

ТОМ 7, №2, 2023

eISSN 2541-9129

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная
безопасность /
Technosphere Safety

Машиностроение /
Machine Building

Химические технологии,
науки о материалах,
металлургия / Chemical
Technologies, Materials
Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129



Безопасность техногенных и природных систем

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2017 года)

eISSN 2541-9129

DOI: 10.23947/2541-9129

Том 7, № 2, 2023

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

- 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
- 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
- 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
- 2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
- 2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
- 2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
- 2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

Индексация: РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ

Наименование органа, зарегистрировавшего издание Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ).

Периодичность 4 выпуска в год

Адрес учредителя и издателя 344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

E-mail vestnik@donstu.ru

Телефон +7 (863) 2–738–372

Сайт <https://bps-journal.ru>

Дата выхода в свет 30.05.2023





Safety of Technogenic and Natural Systems

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2017)

eISSN 2541-9129

DOI: 10.23947/2541-9129

Vol. 7, no. 2, 2023

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The journal publishes articles in the following fields of science:

Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
Materials Science (Engineering Sciences)
Fire Safety (Engineering Sciences)
Environmental Safety (Engineering Sciences)
Occupational Safety (Engineering Sciences)

<i>Indexing:</i>	RSCI, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ
<i>Name of the body that registered the publication</i>	Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 dated July, 21, 2016, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
<i>Founder and publisher</i>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU).
<i>Periodicity</i>	Quarterly (4 issues per year)
<i>Address of the founder and publisher</i>	Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
<i>E-mail</i>	vestnik@donstu.ru
<i>Telephone</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Website</i>	https://bps-journal.ru
<i>Date of publication</i>	30.05.2023



Редакционная коллегия:

Главный редактор — Б. Ч. Месхи, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

заместитель главного редактора — А. А. Короткий, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

заместитель главного редактора — В. Н. Азаров, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация);

выпускающий редактор — М. Г. Комахидзе, кандидат химических наук, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

ответственный секретарь — Г. Ш. Хазанович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

ответственный секретарь — Н.А. Шевченко, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

Наиль Х. Абдрахманов, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация);

Екатерина В. Агеева, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация);

Евгений В. Агеев, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация);

Александр П. Амосов, доктор физико-математических наук, профессор, Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация);

Наталья И. Баурова, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Российская Федерация);

Вадим И. Беспалов, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Юрий И. Булыгин, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Элеонора Ю. Воронова, доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация);

Владимир Л. Гапонов, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Оксана С. Гурова, доктор технических наук, доцент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Виктор О. Гутаревич, доктор технических наук, доцент, Донецкий национальный технический университет (Донецк, Донецкая Народная Республика);

Владислав Б. Деев, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация);

Виктор В. Дерюшев, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Владимир Ю. Дорофеев, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация);

Сергей Н. Егоров, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация);

Жанна В. Еремеева, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация);

Вячеслав Г. Копченков, доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация);

Александр В. Лагереv, доктор технических наук, профессор, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация);

Игорь А. Лагереv, доктор технических наук, доцент, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация);

Константин П. Манжула, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербургский, Российская Федерация);

Надежда В. Мензелинцева, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация);

Всеволод А. Минко, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация);

Владимир В. Москвичев, доктор технических наук, профессор, Красноярский филиал Федерального исследовательского центра «Информационных и вычислительных технологий» (Красноярск, Российская Федерация);

Алексей С. Носенко, доктор технических наук, профессор, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация);

Михаил С. Плешко, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС (Москва, Российская Федерация);

Виктор Н. Пустовойт, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Сергей Л. Пушенко, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Александр А. Порошин, доктор технических наук, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Российская Федерация);

Борис В. Севастьянов, доктор технических наук, кандидат педагогических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация);

Александр П. Тюрин, доктор технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация);

Ильдар Ф. Хафизов, доктор технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация);

Фаниль Ш. Хафизов, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация);

Александр Н. Чукарин, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

Editorial Board

Editor-in-Chief — **Besarion Ch Meskhi**, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Deputy chief editor — **Anatoliy A Korotkiy**, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Deputy chief editor — **Valery N Azarov**, Dr.Sci. (Eng.), professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation);

Executive editor — **Manana G Komakhidze**, Cand.Sci. (Chemistry), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Executive secretary — **Grigoriy Sh Khazanovich**, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Executive secretary — **Nadezhda A Shevchenko**, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Nail Kh Abdrakhmanov, Dr.Sci. (Eng.), professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation);

Ekaterina V Ageeva, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation);

Evgeniy V Ageev, Dr.Sci. (Eng.), professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation);

Aleksandr P Amosov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, Samara State Technical University (Samara, Russian Federation);

Natalya I Baurova, Dr.Sci. (Eng.), professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (Moscow, Russian Federation);

Vadim I Bespalov, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Yuriy I Bulygin, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Eleonora Yu Voronova, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platov (Shakhty, Russian Federation);

Vladimir L Gaponov, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Oksana S Gurova, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Viktor O Gutarevich, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, Donetsk National Technical University (Donetsk, Donetsk People's Republic);

Vladislav B Deev, Dr.Sci. (Eng.), professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation);

Viktor V Deryushev, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Vladimir Yu Dorofeev, Dr.Sci. (Eng.), professor, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation);

Sergey N. Egorov, Dr.Sci. (Eng.), South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation);

Zhanna V Eremeeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation);

Vyacheslav G Kopchenkov, Dr.Sci. (Eng.), professor, North-Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation);

Aleksandr V Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation);

Igor A Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation);

Konstantin P Manzhula, Dr.Sci. (Eng.), professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation);

Nadezhda V Menzelintseva, Dr.Sci. (Eng.), professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation);

Vsevolod A Minko, Dr.Sci. (Eng.), professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation);

Vladimir V Moskvichev, Dr.Sci. (Eng.), professor, Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation);

Aleksey S Nosenko, Dr.Sci. (Eng.), professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platova (Shakhty, Russian Federation);

Mikhail S Pleshko, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation);

Viktor N Pustovoi, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Sergey L Pushenko, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Aleksandr A Poroshin, Dr.Sci. (Eng.), All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation);

Boris V Sevastyanov, Dr.Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Pedagog.), professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation);

Aleksandr P Tyurin, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation);

