков вероятности величины ошибки как I, так и II рода составляет 0,085. Соответственно, оценочное значение вероятной минимальной эффективности данного инструментария равно:

$$(1 - 0,085) \times 100 \% = 91,5 \%$$

Понятие вероятности ошибки I и II рода относится к математической статистике и вытекает из теории проверки статистических гипотез [6]. Как правило, под ошибкой I рода понимают вероятность того, что принятая в качестве основной гипотеза H_1 о принадлежности двух разных распределений к одной совокупности окажется ложной. Тогда под ошибкой II рода понимают вероятность того, что ложной окажется принятая гипотеза H_2 , например о принадлежности двух разных распределений к разным совокупностям [6]. Для криминалистического подхода это означает, что ошибка I рода является вероятностью того, что принятая в качестве основной гипотеза H_1 о, например, принадлежности идентификационных признаков к одному объекту их происхождения, является ложной. Соответственно, ошибка II рода – это вероятность того, что принятая в качестве основной гипотеза H_2 о принадлежности идентификационных признаков к разным объектам их происхождения является ложной.

При практическом применении вероятностного подхода к экспертным исследованиям для каждого сравнения идентификационных признаков, выделенных из двух разных идентифицирующих объектов, рассчитывается конкретная вероятность ошибок I и II рода либо одной из

носить вероятностный характер и оценивается как факт принадлежности сравниваемых идентифицирующих случайных величин к одному или разным распределениям, что и позволяет идентифицировать объект с некой степенью вероятностью.

Эффективность экспертного инструментария и ее связь с ошибками I и II рода. Для каждого конкретного экспертного инструментария в силу его вероятностного характера должна устанавливаться минимальная эффективность получаемых результатов как функция вероятности правильности (или неправильности) полученного вывода, которая обеспечивается для каждого конкретного исследования. Эта эффективность определяется вероятностью принятия ошибочного решения и оценивается величиной ошибок I и II рода. Именно величина этих ошибок определяет минимальную эффективность такого инструментария.

них. Эта вероятность, как правило, всегда ниже предельной вероятности таких ошибок, рассчитанных для инструментария, используемого при какой-либо конкретной экспертизе. Но она никогда не может превышать значения этой предельной вероятности. Пример иллюстрации такой экспертизы, выполненной с использованием инструментария «Фрактал» (Рибальский О. В., Соловйов В. И., Журавель В. В. Методика ідентифікаційних і діагностичних досліджень аналогової та цифрової апаратури звукозапису та аналогових і цифрових фонограм при проведенні технічних досліджень звуко- та відеозаписів на основі використання програмного комплексу «Фрактал»: авторське свідоцтво на твір № 75 496, заявка № 76 247 від 25.10.2017 р.), предназначенного для идентификационных и диагностических исследований аппаратуры цифровой и аналоговой звукозаписи, приведен на рис. 2.

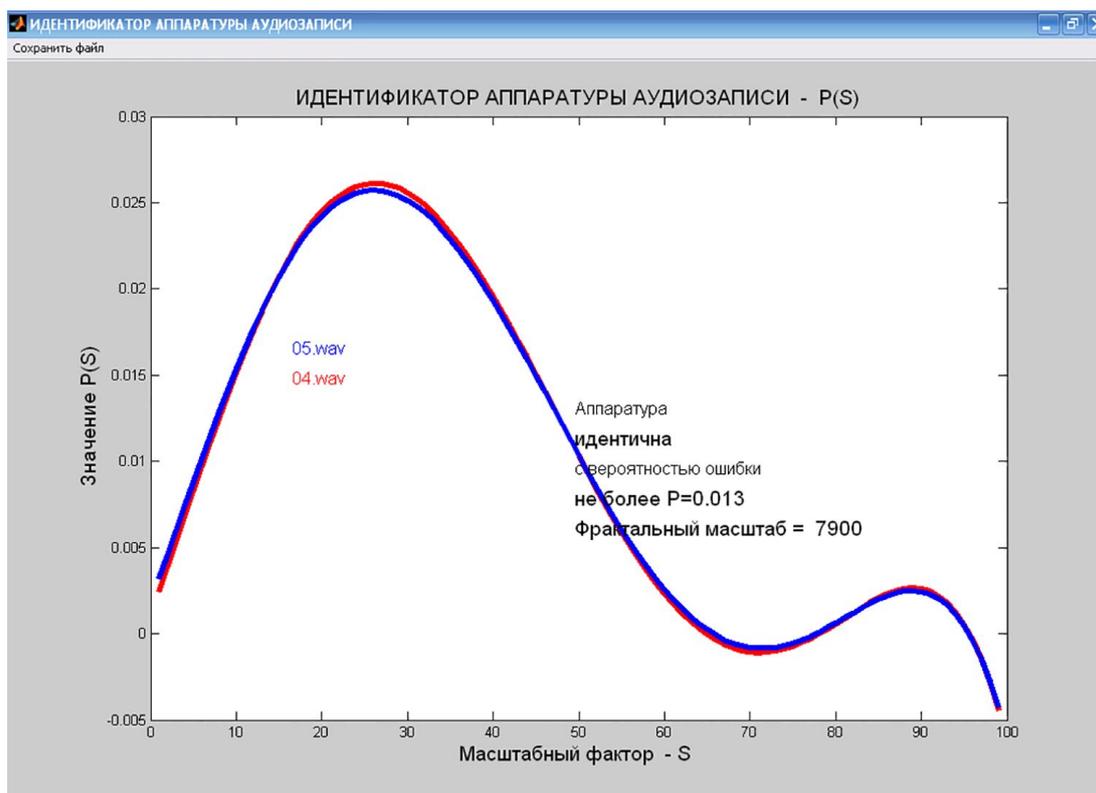


Рис. 2. Результаты идентификационных исследований аппаратуры цифровой звукозаписи
 Fig. 2. Results of identification researches of apparatus of the digital audio recording

Случайные компоненты экспертизы. Следует отметить, что практически любая экспертиза, связанная с измерениями конкретных величин, характеризуется наличием случайной составляющей, и ее результат необходимо представлять в вероятностной форме. При этом существуют определяемые вероятностью три отдельные случайные компоненты экспертизы, характеризующие экспертизу и инструментарий, предназначенный для идентификационных исследований сложных объектов. К ним относятся:

вероятность полного совпадения идентификационных признаков двух разных объектов группы, определяющая строгую индивидуальность идентификационных признаков каждого конкретного объекта. С технической точки зрения нахождение этой вероятности относится к классификационным задачам, а установление ее производится как расчет вероятности появления независимых событий;

вероятность ошибки I и II рода, оценивающая минимальную эффективность конкретного экспертного инструментария, используемого для каждого вида экспертизы;

вероятность, определяемая конкретной величиной ошибки I или II рода, получаемой при нахождении меры близости сравниваемых идентификационных признаков в процессе проведения идентификационных исследований конкретного объекта.

В данной работе особенности нахождения меры близости между сравниваемыми идентификационными признаками не рассматриваются, поскольку они носят частный характер для каждого конкретного вида экспертизы и методов построения инструментария.

Исходя из приведенных в статье доводов, мы полагаем, что требовать от эксперта категорического вывода невозможно, так как его принятие приводит к передаче недостоверных сведений в суд и в результате может спровоцировать судебную ошибку. Поэтому, по нашему мнению, в выводе эксперта целесообразно использовать формулировку «с высокой степенью вероятности», а в иллюстрациях к акту экспертизы указывать эту вероятность как величину вероятности ошибки I или II рода.

Следует отметить, что многие правоведы, не понимая смысла термина «вероятность», при обращении к вероятностному выводу задают вопрос: «У вас показана вероятность ошибки 0,05. Так значит, вы предусматриваете, что 5 % подсудимых будут невинно осуждены?» Следует понимать, что вероятность указывает лишь на численное значение возможности того, что такое событие может произойти.

Поэтому мы полагаем, что суд, оценивающий вероятностный вывод эксперта, должен принимать решение, исходя из оценки как акта экспертизы, так и всей совокупности доказательств.

Выводы. Из рассмотренных положений вытекает следующее:

1. При создании и внедрении в практику инструментария для проведения экспертиз сложных объектов необходимо определить кривые величин вероятности ошибки I и II рода и его минимальную эффективность. Именно эффективность инструментария должна служить критерием его пригодности для проведения экспертных исследований.

2. Существуют три отдельные случайные величины, определяемые вероятностью, характеризующие экспертизу и инструментарий, предназначенный для идентификационных исследований сложных объектов:

вероятность полного совпадения идентификационных признаков двух разных объектов группы, определяющая строгую индивидуальность идентификационных признаков каждого конкретного объекта;

вероятность ошибки I и II рода, определяющая оценку минимальной эффективности конкретного экспертного инструментария, используемого для каждого вида экспертизы;

вероятность, определяемая конкретной величиной ошибки I или II рода, получаемой при нахождении меры близости сравниваемых идентификационных признаков в процессе проведения идентификационных исследований конкретного объекта.

Наличие этих величин обуславливает необходимость представления выводов эксперта в вероятностной форме.

3. Результат любой экспертизы сложного объекта, связанной с измерениями конкретных величин, характеризуется наличием случайной составляющей, поэтому и ее результат необходимо представлять в вероятностной форме.

Список использованных источников

1. Торвальд, Ю. Век криминалистики / Ю. Торвальд. – М.: Прогресс, 1991. – 111 с.
2. Каганов, А. Ш. Криминалистическая экспертиза звукозаписей / А. Ш. Каганов – М.: Юрлитинформ, 2005. – 272 с.
3. Измерения в промышленности: справочник: в 3 кн.: пер. с нем. / под ред. П. Профоса. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – Кн. 1: Теоретические основы. – 492 с.
4. Сегай, М. Я. Методология судебной идентификации / М. Я. Сегай. – Киев: РИО МВД УССР, 1970. – 256 с.
5. Салтевський, М. В. Криміналістика (у сучасному викладі): підручник / М. В. Салтевський. – Київ: Кондор, 2008. – 588 с.
6. Нейман, Ю. Вводный курс теории вероятностей и математической статистики / Ю. Нейман. – М.: Наука, 1968. – 448 с.

References

1. Torvald U. *Century of Detectives*. Moscow, Progress Publ., 1991. 111 p. (in Russian).
2. Kaganov A. Sh. *Criminalistics Examination of the Audio Recording*. Moscow, Yurлитinform Publ., 2005. 272 p. (in Russian).

3. Bastl' V., Bendit G., Berveger P., Bonfig K. V., Busse G.-Yu., Vaksman F., Veiler Zh., Profos P. (ed.). *Measuring is in Industry. Book 1. Theoretical Bases*. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 492 p. (in Russian).

4. Segai M. Ya. *Methodology of judicial authentication*. Kiev, Editorial and Publishing Department of the Ministry of Internal Affairs of the Ukrainian SSR, 1970. 256 p. (in Russian).

5. Saltevs'kii M. V. *Criminalistics (in modern presentation)*. Kiev, Condor Publ., 2008. 588 p. (in Ukrainian).

6. Neiman J. *Introductory Course of Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 448 p. (in Russian).

Информация об авторах

Рыбальский Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и кибербезопасности, Национальная академия внутренних дел (пл. Соломенская, 1, 03035, Киев, Украина). E-mail: rov_1946@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-1440-8344>

Соловьев Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой компьютерных систем и сетей, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля (пр. Центральный, 59а, 93400, Северодонецк, Украина). E-mail: edemsvi@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-3541-4740>

Чернявский Сергей Сергеевич – доктор юридических наук, профессор, проректор, Национальная академия внутренних дел (пл. Соломенская, 1, 03035, Киев, Украина). E-mail: 0677443745s@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2711-3828>

Журавель Вадим Васильевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией исследований в сфере информационных технологий, Киевский научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр Министерства внутренних дел Украины (ул. Владимирская, 15, 01001, Киев, Украина). E-mail: fonoscopia@ukr.net

Железняк Владимир Кириллович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Республика Беларусь). E-mail: v.zheleznyak@psu.by

Information about the authors

Oleg V. Rybalskiy – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Cybernetic Safety, National Academy of Internal Affairs (1, Solom'yanska Are., 03035, Kyiv, Ukraine). E-mail: rov_1946@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-1440-8344>

Victor I. Solovyov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy of Manager of the Department of the Computer Systems and Networks, V. Dal East Ukrainian National University (59a, Tsentralnyi Ave., 93400, Severodonetsk, Ukraine). E-mail: edemsvi@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-3541-4740>

Sergey S. Chernyavskiy – D. Sc. (Legal), Professor, Vice-Rector, National Academy of Internal Affairs (1, Solom'yanska Are., 03035, Kyiv, Ukraine). E-mail: 0677443745s@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2711-3828>

Vadym V. Zhuravel – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory of Researches in the Field of Information Technologies, Kyiv Scientifically-Research Expertly-Criminalistics Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine (15, Vladimirska Str., 01001, Kyiv, Ukraine). E-mail: fonoscopia@ukr.net

Vladimir K. Zheleznyak – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Informative Safety, Polotsk State University (29, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: v.zheleznyak@psu.by

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 622.363.2.062:622.257.1(045)(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-366-377>

Поступила в редакцию 14.02.2019
Received 14.02.2019

П. А. Витязь^{1,2}, И. И. Головатый³, В. Я. Прушак⁴, Д. А. Диулин⁵

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

³ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Беларусь

⁴Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Солигорск, Беларусь

⁵ОАО «Трест Шахтоспецстрой», Солигорск, Беларусь

ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ ПРОХОДКЕ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ПЕТРИКОВСКОГО ГОКА

Аннотация. Изучены научно-технические аспекты технологии использования ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов в водоносных горных породах на примере объектов строящегося Петриковского ГОКа. Описан алгоритм процесса замораживания горного массива. Разработана методика расчета основных параметров ледопородного ограждения, основанная на классических научных представлениях в области геотехнологии, геомеханики и горной теплофизики, содержащая модифицированные формулы толщины и времени образования ледопородной стенки. Высокая эффективность разработанной методики подтверждается результатами успешного использования полученных численных значений параметров ограждения при реализации проекта проходки стволов. Показана возможность выбора способа размораживания мерзлых пород на основе анализа реальной трехмерной модели ледопородного ограждения. Важнейшим критерием такого выбора является равномерность толщины ледопородного ограждения по окружности вертикального ствола. Сделан вывод о достигнутой высокой научной и практической компетенции белорусских шахтостроителей – ученых и специалистов. В стране разработана надежная система научно-технического обеспечения технологии проходки вертикальных шахтных стволов с использованием временных ледопородных ограждений. Созданы эффективные методики проведения предварительных геологических исследований, расчета параметров ледопородных ограждений и замораживающего оборудования, выбора технологии проведения работ. Сформирована необходимая материально-техническая база для быстрого и качественно выполнения всего комплекса работ по сооружению шахтных стволов специальным способом.

Ключевые слова: шахтный вертикальный ствол, ледопородное ограждение, замораживание, гидрогеологическое и геофизическое строение

Для цитирования: Технология устройства ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов на примере объектов Петриковского ГОКа / П. А. Витязь [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 366–377. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-366-377>

P. A. Vityaz^{1,2}, I. I. Golovaty³, V. Ya. Prushak⁴, D. A. Diulin⁵

¹Presidium of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³JSC “Belaruskali”, Soligorsk, Belarus

⁴Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production, Soligorsk, Belarus

⁵JSC “Trest Shahtospetsstroy”, Soligorsk, Belarus

TECHNOLOGY OF PERFORMANCE OF ICE WALL WHEN SINKING SHAFTS AT THE EXAMPLE OF THE OBJECTS OF THE PETRIKOV MINING

Abstract. Scientific-technical aspects of technology of use of the ice wall when shaft sinking in water-bearing rocks, using an example of objects under construction of the Petrikov mining and processing plant, are studied. The algorithm of process of freezing of the mountain massif is described. The method is developed of calculation of the main parameters of the

ice barrier, based on classical scientific concepts in the field of geotechnology, geomechanics and mountain thermal physics, containing modified formulas of thickness and time of the ice wall formation. The high efficiency of the developed technique is confirmed by the results of the successful use of the obtained numerical values of the parameters of the fence in the implementation of the project of sinking shafts. It is shown the possibility of choosing a method of defrosting frozen rocks, based on the analysis of a real three-dimensional model of the ice barrier. The most important criterion for this choice is the uniformity of the thickness of the ice barrier along the circumference of the vertical cylinder. The conclusion is made about the high scientific and practical competence of Belarusian mine builders – scientists and specialists. The country has developed a reliable system of scientific and technical support for the technology of sinking vertical mine shafts using temporary ice fences. Effective methods of preliminary geological studies, calculation of parameters of ice-rock fences and freezing equipment, selection of technology of work have been created. The necessary material and technical base for fast and high-quality performance of all complex of works on a construction of mine trunks in the special way is created.

Keywords: mine vertical shaft, ice wall, freeze, hydrogeological and geophysical structure

For citation: Vityaz P. A., Golovaty I. I., Prushak V. Ya., Diulin D. A. Technology of performance of ice wall when sinking shafts at the example of the objects of the Petrikov mining. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 366–377 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-366-377>

Введение. С 2014 г. ОАО «Беларуськалий» реализует инвестиционный проект по промышленной разработке Петриковского месторождения калийных солей с вводом в эксплуатацию нового горно-обогатительного комплекса (ГОК) мощностью не менее 1,5 млн т хлорида калия в год. Проектом оговорено возведение двух вертикальных шахтных стволов – скипового глубиной 808,4 м и клетьевого глубиной 725,95 м – специальным способом, предусматривающим создание вокруг будущей выработки шахтного ствола временного защитного ограждения из замороженной породы, предохраняющего выработку при ее строительстве от разрушения в неустойчивых породах и поступления грунтовых вод из водоносных горизонтов. Работы по созданию указанного ледопородного ограждения (ЛПО) и проходке стволов были начаты в 2016 г. В настоящее время проходческие работы закончены на обоих стволах на глубинах значительно ниже водоносных горизонтов, а ЛПО находятся в стадии ликвидации. За период создания и использования такого типа ограждения получен большой объем информации, представляющей научный и практический интерес. Несмотря на то, что технология создания ЛПО в общих чертах достаточно проработана [1, 2], многие научно-практические аспекты ее использования требуют дальнейшего изучения и совершенствования с точки зрения учета сложных горно- и гидрогеологических факторов на участке проходки, повышения надежности и технологичности процессов замораживания и размораживания породного массива, снижения энергоемкости процесса. В связи с этим анализ информации, полученной в процессе мониторинга ЛПО при проходке стволов, представляется важным и актуальным.

Результаты и их обсуждение. Проходка спроектированных скипового и клетьевого стволов осуществляется, как уже упоминалось, специальным способом, предусматривающим создание искусственного защитного ЛПО на участке залегания водоносных горизонтов. Указанный способ искусственного замораживания горных пород состоит в том, что в водоносных породах вокруг места расположения будущего шахтного ствола образуют временное цилиндрическое ограждение, защищающее ствол от проникновения в него воды или пльвуна во время проходки [1, 2].

Работы по замораживанию горных пород состоят из следующих основных процессов: предварительное геологическое и гидрогеологические исследования участка замораживания; составление проекта работ по замораживанию горных пород; бурение замораживающих скважин; монтаж замораживающей станции и рассольной сети; образование ЛПО, то есть собственно замораживание, и контроль за процессом замораживания; поддержание ЛПО в замороженном состоянии в течение всего времени производства горнопроходческих работ и возведения постоянной крепи; оттаивание (искусственное или естественное) замороженных горных пород по окончании проходки ствола шахты; ликвидация замораживающих скважин; демонтаж холодильной установки и рассольной сети.

Геологическое и гидрогеологические исследования участка замораживания выполнялись в течение многих лет. На основании анализа результатов бурения гидрогеологических и контрольно-стволовых скважин, а также других ранее выполненных исследований особенностей гидрогеологического и геофизического строения Петриковского месторождения калийных солей была выполнена оценка гидрогеологических условий на участке заложения шахтных стволов Петриковского ГОКа.