Ildar F Hafizov, Dr.Sci. (Eng.), associate professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation);

Fanil Sh Hafizov, Dr.Sci. (Eng.) professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation);

Aleksandr N Chukarin, Dr.Sci. (Eng.), professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Содержание

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Оценка влияния процессов нефтедобычи на здоровье населения нефтедобывающих районов Иркутской области	7
<i>Е.А. Хамидуллина В.В. Васильева</i>	
Разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки	17
<i>А.П. Тюрин., И.М. Янников</i>	
Обоснование необходимости использования службы радиационной и химической защиты в составе специализированных пожарно-спасательных частей в субъектах Российской Федерации	27
<i>В.А. Маштаков, Е.В. Бобринев, Е.Ю. Удавцова, А.А. Кондашов, Е.С. Трецин</i>	
Огнестойкость строительного элемента с интумесцентной огнезащитой: стандартная оценка и экспресс-анализ	38
<i>А.В. Мартынов, В.В. Греков, О.В. Попова</i>	
К вопросу оценки уровней шумовых и вибрационных воздействий на работников промышленных предприятий Республики Казахстан	47
<i>Р.Б. Ширванов И.К. Жумагалиев</i>	
Оценка безопасности производственных объектов по предельным значениям безотказности машин	58
<i>В.В. Дерюшев, С.В. Теплякова, М.М. Зайцева</i>	

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Влияние компетенций специалистов грузоподъемных кранов на вероятность возникновения аварийных ситуаций	70
<i>В.В. Егельский, Н.Н. Николаев, Е.В. Егельская, А.А. Короткий</i>	

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Инженерно-физический метод определения теплопроводности объектов микрометрической толщины со сложной структурой	80
<i>О.В. Кудряков, В.Н. Варавка, Л.П. Арефьева</i>	
Влияние содержания углерода на формирование контактной межчастичной поверхности при горячей допрессовке	90
<i>М.С. Егоров, Р.В. Егорова, М.В. Ковтун</i>	
Влияние текстурных эффектов на работоспособность лазерно-облученного инструмента	102
<i>Г.И. Бровер, Е.Е. Щербакова</i>	

Contents

TECHNOSPHERE SAFETY

Assessment of the Impact of Oil Production Processes on the Health of the Population of Oil-Producing Areas of the Irkutsk Region.....	7
<i>EA Khamidullina, VV Vasileva</i>	
Development of an Approach to Assess the Consequences of Fuel-Air Mixtures Explosions Taking into Account the Development Features	17
<i>AP Tyurin, IM Yannikov</i>	
Justification of the Need to Use the Radiation and Chemical Protection Service as Part of Special Fire and Rescue Units in the Subjects of the Russian Federation	27
<i>VA Mashtakov, EV Bobrinev, EYu Udavtsova, AA Kondashov, ES Treshchin</i>	
Fire Resistance of a Building Element with Intumescent Fire Protection: Standard Assessment and Express Analysis	38
<i>AV Martynov, VV. Grekov, OV. Popova</i>	
On the Issue of Assessing the Levels of Noise and Vibration Impacts on Workers of Industrial Enterprises of the Republic of Kazakhstan	47
<i>RB. Shirvanov, IK. Zhumagaliyev</i>	
Production Facilities Safety Assessment According to the Maximum Values of Machines Reliability	58
<i>VV. Deryushev, SV. Teplyakova, MM. Zaitseva</i>	

MACHINE BUILDING

Influence of the Competencies of Lifting Crane Specialists on the Probability of Emergencies.....	70
<i>VV Egelsky, NN. Nikolaev, EV Egelskaya, AA. Korotkiy</i>	

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

Engineering-Physical Method for Determining the Thermal Conductivity of Objects with Micrometric Thickness and a Complex Structure	80
<i>OV Kudryakov, VN Varavka, LP Arefeva</i>	
Influence of Carbon Content on the Formation of a Contact Interparticle Surface during Hot Post-Pressing.....	90
<i>MS Egorov, RV Egorova, MV Kovtun</i>	
Influence of Texture Effects on the Laser-Irradiated Tool Performance	102
<i>GI. Brover, EE. Shcherbakova</i>	

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.75.05

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-7-16>

Оценка влияния процессов нефтедобычи на здоровье населения нефтедобывающих районов Иркутской области

Е.А. Хамидуллина , В.В. Васильева Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83✉ elena.irk@mail.ru

Аннотация

Введение. Состояние здоровья населения зависит от эколого-гигиенического благополучия территории. В местах с развитой нефтедобычей происходит длительное воздействие загрязняющих веществ на организм человека, что в итоге влечет за собой возникновение различных заболеваний. Об этом свидетельствуют отечественные и зарубежные исследования. На территории Иркутской области такие исследования не проводились. Поэтому целью данной работы являлась оценка влияния процессов нефтедобычи на заболеваемость населения нефтедобывающих районов Иркутской области.

Материалы и методы. Исходными материалами послужили статистические показатели общей и первичной заболеваемости населения Иркутской области за период с 2016 по 2019 годы, размещенные на сайте медицинской статистики. В расчете неканцерогенного риска использовали данные экологического мониторинга нефтедобывающей компании по среднесуточным концентрациям загрязняющих веществ в районах нефтедобычи.

Результаты исследования. Показано, что районы нефтедобычи отличаются крайне высокими показателями заболеваемости со стороны систем органов дыхания, кровообращения, пищеварения, мочевого выделения, костно-мышечной системы, а также по патологиях внутриутробного развития плода, при родах и в послеродовом периоде. Показатели младенческой смертности на данных территориях почти в четыре раза превышают соответствующие средние показатели по Иркутской области. Расчет неканцерогенного риска также показал превышение над принятыми в России допустимыми значениями.

Обсуждение и заключения. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о неблагоприятной медико-демографической ситуации на обсуждаемых территориях. Выраженное превышение заболеваемости по представленным группам болезней в районах нефтепромысла, по сравнению с территориями, взятыми для сравнения, отражает возможное влияние загрязненности окружающей среды на здоровье населения. Показана связь роста младенческой смертности с началом промышленного освоения углеводородных месторождений этих мест. Вклад нефтедобывающих компаний в социально-экономическое развитие регионов, включая финансирование медицинской помощи населению, могло бы частично компенсировать негативное влияние промышленных процессов.