В результате исследования установлено, что месторождение калийных солей, расположенное в центральной части Припятского артезианского бассейна, является сложной гидрогеологической системой, состоящей из ряда напорных водоносных горизонтов и комплексов, разделенных водоупорными породами. В гидрогеологическом разрезе участка проходки стволов выделяются три гидродинамические и гидрохимические зоны.

В состав верхней зоны активного водообмена входят водоносные горизонты и комплексы, которые относятся к обводненным отложениям четвертичных, неогеновых, палеогеновых, меловых, юрских, триасовых образований. Эти водоносные горизонты и комплексы гидравлически связаны между собой. К ним относятся пресные гидрокарбонатные, магниевые-кальциевые воды.

Водоносные горизонты в обводненных прослоях нижнекарбонатных отложений и надсолевого девона относятся к зоне замедленного водообмена. К ним приурочены хлоридные натриевые воды с высоким содержанием сульфатов и минерализацией от нескольких граммов до более 100 г/дм³.

Водоносные горизонты и комплексы, залегающие под соленосной толщей, относятся к зоне замедленного водообмена. К ней приурочены хлоридные кальциевые-натриевые и натриевые воды с минерализацией более 300 г/дм³.

С точки зрения оценки необходимости создания ЛПО и определения его параметров, обеспечивающих безопасную проходку стволов, были подробно рассмотрены гидрогеологические условия горизонтов и комплексов, залегающих выше соленосной толщи, так как ниже этой толщи находятся водоупорные слои породы, безопасные с точки зрения водопритоков.

Установлено, что на рассматриваемом участке породного массива можно выделить следующие водоносные горизонты и комплексы и разделяющие их относительно водоупорные породы:

- водоносный комплекс неоген-четвертичных отложений;
- водоносный киевский и харьковский терригенный комплекс;
- слабоводоносный туронский карбонатный комплекс;
- водоносный сеноманский терригенный горизонт;
- водоносный юрский терригенно-карбонатный комплекс;
- водоносный нижнетриасовый карбонатно-терригенный горизонт;
- водоупорный локально слабоводоносный комплекс нижнего карбона;
- водоупорный локально водоносный полесский карбонатно-терригенный комплекс;
- водоупорный локально слабоводоносный стрешинский терригенно-карбонатный комплекс;
- водоупорный галогенно-карбонатно-терригенный комплекс верхнего девона.

Таким образом, при прохождении шахтных стволов до калийных горизонтов опасность водопритока представляли водоносные горизонты и комплексы, расположенные выше водоупорного локально слабоводоносного комплекса нижнего карбона, верхняя отметка залегания которого находится на глубине 255 м, а нижняя – на глубине 265 м. При этом ниже подошвы указанного водоупорного комплекса располагаются другие водоупорные комплексы, простирающиеся до соленосной толщи. Соответственно расчет ожидаемых при проходке шахтных стволов водопритоков целесообразно было выполнять для обводненных горизонтов, расположенных выше отметки 255 м, то есть выше массива водоупорных комплексов. Однако фактически расчет был выполнен с некоторым запасом, до глубины 290 м. При этом максимальные ожидаемые водопритоки определялись по каждому водоносному горизонту отдельно по модернизированной формуле Зихардта [3]

$$Q = 2,73 \frac{k_m \cdot S}{\lg R - \lg r},$$

где Q – водоприток в шахтный ствол, м³/сут; k_m – водопроводимость водоносного горизонта, м²/сут; S – понижение уровня до подошвы водоносного горизонта, м; r – радиус шахтного ствола, м; R – радиус влияния шахтного ствола, м, определяемый по формуле Кусакина

$$R = 2S\sqrt{kH},$$

в которой k – коэффициент фильтрации, м/сут; H – величина пьезометрического напора, м; S – понижение уровня до подошвы водоносного горизонта, м.

Согласно выполненным расчетам, при проходке скипового и клетьевого шахтных стволов суммарная величина ожидаемого водопритока в каждый из стволов составила около $112\,290\text{ м}^3/\text{сут}$ из водоносных горизонтов, расположенных на глубинах до 255 м. Ниже указанной глубины водоприток практически исключался (не более $5\text{ м}^3/\text{сут}$ из нижележащих горизонтов мощностью 80 м). Именно сложные гидрогеологические условия участка заложения стволов до глубины 255 м и предопределили необходимость применения специального способа проходки в пределах водоносных пород под защитой искусственно созданного ледопородного ограждения.

Искусственное замораживание горных пород предполагалось осуществлять в три этапа. Первый этап – активное замораживание, обеспечивающее образование ЛПО проектного размера. Второй этап – пассивное замораживание, гарантирующее поддержание созданного криогидратного ограждения в замороженном состоянии с сохранением необходимых параметров ЛПО в течение всего времени проходки ствола через замороженные породы с возведением постоянной крепи в виде тубингового крепления и цементационной завесы. Третий этап – оттаивание замороженных горных пород.

ЛПО вокруг шахтного ствола должно было выполнять функции временной крепи и водонепроницаемой завесы. Размеры данного ограждения, его толщина определялись расчетами, в которых учитывались физико-механические и теплофизические свойства пород, а также средняя температура ЛПО. В формулы расчетов входили коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, теплосодержания горных пород, термическое сопротивление, коэффициент холодопередающей способности замораживающих колонок, сопротивление условно-мгновенному и длительному сжатию замораживающих пород и др. Причем с изменением температуры, влажности, трещиноватости и пористости горных пород указанные характеристики изменяются в различных пределах. В качестве исходных данных при расчете теплосодержания и продолжительности замораживания были приняты результаты испытаний образцов керна горных пород Петриковского месторождения.

В расчетах прочности ЛПО исходили из предположения, что оно должно выдерживать внешнюю нагрузку со стороны неустойчивых горных пород и гидростатическое давление. Наибольшую нагрузку ограждение испытывает в тот период, когда грунт в его пределах вынут, а обнаженный замороженный массив не закрыт постоянной крепью.

Чрезвычайно важное значение имеет глубина замораживающих скважин. Чтобы полностью изолировать от воды горную выработку, скважины должны быть заглублены в пласт водоупорной горной породы. Несоблюдение этого условия часто приводило к авариям или осложнениям в работе, так как в тех местах, где скважины не доводили до водоупорного пласта, в выработку прорывались пльвун или вода. Кроме того, так как верхняя часть водоупорных горных пород часто бывает изрезана трещинами, сообщающимися с вышележащими водоносными породами, то и при недостаточном заглублении замораживающих скважин трещины могут проводить воду в ствол шахты, что приводит к серьезным затруднениям при выемке пород ниже замороженной зоны. Первоначально проектом предусматривалось устройство ЛПО до глубины 275 м. Затем, в процессе выполнения работ, на основании уточненных геологических данных глубина ЛПО была скорректирована до 267 м, что обеспечивало достаточное заглубление ЛПО – более чем на 10 м в плотные водоупорные породы.

Известно, что прочность замороженного грунта зависит от температуры, до которой он охлажден, и от петрографического состава грунта [4–6]. Поэтому ЛПО будет иметь неодинаковую прочность в разных местах. При этом распределение температур в ЛПО очень неравномерное. В зависимости от рассматриваемого направления температуры в ограждении изменяются по различным законам. Наиболее низкие температуры, равные температуре наружной стенки трубы, создаются возле замораживающей колонки и повышаются по мере удаления от нее до криогидратной точки. В целом можно считать, что в радиальном направлении изменение температуры ЛПО происходит по логарифмической зависимости с повышением в направлении от замораживающей колонки. Согласно расчетам, уже на расстоянии 0,5 м от замораживающей колонки такое повышение составляет около 11 °C при температуре охлаждающего рассола -20 °C . Значение коэффициента теплопередачи замораживающих труб величина переменная. После того как радиус криогидратного цилиндра вокруг колонки достигает 1 м, холодопередающая способность становится почти в 2 раза меньше первоначальной.

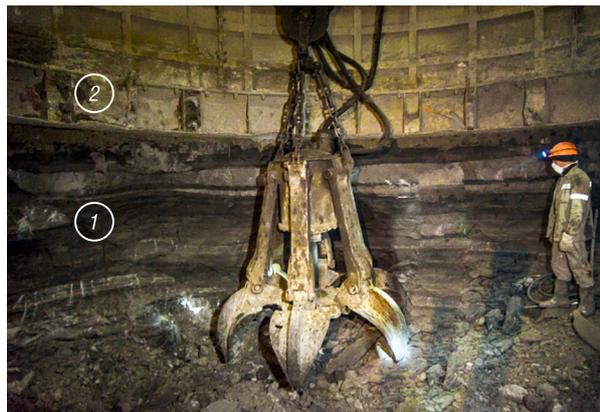


Рис. 1. Проходка скипового ствола на глубине 250 м: 1 – незащищенная крепью замороженная порода, 2 – тубинговая крепь

Fig. 1. Sinking of the skip shaft at a depth of 250 m: 1 – unprotected frozen rock, 2 – tubing

При предварительных расчетах процесса замораживания средняя температура замороженных пород на основании установленной эмпирической зависимости была принята равной 40 % температуры внешней стенки колонки, что составило $-7,5$ °С.

В связи с тем что нагрузка на ЛПО и его несущая способность для каждого породного слоя свои, необходимая толщина ограждения определялась для каждой литологической разности отдельно.

В исходных расчетах была принята совмещенная схема проходки стволов с возведением бетонной или тубинговой крепи вслед за забоем с отставанием крепи не более 5 м (рис. 1). Исходные данные для расчета внешних нагрузок и толщины ЛПО приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Исходные данные для расчета внешних нагрузок и толщины ЛПО

Table 1. Initial data for calculation of external loadings and thickness

Параметр	Литологический слой						
	глина	алевроит	песок	мел	песчаник	песок глинистый	глина аргиллитовая
Глубина от поверхности, м	23	58	85	136	146	255	267
Угол внутреннего трения пород, град	11	18	30	34	42	31	24
Сцепление пород, кПа	64	67	12	82	6	58	71
Прочность на сжатие замороженных пород через 24 ч, кПа	1400	2300	4800	6502	7607	8106	8602
Коэффициент деформации замороженных пород, кПа	2200	3900	5409	6905	7607	8106	9803
Коэффициент упрочнения замороженных пород	0,37	0,33	0,29	0,18	0,27	0,25	0,14
Допустимое смещение ЛПО по внутреннему контуру, м	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Высота участка ЛПО не подкрепленного крепью, м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Внутренний радиус ЛПО, м	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25

Полная горизонтальная нагрузка на ЛПО в обводненных грунтах определялась для каждой литологической разности как сумма давлений воды и горных пород:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{гидр}} + P_{\text{гор}},$$

где $P_{\text{гидр}}$ – гидростатическое давление на расчетной глубине, кПа; $P_{\text{гор}}$ – горное давление пород на расчетной глубине, кПа, которое определяется по формуле

$$P_{\text{гор}} = (\sum \gamma_i H_i - P_{\text{гидр}}) \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) - 2C \cdot \text{tg}(45^\circ - \varphi/2),$$

в которой $\sum \gamma_i H_i$ – средневзвешенный удельный вес горных пород кН/м^3 ; φ – угол внутреннего трения пород, град; C – сцепление пород, кПа.

Расчет толщины ЛПО велся по предельным состояниям из условий его прочности и деформации с использованием модифицированных формул Домке и Вялова [4]. По условию прочности толщина ограждения E_1 определялась по модифицированной формуле Домке, в которой ЛПО рассматривается как упругопластический толстостенный цилиндр правильной формы и бесконечно большой длины, сжатый равномерно распределенной внешней нагрузкой и вертикальным давлением от веса цилиндра. В соответствии с указанным подходом замороженные породы на внешней поверхности цилиндра не должны переходить в пластическое состояние, наступающее в случае, когда разность наибольшего и наименьшего главных нормальных напряжений становится равной пределу прочности замороженных пород на сжатие. Для получения запаса проч-

ности в формулу введен предел длительной прочности $\sigma_{сж24}$ при действии нагрузки в течение 24 ч. Известно, что замороженные грунты обладают свойством ползучести – способностью снижать свою прочность под действием длительно действующей нагрузки. Именно по этой причине в указанные формулы определения толщины ЛПО Домке и Вялова [4] были введены показатели длительной прочности, которые определялись экспериментальным путем для каждого литологического слоя отдельно. При этом исходили из особенностей технологии проходки, согласно которой время, в течение которого обнаженная стена ЛПО должна воспринимать на себя горное давление, составляет не более 24 ч, необходимых для проходки участка ствола и возведения одного кольца тубингов. Таким образом, модифицированная формула Домке имеет следующий вид:

$$E_1 = R_{вн} \left[0,29 P_{полн} / \sigma_{сж24} + 2,3 \cdot (P_{полн} / \sigma_{сж24})^2 \right],$$

где $R_{вн}$ – внутренний радиус ЛПО, равный радиусу ствола в проходке, м; $\sigma_{сж24}$ – прочность на сжатие замороженных пород через 24 ч, кПа.

Толщина ледопородного ограждения по условию деформации E_2 внутреннего контура в течение суток определялась по модифицированной формуле Вялова

$$E_2 = R_{вн} \left[\left(1 + 0,75 \frac{(1-m) P_{лпн} h^{(1+m)}}{A_{24} \cdot \Delta^m \cdot R_{вн}} \right)^{(1/(1-m))} - 1 \right],$$

где m – коэффициент упрочнения замороженных пород; h – высота участка ЛПО, не подкрепленного крепью, м; A_{24} – коэффициент деформации замороженных пород через 24 ч, кПа; Δ – допускаемое по технологическим соображениям радиальное смещение внутренней стенки ЛПО, м.

По результатам расчетов наиболее нагруженных участков (в песчаниках на глубине 85 м и 146 м) толщина ЛПО в замковой плоскости (рис. 2) была принята равной 2,5 м.

Правильность выполненных расчетов ширины ЛПО была подтверждена в дальнейшем в процессе проходки скипового и клетьевого стволов через замороженные водоносные горизонты. В течение всего времени проходки была полностью обеспечена необходимая прочность и водонепроницаемость ЛПО.

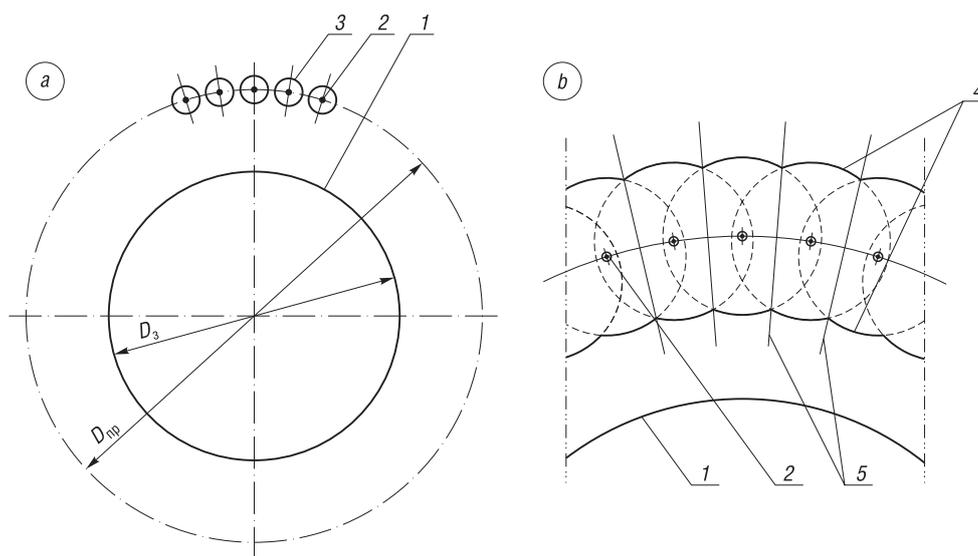


Рис. 2. Схема формирования ЛПО: *a* – начальный этап (формирование изолированных ледопородных цилиндров), *b* – конечный этап (смыкание ледопородных цилиндров с образованием ЛПО проектных размеров); 1 – проектный контур ствола, 2 – замораживающая колонка, 3 – криогидратная поверхность ледопородного цилиндра, 4 – криогидратная поверхность ЛПО, 5 – замковые плоскости ЛПО

Fig. 2. The scheme of formation of the ice wall: *a* – initial stage (the formation of isolated ice cylinders), *b* – final stage (the connection of the ice cylinders with the formation of ice wall design dimensions); 1 – design the contour of the mine shaft, 2 – freezing column, 3 – cryohydrate surface of the ice cylinder, 4 – cryohydrate surface of ice wall, 5 – locking plane of the ice wall

Диаметр окружности расположения замораживающих колонок D_3 определялся по формуле

$$D_3 = D_{\text{пр}} + 1,2L + 2a,$$

где $D_{\text{пр}}$ – диаметр ствола в проходке, м; L – расчетная толщина ледопородного ограждения, равная 2,5 м; a – допустимое отклонение замораживающих колонок от вертикали, м.

С учетом результатов расчетов, а также особенностей конструкции галереи распределительных рассолопроводов диаметр окружности расположения замораживающих колонок для каждого ствола был принят равным 16,5 м. При этом проектом предусматривалось устройство 41 замораживающей колонки при расстоянии между двумя соседними колонками 1,26 м. Кроме того, на каждом стволе планировалось устройство дополнительно двух контрольно-термических скважин, одной скважины ультразвукового контроля и двух скважин гидронаблюдения.

В качестве исходных данных при расчете теплосодержания и продолжительности замораживания были использованы результаты испытаний образцов керна горных пород Петриковского месторождения, проведенных в лаборатории Института природопользования НАН Беларуси, а также опыт ранее выполненных работ при строительстве соляных рудников ОАО «Беларуськалий» и научная база ОАО «Белгорхимпром». Исходные данные для расчета теплосодержания и продолжительности замораживания горных пород представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Исходные данные для расчета продолжительности замораживания горных пород

Table 2. Baseline data for the calculation of the duration of rock freezing

Параметр	Литологический слой						
	глина	алеurit	песок	мел	песчанник	песок глинистый	глина аргиллитовая
Глубина от поверхности, м	23	58	85	136	146	255	267
Расстояние между центрами замораживающих колонок на поверхности, м	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
Допустимое отклонение колонок от вертикали на расчетной глубине, м	0,5	0,5	0,5	0,77	0,79	1,0	1,05
Расчетная толщина ЛПО, м	1,6	1,9	2,5	1,85	2,5	2,0	1,5
Температура замерзания воды в породе, °С	-2,12	-0,35	-0,12	-0,09	-0,7	-0,81	-1,9
Температура внешней поверхности стенки замораживающей колонки, °С	-17,8	-17,8	-17,8	-17,8	-17,8	-17,8	-17,8
Коэффициент теплопроводности пород, Вт/м · К	1,29	1,38	2,75	1,54	2,28	2,02	1,70
Наружный диаметр замораживающих колонок, м	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
Коэффициент, учитывающий теплопоток от охлаждающих пород	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Общее количество холода, необходимое для замораживания расчетного объема породы и грунтовой воды, кДж/м ³ · 10 ³	116	120	178	94,5	104	107	91,5
Максимальное отклонение между колонками, м	1,63	1,63	1,63	2,17	2,21	2,63	2,73
Радиус промерзания пород вокруг колонки, м	1,14	1,25	1,49	1,43	1,67	1,65	1,56

Прогнозируемое время активного замораживания ограждения T , сут, определялось при помощи модифицированной формулы Н. Г. Трупака [6], которая представляет собой упрощенную модель решения цилиндрической задачи Стефана:

$$T = \frac{(1 + \psi)P}{8 \cdot 24(T_3 - T_{\text{ст}})\lambda} \left[L_{\text{max}}^2 \ln \frac{L_{\text{max}}}{D_0} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{2R}{D_0} \left(8R^2 \arcsin \frac{L_{\text{max}}}{2R} - \pi L_{\text{max}}^2 + 4L_{\text{max}} \sqrt{R^2 - 0,25L_{\text{max}}^2} \right) \right],$$

где ψ – коэффициент, учитывающий теплоприток от охлаждающих пород; P – общее количество холода, необходимое для замораживания расчетного объема породы и грунтовой воды, Дж/м³; T_3 – температура замерзания воды в породе, °С; $T_{\text{ст}}$ – температура внешней поверхности стенки замораживающей колонки, °С; λ – коэффициент теплопроводности пород, Вт/м · К; L_{max} – максимальное отклонение между колонками, м; L_0 – расстояние между центрами замораживающих

колонок, м; a – допустимое отклонение колонок от вертикали на расчетной глубине, м; D_0 – наружный диаметр замораживающих колонок, м; E – расчетная толщина ЛПО, м; R – радиус промерзания пород вокруг колонки, м, определяемый следующим образом:

$$R = \sqrt{\frac{E^2 + I_{\max}^2}{4}}.$$

Согласно выполненным расчетам, время образования ЛПО проектного размера для рассматриваемых литологических разностей должно было составлять от 82 до 91 сут, а для слоя глинистых пород на глубине свыше 255 м – 121 сут. То есть предполагалось, что полное время образования ограждения с нужными параметрами составит до 4 мес. В реальности процесс замораживания пород произошел быстрее. Согласно результатам оперативного инструментального контроля процесса замораживания породного массива с использованием внедренной интеллектуальной системы мониторинга формообразования и состояния ЛПО [7, 8], было установлено, что, уже по истечении 85 сут от начала процесса замораживания его проектные размеры были существенно превышены по всем литологическим слоям. Таким образом, расчет времени активного замораживания с использованием упрощенной модели решения цилиндрической задачи Стефана по модифицированной формуле Н. Г. Трупака дал несколько завышенный результат по сравнению с фактически установленным – 4 мес по расчету и менее 3 мес фактически.