Ключевые слова: нефтедобыча, здоровье населения, общая и первичная заболеваемость, неканцерогенный риск.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность заведующей, а также сотрудникам кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Иркутского национального исследовательского технического университета за помощь и поддержку, оказанную при выполнении данной работы.

Для цитирования. Хамидуллина Е.А., Васильева В.В. Оценка влияния процессов нефтедобычи на здоровье населения нефтедобывающих районов Иркутской области. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(2):7–16. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-7-16>

Assessment of the Impact of Oil Production Processes on the Health of the Population of Oil-Producing Areas of the Irkutsk Region

Elena A Khamidullina  , Viktoriya V Vasileva 

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontova Street, Irkutsk, Russian Federation

 elena.irk.mail@list.ru

Abstract

Introduction. The state of the population health depends on the ecological and hygienic well-being of the territory. In places with developed oil production, there is a long-term impact of pollutants on the human body and, as a result, corresponding diseases develop. This is evidenced by numerous domestic and foreign studies, but the territory of the Irkutsk region is not covered by such studies. Therefore, the work objective is to assess the impact of oil production processes on the incidence of the population of oil-producing regions of the Irkutsk region.

Materials and Methods. The source materials were the statistical indicators of overall and primary disease incidence of the population of the regions of the Irkutsk region for the period from 2016 to 2019, posted on the website of medical statistics of the Irkutsk region. For the calculation of the non-carcinogenic risk, we have used environmental monitoring data from an oil-producing company based on average daily concentrations of pollutants in oil-producing areas.

Results. It is shown that oil-producing areas are characterized by extremely high incidence rates for such groups of diseases as respiratory diseases, diseases of the circulatory system, diseases of the musculoskeletal system, diseases of the digestive system, diseases of the genitourinary system, as well as deviations in pregnancy, childbirth and the postpartum period. Infant mortality rates in these territories are up to 4 times higher than the corresponding average indicators for the Irkutsk region as a whole. The calculation of non-carcinogenic risk showed an excess over the permissible values accepted in Russia.

Discussion and Conclusions. The results of the analysis testify to the unfavorable medical and demographic situation in the territories under discussion. The pronounced excess of the incidence rate for the presented groups of diseases in the oilfield areas in comparison with the territories taken for comparison reflects the possible impact of environmental pollution on the health of the population. A connection between the growth of infant mortality in the territories under consideration and the beginning of the industrial development of hydrocarbon deposits in these places has been revealed. The contribution of oil companies to the socio-economic development of the regions, including co-financing of medical care for the population, could partially offset the negative impact of industrial processes.

Keywords: oil production, public health, overall and primary disease incidence, non-carcinogenic risk.

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to the head, as well as to the staff of the Department of Industrial Ecology and Life Safety of Irkutsk National Research Technical University for the help and support provided in carrying out this work.

For citation. Khamidullina EA., Vasileva VV. Assessment of the Impact of Oil Production Processes on the Health of the Population of Oil-Producing Areas of the Irkutsk Region. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;(7)2:7–16. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-7-16>

Введение. Проблема влияния нефтедобычи на здоровье населения обсуждается на разных уровнях. Целый ряд исследований показывает негативное экологическое влияние нефтедобычи, отражающееся на здоровье населения [1–6].

Как отмечено в работе [1], в мире ежегодно добывается свыше 4 млрд. т сырой нефти. На каждом этапе (добыча, хранение, транспортировка) происходит загрязнение окружающей среды примерно 50 миллионами тонн нефти и нефтепродуктов. Каждый процесс (разведка, бурение, добыча, сбор, хранение, транспортировка нефти) при соответствующих условиях вносит изменение в первоначальное экологическое состояние района нефтедобычи. Считается, что наибольшее загрязнение окружающей среды происходит при аварийных выбросах и разливах [7, 8]. Однако проблема состоит в том, что вопрос использования попутного нефтяного газа остаётся нерешённым до конца. Интенсивно выделяются в окружающую среду продукты сгорания попутного нефтяного газа: сажа, бенз(а)пирен, аммиак, оксиды азота, диоксид серы, ароматические углеводороды, диоксины, несгоревшая нефть. Загрязняющие вещества усиливают свой токсический эффект при одновременном действии.

Состояние здоровья населения в большинстве случаев зависит от эколого-гигиенического благополучия территории. На территориях с развитой нефтедобычей происходит длительное воздействие вредных веществ на организм человека и, как итог, развиваются соответствующие заболевания, появляются патологии, возрастает риск

детской заболеваемости, врождённых пороков, выкидышей, мертворождений, онкологических заболеваний и заболеваний эндокринной, лёгочной, сердечно-сосудистой систем [9–14].

Целью данной работы является оценка влияния нефтедобычи на заболеваемость населения нефтедобывающих районов Иркутской области. Представляемая работа является продолжением исследований авторов в данной области [15].

Материалы и методы. Исходными материалами послужили статистические показатели общей и первичной заболеваемости населения регионов Иркутской области (Катангского, Киренского и Усть-Кутского районов) за период с 2016 по 2019 годы, размещенные на сайте медицинской статистики¹. Для сравнения в качестве фоновых использовали аналогичные показатели Казачинско-Ленского района Иркутской области и Иркутской области в целом. В расчете неканцерогенного риска обратились к данным экологического мониторинга нефтедобывающей компании по среднесуточным концентрациям загрязняющих веществ районов нефтедобычи².

Результаты исследования. Иркутская область богата полезными ископаемыми: уголь, железная руда, каменные и калийные соли, гидроминеральное сырье, золото, горно-рудное сырье, а также значительные запасы углеводородного сырья (оценка извлекаемых ресурсов нефти — 2050 млн. т³).

Добыча углеводородного сырья осуществляется на севере Иркутской области — это Катанский, Киренский и Усть-Кутский районы. Верхнечонское нефтегазоконденсатное месторождение расположено в Катанском районе Иркутской области, в верхнем течении реки Чона, в 1100 км от города Иркутск и в 420 км от г. Усть-Кут, является одним из крупнейших месторождений в Восточной Сибири⁴. Основные месторождения Усть-Кутского и Киренского районов — это Ярактинское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ), находящееся в 140 километрах от города Усть-Кут⁵; Даниловское НГКМ, располагающееся в Катанском районе (150 км от г. Киренск и 350 км от г. Усть-Кут); Марковское НГКМ названо по располагающему рядом селу Марково, в 100 км от г. Усть-Кут и в 60 км от города Киренск; Ичѣдинское нефтяное месторождение занимает территорию Киренского района; Аянский лицензионный участок недр расположен на территории Усть-Кутского, Киренского и Катангского районов в 40 км от г. Киренск⁶.

Показатели по динамике населения трех рассматриваемых районов представлены на рис. 1 и демонстрируют ситуацию демографической убыли населения за период 2012–2022 гг.⁷.

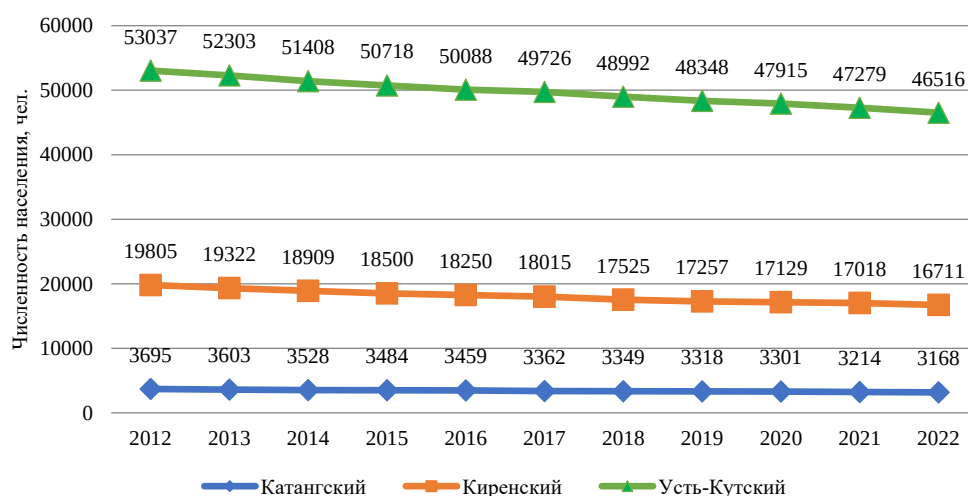


Рис. 1. Динамика численности населения Катангского, Киренского и Усть-Кутского районов Иркутской области

¹ Медицинская статистика. Министерство здравоохранения Иркутской области. URL: <https://miac-io.ru/uslugi-resheniya/meditsinskaya-statistika/> (дата обращения: 22.04.2023).

² Архив документов для участия в рейтинге экологической ответственности нефтегазовых компаний. Официальный сайт Иркутской нефтяной компании. URL: <https://irkutskoil.ru/sustainable-development/environmental-protection/arkhiv-dokumentov-dlya-uchastiya-v-reytinge/> (дата обращения: 21.04.2023).

³ Оценка извлекаемых ресурсов нефти. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Иркутская область. URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/regions/irkutskaya_oblast/ (дата обращения: 21.04.2023).

⁴ История. Официальный сайт Роснефть. URL: https://vcng.rosneft.ru/about/Glance/OperationalStructure/Dobicha_i_razrabotka/Vostochnaja_Sibir/vcng/ (дата обращения: 21.04.2023).

⁵ Ярактинское. Единый фонд геологической информации о недрах. URL: <https://efgi.ru/object/17579691?num=1> (дата обращения: 21.04.2023).

⁶ Главгосэкспертиза одобрила проект ИНК по строительству нефтегазопровода на Ичѣдинском месторождении. Официальный сайт Иркутской нефтяной компании. URL: <https://irkutskoil.ru/press-center/glavgosekspertiza-odobrila-proekt-ink-po-stroitelstvu-neftegazoprovoda-na-ichedinskom-mestorozhdenii/> (дата обращения: 21.04.2023).

⁷ Численность постоянного населения. Официальный сайт территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области. URL: <https://irkutskstat.gks.ru/> (дата обращения: 21.04.2023).

Здоровье населения определяется как образом жизни, так и социально-экономическими, наследственно-генетическими факторами, качеством окружающей среды и медицинского обслуживания [16].

Для оценки здоровья населения нефтедобывающих районов Иркутской области сравнили показатели заболеваемости (общей и первичной) Катангского, Киренского, Усть-Кутского районов с районом, близким по климату, но не содержащим объекты нефтедобычи — Казачинско-Ленским районом и показателями Иркутской области в целом. Казачинско-Ленский район граничит на севере с Киренским районом, на западе с Усть-Кутским и Жигаловским, а на юге — с Качугским районом. 85 % территории Казачинско-Ленского района занимает лесной массив, что обуславливает основные виды деятельности населения (лесозаготовка, лесопиление, деревопереработка).

Первоначально для исследования выделили группы заболеваний, имеющих наибольшее распространение в изучаемых нефтедобывающих районах. Для этого изучили показатели доступной статистики по общей заболеваемости за период с 2016 по 2019 годы. Одним из распространенных видов оказались заболевания органов дыхания. В Катангском районе зафиксировано наибольшее превышение показателя общей заболеваемости по данному виду над соответствующим показателем Казачинско-Ленского района и Иркутской области в целом. В некоторых случаях показатели были превышены в несколько раз, например, в 2016 году — почти в 5 раз, по сравнению с показателями в Казачинско-Ленском районе, и в 2,4 раза, по сравнению с показателями Иркутской области в целом.

На втором месте по распространенности оказались болезни системы кровообращения. По ним общая заболеваемость населения по 2018 году превысила в 2,1–2,4 раза в Катангском и Усть-Кутском районах соответственно показатели Казачинско-Ленского района и в 1,3 раза показатели по Иркутской области в целом. Затем следуют болезни костно-мышечной системы и органов пищеварения. Высокие по значению оказались и показатели по заболеваниям, возникающим в перинатальный период, и численности врожденных аномалий.

На диаграмме (рис. 2) представлены средние (за рассматриваемый период) показатели общей заболеваемости в нефтедобывающих районах Иркутской области и на территориях, взятых для сравнения.