По нашему мнению, выявленное несоответствие численных значений фактического и проектного времени образования ЛПО объясняется следующими причинами. Во-первых, было установлено, что естественная температура пластов ниже расчетной, принятой на основании предварительных геологических исследований. Во-вторых, реальные теплофизические параметры породных слоев также оказались несколько отличными от проектных. В-третьих, проходка скважин под замораживающие колонки была выполнена с высокой точностью, обеспечившей существенно меньшее отклонение колонок от вертикали на больших глубинах по сравнению с предельно допустимыми значениями, заложенными в расчете. В результате замораживание пород и смыкание ледопородных цилиндров с образованием ЛПО проектных размеров произошло быстрее расчетного времени. Таким образом, речь идет о погрешности некоторых исходных геофизических и геотехнических параметров, точное значение которых практически невозможно получить до начала работ по проходке скважин и замораживанию горной породы.

В связи с этим следует отметить, что проходка шахтных стволов с замораживанием пород всегда сопровождается корректировкой исходных геологических и геотехнических параметров. В одном случае могут быть незначительные корректировки, существенно не влияющие на технологию работ, как в нашем случае, что позволило начать работы по проходке стволов несколько раньше проектного срока. В ином случае могут быть корректировки, вносящие очень значительные изменения в технологию и параметры ЛПО. Например, существенная корректировка параметров ЛПО потребовалась при проходке скипового шахтного ствола №1 строящегося Гремячинского ГОКа. На этом объекте при достижении глубины забоя до отметки ниже сформированного ЛПО на основании полученных новых геологических данных было принято решение по увеличению глубины замораживания пород от 520 до 820 м [9].

Возвращаясь к проблеме целесообразности применения метода определения времени активного замораживания ЛПО с использованием модифицированной формулы Н. Г. Трупака, следует признать такое применение его оправданным. Метод не требует сложного математического аппарата и позволяет осуществлять оперативную оценку ожидаемого времени замораживания ЛПО, исходя из возможности реализации наиболее негативного сочетания геофизических и геотехнических факторов для производства горных работ. Вместе с тем в связи с развитием информационных технологий представляется целесообразным в дальнейшем исследовать возможность использования для расчетов времени активного замораживания ЛПО усовершенствованного метода трехмерного моделирования толщины данного ограждения, описанного в работах [10–12]. Указанный метод позволяет, в частности, осуществлять точный учет нестационарной тепловой диффузии в талой и мерзлой зонах, а также учет теплового влияния соседних скважин на формирование ЛПО. Основанием для такой рекомендации служит достаточно успешный опыт применения данного метода в качестве теоретической основы интеллектуальной системы

мониторинга формообразования и состояния ЛПО на участке сооружения шахтных стволов Петриковского ГОКа [7].

В процессе активного замораживания на первом этапе производилось охлаждение породного массива до температуры замерзания воды, а затем осуществлялось намораживание ледопородных цилиндров до их полного смыкания друг с другом (см. рис. 2). Процесс образования ЛПО контролировался за мерами температур в контрольно-термических скважинах с помощью оптоволоконного измерительного кабеля, позволяющего производить замеры температуры ледопородного массива в любой точке по всей глубине скважины. Кроме того, толщину ЛПО контролировали с помощью ультразвукового датчика, перемещаемого в скважине ультразвукового контроля.

Для обеспечения замораживания грунтов на площадку возле стволов устанавливались холодильные машины, собранные в контейнерах, полностью автоматизированные, укомплектованные трубопроводами, арматурой, приборами автоматики, щитами управления и питания (рис. 3).



Рис. 3. Размещение шахтных стволов и замораживающего оборудования на промплощадке Петриковского ГОКа (конец 2016 г.): 1 – замораживающая станция, 2 – проходческий копр скипового ствола, 3 – проходческий копр клетьевого ствола

Fig. 3. The location of the mine shafts and freezing equipment at the site of the Petrikov Mining (by the end of 2016): 1 – freezing station, 2 – sinking headgear of the skip shaft, 3 – sinking headgear of the cage shaft

Предварительная оценка необходимой полезной мощности замораживающей станции $Q_{\text{п}}$, Вт, определялась по формуле

$$Q_{\text{п}} = \pi d_{\text{к}} H_3 N_3 K_x,$$

где $d_{\text{к}}$ – наружный диаметр замораживающей колонки, м; H_3 – длина замораживающей колонки, м; N_3 – количество замораживающих колонок, шт.; K_x – коэффициент теплопередачи от внешней поверхности замораживающих труб к окружающей среде Вт/м²·°С.

Потребляемая мощность замораживающей станции при активном режиме замораживания рассчитывалась с учетом неизбежных потерь следующим образом:

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{п}} k,$$

где k – коэффициент учета потерь холода в рассольной сети, равный 1,2.

После образования ЛПО требуемых размеров в процессе активного замораживания замораживающую станцию перевели в пассивный режим, который предназначен для сохранения достигнутых в процессе активного замораживания проектных параметров ЛПО (толщина, средняя температура, прочность), чтобы не допустить оттаивания или ослабления ограждения за счет теплопритока к его внешней поверхности. Продолжительность работы в пассивном режиме определялась временем, необходимым для проходки ствола на участке замороженных пород и сооружения цементационных завес ниже участка замороженных пород.

Холодопроизводительность станции в период пассивного замораживания в расчетах была принята в размере 50 % производительности станции в период активного замораживания пород.

Все работы, связанные с процессом создания и поддержания ЛПО, контролировались с помощью технологии оптоволоконной телеметрии и ультразвуковой диагностики.

Активное замораживание пород вокруг скипового и клетьевого стволов производилось в 2016 г. Затем процесс замораживания был переведен в пассивный режим. После прохождения участка ствола с тубинговым креплением и выполнения цементационной завесы начался процесс размораживания ЛПО.

При окончательном выборе способа размораживания (естественного или искусственного) исходили из следующего. Известно, что интенсивное оттаивание ЛПО неизбежно ведет к значительным концентрациям температурных напряжений в многослойной конструкции крепи. Поэтому в случае значительной неравномерности толщины данного ограждения по окружности вертикального ствола наиболее безопасным способом оттаивания замороженного массива является естественный способ, использование которого позволяет устранить опасность аварийного разрушения выработки [13]. Однако естественное оттаивание ЛПО занимает много времени, что существенно сдерживает начало производства тампонажа закрепного пространства и качественного погашения замораживающих скважин, тогда как при искусственном способе оттаивания имеется техническая возможность управлять процессом размораживания мерзлых пород и технологические нарушения можно предотвращать. В результате анализа геометрических параметров трехмерной модели ЛПО обеих скважин было установлено, что оба ограждения имели довольно правильную цилиндрическую форму с относительно равномерной толщиной по окружности в горизонтальных сечениях каждой литологической разности. Соответственно наблюдались горнофизические и горнотехнические условия для использования способа комплексного управляемого искусственного оттаивания ЛПО. Сущность этого способа заключалась в прокачке через колонки хладоносителя определенной температуры, которая обеспечивала медленный нагрев замороженной породы, и подачи в ствол подогретого воздуха. Разработанный способ искусственного размораживания был успешно реализован на обоих стволах.

Заключение. Изучены научно-технические аспекты технологии использования ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов в водоносных горных породах на примере объектов строящегося Петриковского ГОКа. Описан алгоритм процесса замораживания горного массива. Представлена методика расчета основных параметров ледопородного ограждения, основанная на классических научных представлениях в области геотехнологии, геомеханики и горной теплофизики, содержащая модифицированные формулы толщины и времени образования ледопородной стенки. Высокая эффективность разработанной методики подтверждается результатами успешного использования полученных численных значений параметров ограждения при реализации проекта проходки стволов. Показана возможность выбора способа размораживания мерзлых пород на основе анализа реальной трехмерной модели ЛПО. Важнейшим критерием такого выбора является равномерность толщины данного ограждения по окружности вертикального ствола.

Анализируя результаты проходки шахтных стволов Петриковского ГОКа через водоносные горизонты, можно сделать вывод о достигнутой высокой научной и практической компетенции белорусских шахтостроителей – ученых и специалистов. На основании классических представлений в области геотехнологии, геомеханики и горной теплофизики разработана надежная система научно-технического обеспечения технологии проходки вертикальных шахтных стволов с использованием временных ЛПО. Созданы эффективные методики проведения предварительных геологических исследований, расчета параметров ЛПО и замораживающего оборудования, выбора технологии проведения работ. В стране сформирована необходимая материально-техническая база для быстрого и качественного выполнения всего комплекса работ по сооружению шахтных стволов специальным способом.