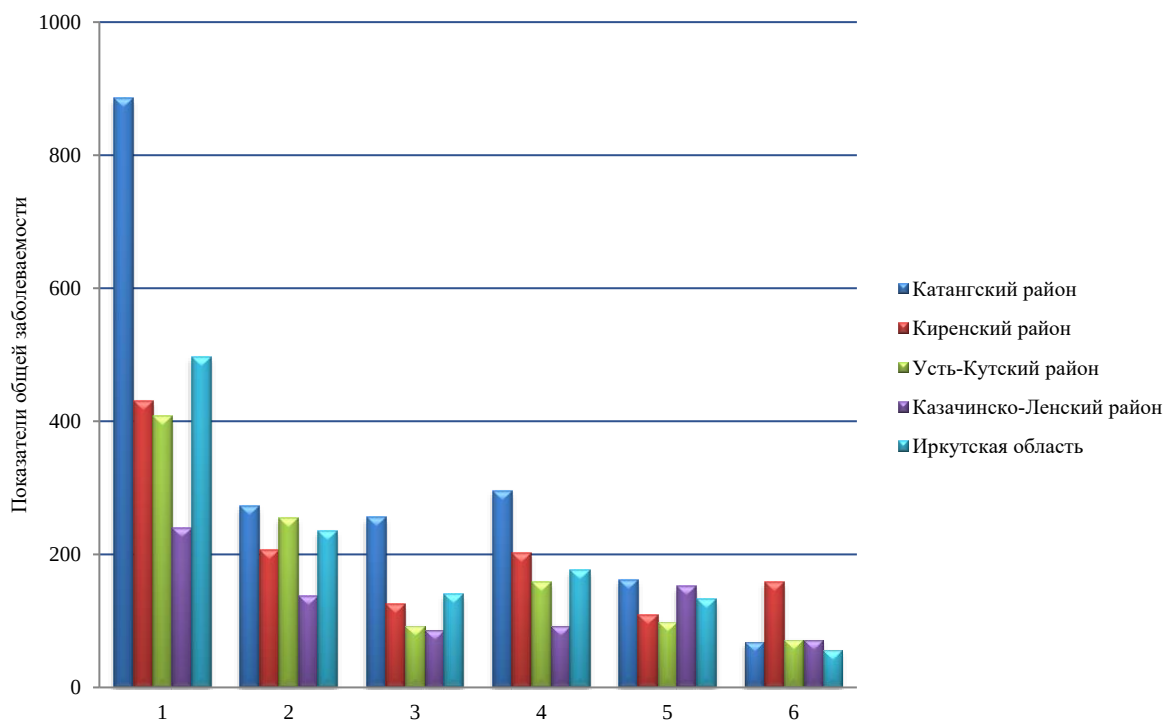


Рис. 2. Средние показатели общей заболеваемости населения нефтедобывающих районов Иркутской области в сравнении с Казачинско-Ленинским районом и Иркутской областью в целом. Представлены следующие категории болезней: 1 — органов дыхания; 2 — системы кровообращения; 3 — органов пищеварения; 4 — костно-мышечной системы; 5 — мочеполовой системы; 6 — патологии при беременности, родах и в послеродовой период

С гигиенической точки зрения воздействие факторов окружающей среды на жителей исследуемых районов проявляется преимущественно в показателе первичной заболеваемости, так как появление новых случаев заболеваний связано с интенсивностью воздействия загрязняющих веществ, содержащихся в среде обитания населения.

Сравнение показателей общей и первичной заболеваемости населения по выбранным территориям (рис. 3) свидетельствует о выраженном превышении заболеваемости по представленным группам болезней в районах нефтепромысла, по сравнению с территориями, взятыми для сравнения, что является отражением возможного влияния загрязненности окружающей среды на здоровье населения.