Список использованных источников

1. Михайлов, Ю. В. Строительство горных выработок специальными способами: учеб.-метод. пособие / Ю. В. Михайлов, В. Ф. Носков, В. Я. Прушак. – Минск: Тэхналогія, 2005. – 223 с.
2. Паланкоев, И. М. Обоснование параметров технологии проходки шахтных стволов в искусственно замороженных породах: дис. ... канд. техн. наук / И. М. Паланкоев. – М., 2015. – 192 с.
3. Указания по оценке гидрогеологических условий шахтных полей и прогнозу водопритоков в горные выработки / ВНИИ горн. геомеханики и маркшейдер. дела. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 98 с.
4. Маньковский, Г. И. Специальные способы проходки горных выработок / Г. И. Маньковский. – М.: Углетехиздат, 1958. – 454 с.
5. Дмитриев, А. П. Термодинамические процессы в горных породах: учеб. для вузов / А. П. Дмитриев, С. А. Гончаров. – М.: Недра, 1990. – 360 с.
6. Трупак, Н. Г. Замораживание пород при сооружении вертикальных шахтных стволов / Н. Г. Трупак. – М.: Недра, 1983. – 270 с.
7. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов / И. И. Головатый [и др.] // Горн. журн. – 2018. – № 8. – С. 48–53. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.06>
8. Левин, Л. Ю. Контроль теплового режима породного массива на основе применения оптоволоконных технологий мониторинга температур в скважинах / Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев, М. А. Семин // Горн. эхо. – 2016. – № 1. – С. 35–37.
9. Хайден, Т. Современная технология замораживания пород на примере двух объектов, находящихся на стадии строительства, состоящих из пяти вертикальных шахтных стволов / Т. Хайден, Б. Вегнер // Горн. журн. – 2014. – № 9. – С. 65–69.
10. Левин, Л. Ю. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов / Л. Ю. Левин, М. А. Семин, О. С. Паршаков // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 154–161. <https://doi.org/10.15372/ftprpi20170517>
11. Левин, Л. Ю. Исследование динамики ледопородного ограждения в условиях повреждения замораживающих колонок при проходке шахтных стволов / Л. Ю. Левин, Е. В. Колесов, М. А. Семин // Горн. информ.-аналит. бюлл. – 2016. – № 11. – С. 257–265.
12. Метод решения обратной задачи Стефана для контроля состояния ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов / Л. Ю. Левин [и др.] // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Геология. Нефтегазовое и гор. дело. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 255–267. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.3.6>
13. Иудин, М. М. Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения / М. М. Иудин // Вестн. Якут. гос. ун-та. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 46–51.

References

1. Mihailov Yu. V., Noskov V. F., Prushak V. Ya. *Construction of Mine Workings in Special Ways*. Minsk, Tehnologiya Publ., 2005. 223 p. (in Russian).
2. Palankoev I. M. *Evaluation of Shafting Technology Parameters for Artificially Frozen Rocks*. Moscow, 2015. 192 p. (in Russian).
3. *Guidance on the Assessment of the Hydrogeological Conditions of Mine Fields and the Forecast of Water Inflows into the Mine Workings*. Leningrad, VNIMI, 1987. 98 p. (in Russian).
4. Mankovskii G. I. *Special Methods of Mining Drilling*. Moscow, Ugleizdat Publ., 1958. 454 p. (in Russian).
5. Dmitriev A. P., Goncharov S. A. *Thermodynamic Processes in Rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 360 p. (in Russian).
6. Trupak N. G. *Rock Freezing in Shafting*. Moscow, Nedra Publ., 1983. 270 p. (in Russian).
7. Golovatii I. I., Levin L. Yu., Parshakov O. S., Diulin D. A. Optimization of frozen wall formation in shaft construction. *Gornyi Zhurnal*, 2018, no. 8, pp. 48–53 (in Russian). <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.06>
8. Levin L. Yu., Zaitsev A. V., Semin M. A. Control of the thermal regime of the rock massif based on the application of fiber-optic technologies for monitoring temperatures in wells. *Gornoe ekho* [Mountain Echo], 2016, no. 1, pp. 35–37 (in Russian).
9. Heyden T., Vegner B. Modern shaft freezing technology implemented in two big shaft sinking projects with total five surface mine shafts are being constructed. *Gornyi Zhurnal*, 2014, no. 9, pp. 65–69 (in Russian).
10. Levin L. Y., Semin M. A., Parshakov O. S. Mathematical Prediction of Frozen Wall Thickness in Shaft Sinking. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, iss. 5, pp. 938–944. <https://doi.org/10.1134/S1062739117052970>
11. Levin L. Yu., Kolesov E. V., Semin M. A. Dynamics of ice wall under conditions of damaged freezing pipes when shaft sinking. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2016, no. 11, pp. 257–265 (in Russian).
12. Levin L. Yu., Syomin M. A., Parshakov O. S., Kolesov E. V. Method for solving inverse Stefan problem to control ice wall state during shaft excavation. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 255–267. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.3.6>
13. Iudin M. M. Safety provision of bore stability during defrosting of ice barrier. *Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Yakutsk State University], 2009, vol. 6, no. 1, pp. 46–51 (in Russian).

Информация об авторах

Витязь Петр Александрович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель аппарата Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Головатый Иван Иванович – генеральный директор ОАО «Беларускалий» (ул. Коржа, 5, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: belaruskali.office@kali.by

Прушак Виктор Яковлевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: ipr@sipr.by

Диулин Денис Александрович – генеральный директор, ОАО «Трест Шахтоспецстрой» (Солигорск-4, 223710, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: trest@shahta.by

Information about the authors

Pyotr A. Vitiaz – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Academy Staff of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Ivan I. Golovaty – General Director, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: belaruskali.office@kali.by

Victor Y. Prushak – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ipr@sipr.by

Denis A. Diulin – Director General, JSC “Trest Shahtospetsstroy” (223710, Soligorsk-4, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: trest@shahta.by

А. В. Кузьмин, А. В. Радкевич, В. П. Петрушкевич, Н. Д. Кузьмина

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Беларусь*

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА ПЕРСОНАЛ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУНКТА ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПЕРЕДВИЖНОЙ АЭС «ПАМИР-630Д»

Аннотация. Выполнен вероятностный анализ дозовых нагрузок для количественного определения относительной важности вкладов неопределенностей исходных данных в неопределенность оценок коллективной и максимальной индивидуальной доз персонала при выводе из эксплуатации пункта хранения. Вероятностный подход к анализу дозовых нагрузок, включающий анализ чувствительности и неопределенности по отношению к входным параметрам используемых расчетных моделей оценки доз, позволяет определить наиболее чувствительные параметры, неточности в задании которых приводят к значительным неопределенностям оценок дозовых нагрузок на персонал и, таким образом, требуют более точного определения консервативных граничных значений при детерминистическом анализе и обосновании безопасности. Расчеты выполнены посредством применения кода RESRAD-BUILD 3.50, разработанного в Аргоннской национальной лаборатории Министерства энергетики США. Полученные результаты позволяют ранжировать параметры расчетной модели по степени их влияния на неопределенность итоговых оценок дозовых нагрузок на персонал, выработать рекомендации по оптимизации дозовых нагрузок при выполнении радиационно-опасных работ по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, вероятностный анализ, дозовые нагрузки на персонал, отработавшее ядерное топливо, вывод из эксплуатации, неопределенности, радиационно-опасные работы

Для цитирования: Вероятностный анализ дозовых нагрузок на персонал при выводе из эксплуатации пункта хранения отработавшего ядерного топлива передвижной АЭС «Памир-630Д» / А. В. Кузьмин [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 374–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-374-384>

A. V. Kuzmin, A. V. Radkevich, V. P. Petrushkevich, N. D. Kuzmina

Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus

PROBABILISTIC DOSE ASSESSMENT FOR PERSONNEL DURING DECOMMISSIONING OF SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY OF TRANSPORTABLE NPP “PAMIR 630D”

Abstract. The aim of the current work is to perform a probabilistic dose assessment to quantify the relative importance of the source data uncertainties contribution towards the uncertainty estimates of collective and maximum individual doses of personnel during decommissioning of a storage facility. A probabilistic approach to the analysis of dose loads, including the analysis of sensitivity and uncertainty with respect to the input parameters of the used calculation models of dose assessment, allows to determine the most sensitive parameters, inaccuracies in the task of which lead to significant uncertainties in the estimates of dose loads on personnel and, therefore, require more accurate determination of conservative boundary values in deterministic analysis and safety justification. The calculations were performed by applying the code RESRAD-BUILD 3.50, developed by the Argonne National Laboratory of the US Department of Energy. The obtained results allow us to rank the parameters of the computational model according to the degree of their influence on the uncertainty of the final estimates of the dose loads on personnel, to develop recommendations for optimizing dose loads when performing radiation-hazardous work during nuclear facilities decommissioning.

Keywords: risk-based approach, probabilistic analysis, dose loads on personnel, spent nuclear fuel, decommissioning, uncertainties, radiation hazardous work

For citation: Kuzmin A. V., Radkevich A. V., Petrushkevich V. P., Kuzmina N. D. Probabilistic dose assessment for personnel during decommissioning of spent nuclear fuel storage facility of transportable NPP “Pamir-630D”. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 374–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-374-384>

Введение. Подготовка к выводу из эксплуатации и вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии представляют собой длительный по времени процесс с большим объемом работ по выполнению комплекса организационных, технических и гигиенических мероприятий, направленных на последовательное обеспечение ядерной и радиационной безопасности персонала и населения и охрану окружающей среды. Радиационный контроль при выводе из эксплуатации характеризуется наличием большого количества источников ионизирующего излучения, а также значительным объемом проводимых радиационно-опасных работ. Среди мер, направленных на снижение дозовых нагрузок персонала, значимое место занимает планирование организации радиационно-опасных работ, последующий анализ эффективности запланированных защитных мероприятий с разработкой соответствующих рекомендаций по дальнейшему улучшению условий труда [1].

В государственном научном учреждении «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси в 2018 г. успешно осуществлен вывод из эксплуатации пункта хранения отработавшего ядерного топлива передвижной АЭС «Памир-630Д». Вывод включал ряд радиационно-опасных работ, для выполнения которых требовалось проведение оценки возникающих рисков с целью обеспечения безопасности.