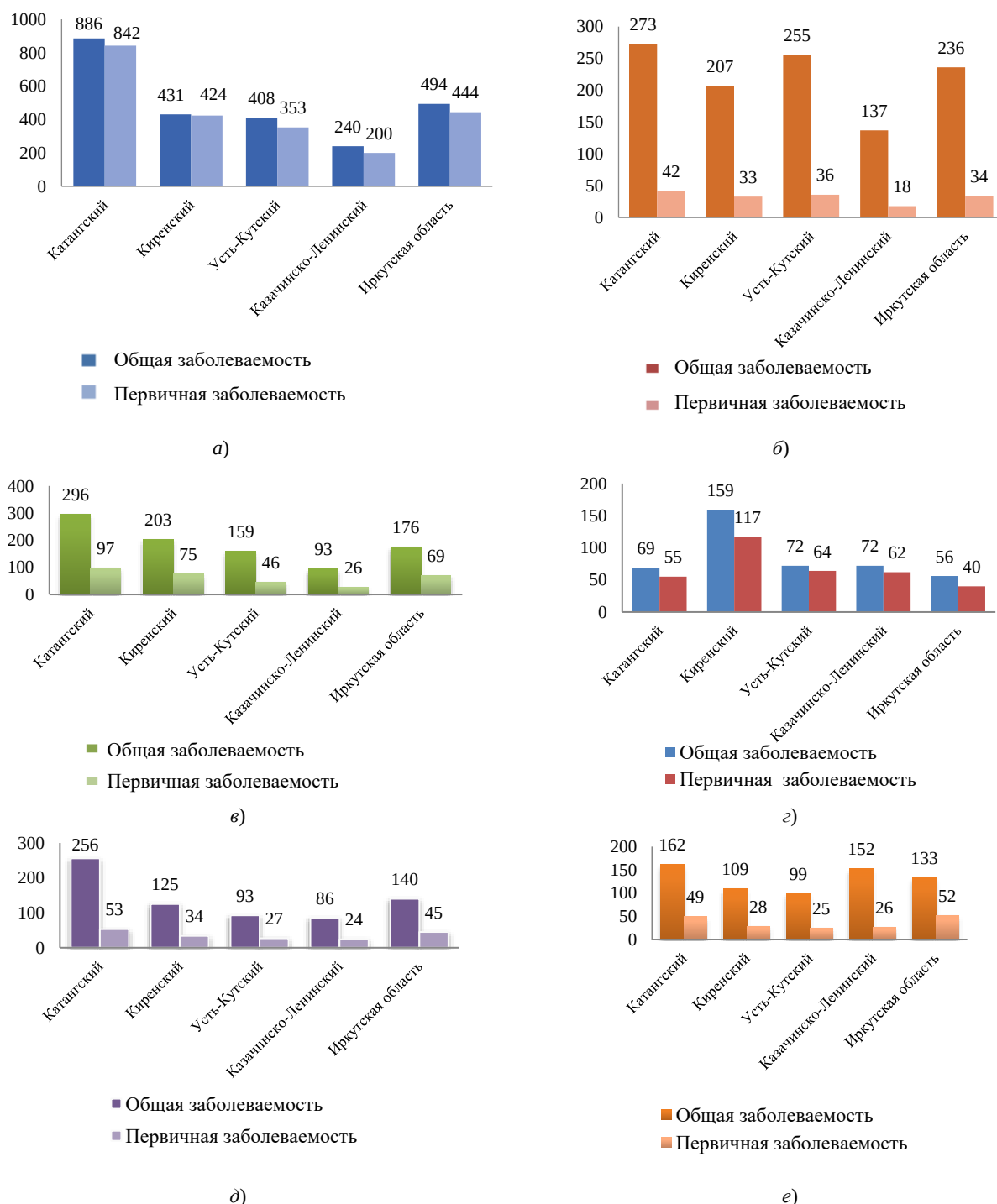


Рис. 3. Сравнение средних показателей общей и первичной заболеваемости населения в муниципальных образованиях по следующим болезням: а — органов дыхания; б — системы кровообращения; в — костно-мышечной системы; г — патологиях при беременности, родах и в послеродовой период; д — системы органов пищеварения; е — мочеполовой системы

Известно, что младенцы чрезвычайно чувствительны к качеству окружающей среды [17]. Заболевания, вызванные экологическими изменениями, довольно распространены именно в младенческом возрасте. В связи с этим была рассмотрена динамика младенческой смертности (количество умерших детей до одного года на

1000 родившихся живыми) по регионам Иркутской области. На рис. 4 отражены соответствующие данные⁸ за период с 2001 по 2019 год.

В соответствии с представленной диаграммой (рис. 4) уровень младенческой смертности во всех районах нефтепромысла превышает уровень Иркутской области в целом. Следует отметить, что выше линии Иркутской области также лежат показатели Усть-Илимского, Зиминского, Братского, Бодайбинского районов, тоже являющихся промышленными районами Иркутской области, но их показатели в несколько раз ниже показателей Катангского района (превышение показателей Иркутской области до 4 раз в рассматриваемый период). Значения показателей младенческой смертности Киренского района с 2011 года начинают расти и к 2013 году становятся близкими к соответствующим показателям Катангского района. Также на диаграмме видно превышение показателей младенческой смертности Усть-Кутского района над соответствующими показателями Иркутской области с 2006 года по 2018 год. На взгляд авторов, очевидна связь роста младенческой смертности с началом промышленного освоения углеводородных месторождений этих районов (Усть-Кутский — 2003 год, Катангский — 2006 год, Киренский — 2012 год).

В ходе эксперимента была выполнена оценка неканцерогенного риска для здоровья населения в нефтедобывающих районах Иркутской области, используя Руководство⁹ и результаты мониторинга окружающей среды нефтедобывающей компании в 2018 и 2019 гг. на территориях Даниловского НГКМ, Ярактинского, Марковского и Аянского месторождения в качестве исходных данных¹⁰.

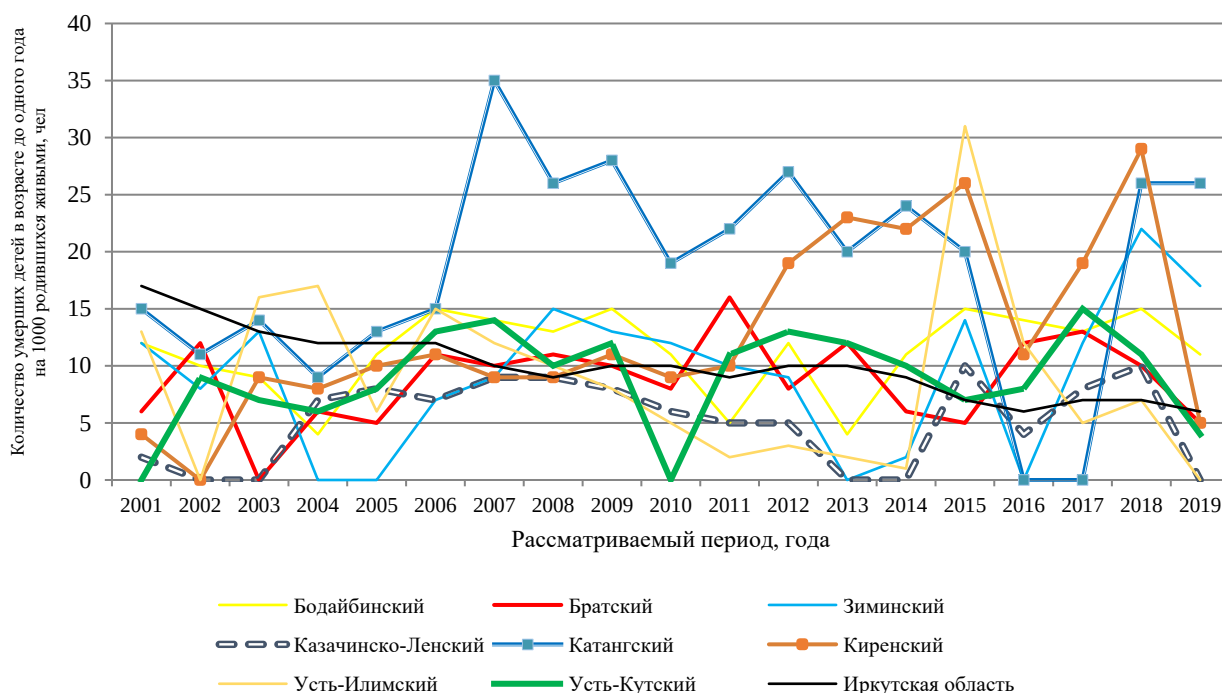


Рис. 4. Динамика показателей младенческой смертности по административным районам Иркутской области с 2001 по 2019 гг.

Следует отметить, что при оценке были рассмотрены осредненные за соответствующий год среднесуточные концентрации загрязняющих веществ. Расчет риска производился исходя из того, что загрязняющие вещества воздействуют длительно, поэтому в соответствии с Руководством¹¹ из двух значений концентраций использовали наибольшее из имеющихся. В соответствии с методикой приняли, что суточное потребление воздуха человеком составляет 20 м³/сутки, средняя масса тела человека — 70 кг, время жизни человека — 70 лет. Результаты расчетов вероятности развития неканцерогенных эффектов для здоровья населения, проживающего на исследуемых территориях, представлены в таблице 1.