В данной работе с целью количественного определения относительной важности вкладов неопределенностей исходных данных в неопределенность оценок коллективной и максимальной индивидуальной доз персонала при выводе из эксплуатации пункта хранения отработавшего ядерного топлива выполнен вероятностный анализ дозовых нагрузок на персонал. Полученные результаты позволили провести ранжирование параметров расчетной модели по степени их влияния на неопределенность итоговых оценок дозовых нагрузок на персонал и выработать рекомендации по оптимизации дозовых нагрузок при выполнении радиационно-опасных работ по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности деятельности в области использования атомной энергии. Риск качественно можно определить как сочетание вероятности нежелательных событий и величины их негативных последствий, имеющее количественную меру. Процесс принятия решений и управления в области обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии в рамках риск-ориентированного подхода рассмотрен в докладе Международной группы по ядерной безопасности INSAG-25 [2]. Методология этого подхода используется применительно к безопасной эксплуатации атомных электростанций и активно развивается для обеспечения физической безопасности АЭС и объектов ядерного топливного цикла. Несмотря на применимость указанной методологии к другим ядерным и неядерным установкам и деятельности, в настоящее время недостаточное внимание уделено применению риск-ориентированного подхода к исследовательским ядерным установкам, радиационно-опасным объектам, деятельности, связанной с обращением с радиоактивными отходами, выводом из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Отдельной проблемой является комплексное рассмотрение вопросов обеспечения безопасности при совместном функционировании различных ядерных и радиационных объектов, размещенных в пределах одной площадки и использующих единую обеспечивающую, инженерную, информационную и организационную инфраструктуру. Это неизбежно сопряжено с определенным конфликтом интересов, влияние которого на обеспечение безопасности деятельности в целом на площадке должно быть исключено.

Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности и принятию решений в этой области представляет собой систематический процесс учета основных факторов и соображений, важных для безопасности, с определением меры их влияния на принимаемые решения и деятельность по обеспечению безопасности, включая документирование всего процесса, обоснование веса каждого учитываемого фактора, осуществление контроля и принятие корректирующих мер.

Цель реализации риск-ориентированного подхода заключается в том, чтобы принятию решений, влияющих на безопасность персонала, населения, окружающую среду, уделялось внимание

соразмерно их значимости, при этом обеспечивался надлежащий учет всех существенных факторов и соображений, исключались противоречия с другими решениями.

Основными принципами, лежащими в основе риск-ориентированного подхода к обеспечению безопасности любой деятельности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения, являются:

обеспечение и поддержание надлежащего уровня глубокоэшелонированной защиты;

наличие и сохранение запасов безопасности;

удержания рисков на разумно достижимом на практике низком уровне (принцип ALARA);

документирование и учет наилучшей инженерной, эксплуатационной и организационной практики;

изучение и использование новейших результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, передовых разработок и современных методологий;

интеграция систем обеспечения ядерной, радиационной, промышленной, пожарной безопасности и физической защиты объектов;

соблюдение регулирующих требований и положений;

комплексный контроль за обеспечением безопасности;

поддержание высокого уровня культуры безопасности.

К преимуществам реализации риск-ориентированного подхода относятся:

повышение общего уровня безопасности за счет улучшенного понимания значения и степени важности каждого из факторов, влияющих на принятие решений и их практическую реализацию;

снижение дозовых нагрузок на персонал благодаря выявлению участков работ наиболее значимых с точки зрения риска и сокращения излишней деятельности во вредных условиях труда на менее значимых участках;

повышение эффективности использования всех видов ресурсов за счет ранжирования по значимости с точки зрения снижения риска и поддержания его на разумно достижимом низком уровне;

разработка и внедрение мер по предотвращению и управлению авариями, минимизации их последствий.

Вероятностный анализ, используемый в рамках риск-информативного подхода, применяется для оценки неопределенностей дозовых нагрузок на персонал при выполнении радиационно-опасных работ. Вероятностный подход к анализу дозовых нагрузок, включающий анализ чувствительности и неопределенности по отношению к входным параметрам используемых расчетных моделей оценки доз, позволяет определить наиболее чувствительные параметры, неточности в задании которых приводят к значительным неопределенностям оценок дозовых нагрузок на персонал и, таким образом, требуют более точного определения консервативных граничных значений при детерминистическом анализе и обосновании безопасности. Результаты вероятностного анализа доз позволяют оценить целесообразность затрат на получение дополнительных уточненных исходных данных, оптимизировать дозовые нагрузки на персонал при выполнении радиационно-опасных работ по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Основные результаты. При выводе из эксплуатации пункта хранения отработавшего ядерного топлива передвижной АЭС «Памир-630Д» основными радиационно-опасными работами являлись проведение комплексного инженерно-радиационного обследования, дезактивация бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива, демонтаж загрязненного оборудования, переработка и кондиционирование жидких и твердых радиоактивных отходов сложного радиохимического состава, содержащих изотопы плутония и америция. За основу модели расчета дозовых нагрузок персонала взят сценарий проведения работ в загрязненном здании, описанный в документах NUREG/CR-5512 [3, 4], NUREG/CR-6755 [5]. Расчеты выполнены посредством верифицированного кода RESRAD-BUILD 3.50 [6].

На основании результатов комплексного инженерно-радиационного обследования бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива передвижной атомной электростанции «Памир-630Д»

определены нуклиды, формирующие дозовую нагрузку персонала при выполнении работ по выводу из эксплуатации: Am-241, Pu-239, Pu-240, Co-60, Cs-137, Eu-152, Eu-154.

Предварительные расчеты показали, что работами, определяющими дозовую нагрузку на персонал, являлись переработка и кондиционирование жидких радиоактивных отходов сложного радиохимического состава, содержащих Am-241 и изотопы плутония Pu-239, Pu-240. Установленное в проекте вывода из эксплуатации целевое значение индивидуальной эффективной дозы для персонала составляло 5 мЗв.

Вероятностный анализ дозовых нагрузок на персонал при переработке и кондиционировании жидких радиоактивных отходов сложного радиохимического состава, содержащих америций и плутоний, выполнен посредством использования разработанной расчетной модели и применения кода RESRAD-BUILD 3.50 [6] с встроенными программными средствами анализа чувствительности, неопределенности и статистической обработки результатов расчета. Учитывались пять путей облучения: внешнее облучение непосредственно от источников, внешнее облучение за счет осажденных на поверхности радиоактивных материалов, внешнее облучение за счет радиоактивных веществ, взвешенных в воздухе, ингаляционный и пероральный пути внутреннего облучения. В разработанной расчетной модели принимаются во внимание время облучения как отдельных работников, так и всего задействованного персонала в целом, механизмы осаждения и ресуспендирования радиоактивных аэрозолей в помещениях пункта хранения, интенсивность воздухообмена в них, метаболизм человека, наличие защитных средств органов дыхания, ослабление излучения в элементах радиационной защиты и конструкциях установок, характеристики радиоактивных загрязнений и источников излучения, геометрию облучения.

При расчетах дозовых нагрузок на персонал в случае внешнего облучения использовались дозовые коэффициенты библиотеки FGR-12 [7], ингаляционного и перорального внутреннего облучения – FGR-11 [8]. При оценке риска применялись факторы библиотеки FGR-13 Morbidity [9].

В ходе проведения вероятностного анализа дозовых нагрузок учтены рекомендации [5] по выбору распределений, характеризующих неопределенности параметров расчетной модели. Время выполнения работ, количество привлеченного персонала, геометрия помещений и установок, параметры, характеризующие воздухообмен и распространение радиоактивных аэрозолей, характеристики радиоактивных загрязнений и источников излучения приняты в соответствии с имеющейся фактической информацией об условиях проведения работ. Конкретные значения параметров расчетной модели и величин, определяющих вероятностные распределения указанных параметров, характеризующие их неопределенность, получены путем обобщения имеющихся данных в соответствии с техническими рекомендациями, изложенными в [3]. Посредством применения кода RESRAD-BUILD 3.50 был выполнен предварительный анализ чувствительности расчетного значения эффективной коллективной дозы персонала, задействованного в выполнении работ во вредных условиях при выводе из эксплуатации пункта хранения отработавшего ядерного топлива. Расчеты выполнялись в рамках усредненной поведенческой модели персонала, было оценено влияние 20 основных параметров расчетной модели на величину эффективной коллективной дозы персонала при работах по дезактивации бассейна выдержки. По результатам анализа выделена группа параметров, неопределенность задания которых в пределах точности расчетной модели оказывает значительное влияние на значение эффективной коллективной дозы.

Посредством применения вероятностных программных модулей кода RESRAD-BUILD 3.50 оценивались неопределенности значений коллективной эффективной дозы персонала как при выполнении отдельных видов радиационно-опасных работ, так и в целом неопределенность коллективной эффективной дозы персонала при выводе пункта хранения отработавшего ядерного топлива. Были рассчитаны вклады в коллективную эффективную дозу персонала и ее неопределенность от отдельных радионуклидов и по путям облучения. Статистическими методами определены частный коэффициент ранговой корреляции и нормированный частный коэффициент ранговой регрессии для основных параметров расчетной модели.

Основной вклад (более 95 %) в коллективную эффективную дозу в ходе выполнения работ по выводу пункта хранения из эксплуатации внесло внутреннее облучение изотопами Am-241, Pu-239 и Pu-240 при выполнении работ по переработке и кондиционированию жидких

радиоактивных отходов. Согласно расчетам, среднее значение коллективной дозы на персонал составило 2,68 чел.-мЗв. По численным оценкам стандартное отклонение коллективной эффективной дозы при переработке жидких радиоактивных отходов при учете неопределенностей параметров расчетной модели и их вероятностных распределений равно 3,92 чел.-мЗв, с вероятностью 95 % коллективная доза не превысила 9,09 чел.-мЗв. Вклад Am-241 в коллективную дозу составил примерно 51 %, Pu-239 – 32 %, Pu-240 – 17 %, доля, приходящаяся на все остальные радионуклиды, – менее 1 %. Дозовые нагрузки на персонал при проведении комплексного инженерно-радиационного обследования и дезактивации бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива, а также демонтаже загрязненного оборудования пункта хранения были значительно ниже референтного уровня индивидуальной эффективной дозы в 5 мЗв, установленного проектом. Детерминистическая консервативная оценка максимальной индивидуальной эффективной дозы показала, что она не превысила 1 мЗв и составила 0,91 мЗв.