⁸ Демография. Официальный сайт территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области. URL: <https://irkutskstat.gks.ru/> (дата обращения: 21.04.2022).

⁹ Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037399> (дата обращения: 21.04.2023).

¹⁰ Архив. Официальный сайт Иркутской нефтяной компании: URL: <https://irkutskoil.ru/sustainable-development/environmental-protection/arkhiv-dokumentov-dlya-uchastiya-v-reytinge/> (дата обращения: 21.04.2023).

Таблица 1

Результаты оценки неканцерогенного риска для здоровья населения Катангского, Киренского, Усть-Кутского района от загрязнения атмосферного воздуха в процессе нефтедобычи

Район	Загрязняющее вещество			Оценка неканцерогенного риска				
	Вещество	ПДК _{сс} (мг/м ³)	Класс опасности	RfC*	RfD, (мг/кг·сут.)	C, (мг/м ³)	ССД, (мг/кг·сут.)	ИНР
Катангский	NO ₂	0,1	3	0,06	0,006	0,01	0,003	0,48
	SO ₂	0,05	3	0,05	0,0025	0,05	0,015	6
	H ₂ S	0,008	2	0,002	0,000016	0,0012	0,00006	0,38
	Предельные углеводороды	50	4	0,071	20	2,1	0,63	0,03
	Взвешенные вещества	0,035	—	0,075	0,003	0,23	0,0006	2
	Метанол	0,5	3	4	2	5,5	1,595	0,80
Итого 9,69								
Киренский	NO ₂	0,1	3	0,06	0,006	0,009	0,0026	0,43
	SO ₂	0,05	3	0,05	0,0025	0,06	0,00174	6,96
	H ₂ S	0,008	2	0,002	0,000016	0,001	0,00003	1,88
	Предельные углеводороды	50	4	0,4	20	2,2	0,638	0,034
	Взвешенные вещества	0,035	—	0,075	0,003	0,54	0,00157	0,52
	Метанол	0,5	3	4	2	3,7	1,1	0,55
Итого 10,37								
Усть-Кутский	NO ₂	0,1	3	0,06	0,006	0,007	0,0021	0,35
	SO ₂	0,05	3	0,05	0,0025	0,03	0,00017	3,5
	H ₂ S	0,008	2	0,002	0,000016	0,0002	0,0000058	3,75
	Предельные углеводороды	50	4	0,4	20	11	3,2	0,16
	Взвешенные вещества	0,035	—	0,075	0,003	0,51	0,0015	5
	Метанол	0,5	3	4	2	11	2	1
Итого 13,76								

* ССД — среднесуточная доза поглощения загрязнителя (мг/кг × сутки); С — осредненная концентрация загрязнителя в воздухе (мг/м³), RfD — референтная доза ПДК (мг/м³), RfC — референтные концентрации для хронического ингаляционного воздействия.

Значения индивидуального неканцерогенного риска, превышающие единицу, в соответствии с использованной методикой, означают наличие риска повреждения здоровья при ежедневном вдыхании загрязненного воздуха. Наибольшее влияние на здоровье оказывает содержание в воздухе диоксида серы, взвешенных веществ, метанола и сероводорода. Сравнительный анализ рисков с установленными показателями заболеваемости данных районов демонстрирует зависимость между содержанием в атмосферном воздухе приоритетных загрязняющих веществ и структурой заболеваемости населения в виде существенного значения показателя заболеваний органов дыхания, кровеносной и костно-мышечной системы.

Иркутская область входит в десятку самых загрязнённых регионов страны. Считается, что наибольшее негативное влияние оказывают промышленные центры — Ангарск, Братск, Шелехов, Зима, Иркутск. Однако активное развитие нефтепромыслов в последние годы также стало оказывать существенное влияние, что не могло не сказаться на здоровье населения близлежащих территорий.

Обсуждение и заключения. Показана неблагоприятная медико-демографическая ситуация на обсуждаемых территориях. Катангский район по показателям общей заболеваемости занимает первое место среди всех рассматриваемых районов и области в целом по заболеваниям органов дыхания, системы кровообращения,

костно-мышечной системы, органов пищеварения, мочеполовой системы, а также по отклонениям в период беременности, родов и послеродовой период. Киренский район отличается крайне высокими общими и первичными показателями отклонений при беременности, родах и в послеродовой период. В этом районе показатели превышены более чем в 2 раза, по сравнению с остальными рассмотренными территориями. В Усть-Кутском районе показатели общей и первичной заболеваемости системы кровообращения и болезней органов дыхания превосходят показатели территорий, взятых для сравнения. Есть примеры на территории России, когда негативное влияние промышленных производств на здоровье населения компенсируется высоким уровнем социально-экономического развития региона [18]. Возможно такое решение проблемы стало бы решением и на данных территориях, если бы нефтедобывающие компании приняли часть расходов по финансированию здравоохранения, в том числе расходы по привлечению высококвалифицированного медицинского персонала, а также по улучшению других социально-экономических показателей регионов добычи на себя.