Основными путями облучения персонала являлись ингаляционный, дающий около 90 % вклада в общую дозу, и пероральный, на который приходится примерно 10 %. Остальные пути облучения дают пренебрежимо малый вклад в коллективную дозу. Соответствующие оценки доз существенно зависят от ряда параметров, характеризующих эффективность использовавшихся средств индивидуальной защиты, условий облучения, включая поведенческую модель, и характеристик радиоактивного загрязнения. Полученные результаты вероятностного анализа дозовых нагрузок позволяют ранжировать параметры модели по степени значимости с точки зрения влияния на коллективную эффективную дозу персонала. В качестве количественных параметров оценки значимости были приняты частный коэффициент ранговой корреляции и нормированный частный коэффициент ранговой регрессии для основных параметров расчетной модели, которые позволяют оценить нелинейные связи в модели, абсолютный и относительный вклад параметров в итоговую коллективную дозу. Выполнены оценка неопределенности указанных коэффициентов, а также ранжирование основных параметров модели по степени значимости их вклада в итоговую неопределенность коллективной дозы (таблица). Неопределенности частного коэффициента ранговой корреляции и нормированного частного коэффициента ранговой регрессии равны одному стандартному отклонению, оцененному по выборке из 10 величин.

Установлено, что коэффициент детерминации модели равен 0,87, а зависимость коллективной дозы от параметров, не приведенных в таблице, незначительна. В свою очередь, точность задания их значений и соответствующих неопределенностей не оказывает существенного влияния на величину оценки среднего значения коллективной дозы и ее неопределенности.

С учетом факторов, оказывающих наибольшее воздействие на неопределенность оценки индивидуальных доз облучения, а также в связи с тем, что определяющий вклад в индивидуальные дозовые нагрузки по путям облучения (90 %) вносит поступление аэрозолей радионуклидов со вдыхаемым воздухом, на этапах комплексного инженерно-радиационного обследования и разработки проекта рекомендуется уделять особое внимание повышенной точности методов измере-

Ранжирование основных параметров модели по степени значимости их вклада в итоговую неопределенность коллективной дозы

Ranking of the main parameters of the model according to the degree of significance of their contribution to the total uncertainty of the collective dose

Наименование параметра	Частный ранговый коэффициент корреляции	Нормированный частный ранговый коэффициент регрессии	Ранг
Параметры, задающие фактическое время выполнения работ	1,00	1,00	1
Параметры, задающие активность изотопов в составе радиоактивного загрязнения	1,00	1,00	1
Частота воздухообмена	$-(0,88 \pm 0,01)$	$-(0,74 \pm 0,02)$	2
Время снятия радиоактивного загрязнения	$0,69 \pm 0,01$	$0,38 \pm 0,01$	3
Аэрозольная часть снимаемого радиоактивного загрязнения	$0,63 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,02$	4
Частота дыхания работника	$0,38 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,02$	5
Иные параметры	$< 0,25$	$< 0,15$	–

ния удельной активности основных дозообразующих изотопов плутония и америция; повышенной точности методик определения доли снимаемого поверхностного загрязнения; расчетному обоснованию технических характеристик систем вентиляции помещений с учетом проводимых работ, а также повышению надежности указанных систем; применению методов дезактивации, минимизирующих образование аэрозольных частиц и трудозатраты персонала.

На этапе проведения работ по выводу из эксплуатации на первое место по важности выходят организационно-технические мероприятия, минимизирующие количество работников и время проведения радиационно-опасных работ по дезактивации; организационно-технические мероприятия по недопущению необоснованного прямого перорального поступления радионуклидов при выполнении дезактивационных работ (контроль за соблюдением персоналом требований радиационной безопасности и технологии производства работ); использование современных высококачественных средств индивидуальной защиты органов дыхания (респираторов, масок) снижающих вероятность аэрозольного поступления и практически исключают прямое пероральное поступление радионуклидов при выполнении работ по дезактивации; четкое планирование и контроль проведения работ по времени.

Заключение. В данной работе выполнен вероятностный анализ дозовых нагрузок для количественного определения относительной важности вкладов неопределенностей исходных данных в неопределенность оценок коллективной и максимальной индивидуальной доз персонала при выводе из эксплуатации пункта хранения отработавшего ядерного топлива передвижной АЭС «Памир-630Д». Полученные результаты позволили ранжировать параметры расчетной модели по степени их влияния на неопределенность итоговых оценок дозовых нагрузок на персонал, выработать рекомендации по оптимизации дозовых нагрузок при выполнении радиационно-опасных работ по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Расчеты выполнены посредством применения кода RESRAD-BUILD 3.50, разработанного в Аргоннской национальной лаборатории Министерства энергетики США. Указанные подходы применимы для других объектов использования атомной энергии.

Список использованных источников

1. Вывод из эксплуатации установок. Общие требования безопасности, часть 6 [Электронный ресурс]. – Вена: МАГАТЭ, 2015. – Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1652r_web.pdf – Дата доступа: 10.02.2019.
2. Структура процесса принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода INSAG-25 [Электронный ресурс]: Доклад Международной группы по ядерной безопасности. – Вена: МАГАТЭ, 2014. – Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1499r_web.pdf – Дата доступа: 1.02.2019.
3. Residual Radioactive Contamination From Decommissioning. Technical Basis for Translating Contamination Levels to Annual Total Effective Dose Equivalent [Electronic resource]: NUREG/CR-5512, PNL-7994, vol. 1 / U. S. Nuclear Regulatory Commission. – Mode of access: <https://www.nrc.gov/docs/ML0522/ML052220317.pdf> – Date of access: 19.11.2018.
4. Residual Radioactive Contamination From Decommissioning. Parameter Analysis [Electronic resource]: NUREG/CR-5512, SAND99-2148, vol. 3 / U. S. Nuclear Regulatory Commission. – Mode of access: <https://www.nrc.gov/docs/ML0824/ML082460902.pdf> – Date of access: 19.11.2018.
5. Technical Basis for Calculating Radiation Doses for the Building Occupancy Scenario Using the Probabilistic [Electronic resource]: ESRAD-BUILD 3.0 Code, NUREG/CR-6755. ANL/EAD/TM/02-1. – Mode of access: <https://www.nrc.gov/docs/ML0205/ML020590035.pdf> – Date of access: 19.11.2018.
6. User's Manual for RESRAD-BUILD Version 3 [Electronic resource]: ANL/EAD/03-1 / Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory. – Mode of access: <http://resrad.evs.anl.gov/docs/ANL-EAD-03-1.pdf> – Date of access: 19.11.2018.
7. Eckerman, K. F. External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil [Electronic resource]: Federal Guidance Report No. 12, EPA-402-R-93-081 / K. F. Eckerman, J. C. Ryman. – Mode of access: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-93-081.pdf> – Date of access: 19.11.2018.
8. Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion [Electronic resource]: Federal Guidance Report No. 11, EPA-520-1-88-020. – Mode of access: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/520-1-88-020.pdf> – Date of access: 19.11.2018.
9. Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides [Electronic resource]: Federal Guidance Report No. 13, EPA-402-R-99-001. – Mode of access: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-99-001.pdf> – Date of access: 19.11.2018.

References

1. *Decommissioning installations. General safety requirements, № GSR Part 6*. Vena, IAEA, 2015. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1652r_web.pdf (accessed 10 February 2019) (in Russian).
2. *The structure of the decision-making process based on the integrated risk-based approach INSAG-25. Report of the International Nuclear Safety Group*. Vena, IAEA, 2014. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1499r_web.pdf (accessed 1 February 2019) (in Russian).
3. *Residual Radioactive Contamination From Decommissioning. Technical Basis for Translating Contamination Levels to Annual Total Effective Dose Equivalent*. NUREG/CR-5512, PNL-7994, vol. 1. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML0522/ML052220317.pdf> (accessed 19 November 2018).
4. *Residual Radioactive Contamination From Decommissioning. Parameter Analysis*. NUREG/CR-5512, SAND99-2148, vol. 3. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML0824/ML082460902.pdf> (accessed 19 November 2018).
5. *Technical Basis for Calculating Radiation Doses for the Building Occupancy Scenario Using the Probabilistic ESRAD-BUILD 3.0 Code*. NUREG/CR-6755. ANL/EAD/TM/02-1. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML0205/ML020590035.pdf> (accessed 19 November 2018).
6. Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory. *User's Manual for RESRAD-BUILD Version 3*. ANL/EAD/03-1. Available at: <http://resrad.evs.anl.gov/docs/ANL-EAD-03-1.pdf> (accessed 19 February 2019).
7. Eckerman K. F., Ryman J. C. *External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil: Federal Guidance Report No. 12*. EPA-402-R-93-081. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-93-081.pdf> (accessed 19 February 2019).
8. *Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion: Federal Guidance Report No. 11*. EPA-520-1-88-020. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/520-1-88-020.pdf> (accessed 19 February 2019).
9. *Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides: Federal Guidance Report No. 13*. EPA-402-R-99-001. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-99-001.pdf> (accessed 19 February 2019).

Информация об авторах

Кузьмин Андрей Владимирович – кандидат физико-математических наук, генеральный директор, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: avkuzmin@sosny.bas-net.by

Радкевич Артем Валерьянович – ученый секретарь, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: radkevich@sosny.bas-net.by

Петрушкевич Владимир Петрович – заведующий отделом эксплуатации технологических систем пункта хранения и хранилищ ИИИ и РАО, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vl.petr@sosny.bas-net.by

Кузьмина Наталья Дмитриевна – старший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Andrei V. Kuzmin – Ph. D. (Physics and Mathematics), Director General, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: avkuzmin@sosny.bas-net.by

Artyom V. Radkevich – Scientific Secretary, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: radkevich@sosny.bas-net.by

Vladimir P. Petrushkevich – Head of the Department of Operation of Technological Systems of Storage Facilities and Storage Facilities for Radiation Sources and Radioactive Waste, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vl.petr@sosny.bas-net.by

Natallia D. Kuzmina – Senior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by