Список литературы

1. Елинский В.И., Ахмедов Р.М., Иванова Ю.А. Проблема загрязнения окружающей среды при нефтедобыче: актуальные вопросы. *Вестник Московского университета МВД России*. 2020;7:118–122. <https://doi.org/10.24411/2073-0454-2020-10397>
2. Красноперова С.А. Проблема утилизации попутного нефтяного газа на примере нефтяного месторождения Удмуртской Республики. *Управление техносферой*. 2021;4(1):63–74. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2021.65.70.007>
3. Сулейманов Р.А., Бактыбаева З.Б., Валеев Т.К. Эколого-гигиеническая характеристика окружающей среды и состояние здоровья населения на территориях добычи и транспорта нефти. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2018;4:124–142. <https://doi.org/10.23648/UMBJ.2018.32.22703>
4. Onyije F.M., Hosseini B., Togawa K. et al. Cancer Incidence and Mortality among Petroleum Industry Workers and Residents Living in Oil Producing Communities: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021;18(8):4343. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084343>
5. Schnatter A.R., Chen M., DeVilbiss E.A. et al. Systematic Review and Meta-Analysis of Selected Cancers in Petroleum Refinery Workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2018;60:e329–e342. [10.1097/JOM.0000000000001336](https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001336)
6. Boonhat H., Lin R-T. Association between leukemia incidence and mortality and residential petrochemical exposure: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2020;145:106090. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106090>
7. Рустамов З.А., Брюхова К.С. Проблема утилизации попутного нефтяного газа. Анализ и современное состояние. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2019;58:102–109. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2019.58.08>
8. Оруджев Р.А., Джафарова Р.Э. Особенности токсического действия углеводородов нефти на организм человека. *Вестник ВГМУ*. 2017;16(4):8–5. <https://doi.org/10.22263/2312-4156.2017.4.8>
9. Lin C.K., Hung H.Y., Christiani D.C. et al. Lung cancer mortality of residents living near petrochemical industrial complexes: a meta-analysis. *Environmental Health*. 2017;16:101. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0309-2>
10. Lelieveld J., Pozzer A., Pöschl U. et al. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovascular Research*. 2020;116(11):1910–1917. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025>
11. Anwar M., Ridpath A., Berner J. et al. Medical Toxicology and Public Health-Update on Research and Activities at the Centers for Disease Control and Prevention and the Agency for Toxic Substances and Disease Registry: Environmental Exposures among Arctic Populations: The Maternal Organics Monitoring Study in Alaska. *Journal of Medical Toxicology*. 2016;12(3):315–317. <https://doi.org/10.1007/s13181-016-0562-8>
12. Исакова Е.А. Особенности воздействия нефти и нефтепродуктов на почвенную биоту. *Colloquium-journal*. 2019;12–1(36):4–6. <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10325>
13. Ejike C.E., Eferibe C.O., Okonkwo F.O. Concentrations of some heavy metals in underground water samples from a Nigerian crude oil producing community. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017;24(9):8436–8442. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8524-5>
14. San Sebastián M., Armstrong B., Stephens C. Outcomes of pregnancy among women living in the proximity of oil fields in the Amazon basin of Ecuador. *Int J Occup Environ Health*. 2002;8(4):312–9. [10.1179/107735202800338650](https://doi.org/10.1179/107735202800338650)

15. Khamidullina E.A., Nayanov P.A. Impact of the oil and gas production process on the environment and human health. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022;979(1):012168. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012168>
16. Бочаров С.С., Васильева Е.А. Экологические факторы и здоровье детей дошкольного возраста. *Университетская наука*. 2020;2(10):186–189.
17. Артемьева А.А., Малькова И.Л. Анализ характера влияния нефтедобычи на здоровье населения Удмуртии. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2006;11:3–14.

References

1. Elinskiy VI, Akhmedov RM, Ivanova YuA. The problem of environmental pollution in oil production: topical issue. *Vestnik of Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2020;7:118–122. <https://doi.org/10.24411/2073-0454-2020-10397> (In Russ.).
2. Krasnoperova SA. The problem of the utilization of associated petroleum gas on the example of an oil field in the Udmurt republic. *Management of the Technosphere*. 2021;4(1):63–74 <https://doi.org/10.34828/UdSU.2021.65.70.007> (In Russ.).
3. Suleymanov RA, Baktybaeva ZB, Valeev TK. Environmental and hygienic environmental characteristics and public health on the territories of crude oil production and transportation. *Ulyanovsk Medico-biological Journal*. 2018;4:124–142 <https://doi.org/10.23648/UMBJ.2018.32.22703> (In Russ.).
4. Onyije FM, Hosseini B, Togawa K, et al. Cancer Incidence and Mortality among Petroleum Industry Workers and Residents Living in Oil Producing Communities: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021;18(8):4343. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084343>
5. Schnatter AR., Chen M, DeVilbiss EA, et al. Systematic Review and Meta-Analysis of Selected Cancers in Petroleum Refinery Workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2018;60:e329–e342. [10.1097/JOM.0000000000001336](https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001336)
6. Boonhat H, Lin R-T. Association between leukemia incidence and mortality and residential petrochemical exposure: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2020;145:106090. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106090>
7. Rustamov ZA, Bryukhova KS. The problem of associated oil gas utilization, analysis and current status. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2019;58:102–109 <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2019.58.08> (In Russ.).
8. Orujov RA, Jafarova RA. The peculiarities of the toxic effect of petroleum hydrocarbons on the human organism. *Vestnik Vitebskogo Gosudarstvennogo Meditsinskogo Universiteta*. 2017;16(4):8–5 <https://doi.org/10.22263/2312-4156.2017.4.8> (In Russ.).
9. Lin CK, Hung HY, Christiani DC, et al. Lung cancer mortality of residents living near petrochemical industrial complexes: a meta-analysis. *Environmental Health*. 2017;16:101. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0309-2>
10. Lelieveld J, Pozzer A, Pöschl U, et al. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovascular Research*. 2020;1;116(11):1910–1917. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025>
11. Anwar M, Ridpath A, Berner J, et al. Medical Toxicology and Public Health-Update on Research and Activities at the Centers for Disease Control and Prevention and the Agency for Toxic Substances and Disease Registry: Environmental Exposures among Arctic Populations: The Maternal Organics Monitoring Study in Alaska. *Journal of Medical Toxicology*. 2016;12(3):315–317. <https://doi.org/10.1007/s13181-016-0562-8>
12. Isaakova EA. Features of influence of oil and oil products on soil biota. *Colloquium-journal*. 2019;12-1(36):4–6. <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10325> (In Russ.).
13. Ejike CE, Eferibe CO, Okonkwo FO. Concentrations of some heavy metals in underground water samples from a Nigerian crude oil producing community. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017;24(9):8436–8442. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8524-5>
14. San Sebastián M, Armstrong B, Stephens C. Outcomes of pregnancy among women living in the proximity of oil fields in the Amazon basin of Ecuador. *Int J Occup Environ Health*. 2002;8(4):312–9. [10.1179/107735202800338650](https://doi.org/10.1179/107735202800338650)
15. Khamidullina EA, Nayanov PA. Impact of the oil and gas production process on the environment and human health. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022;979(1):012168. [10.1088/1755-1315/979/1/012168](https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012168)
16. Bocharov SS, Vasileva EA. Ecological factors and health of preschool children. *University Science*. 2020;2(10):186–189. (In Russ.).

17. Artemeva AA, Malkova IL. Analiz kharaktera vliianiia neftedobychi na zdorove naseleniia Udmurtii. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2006;11:3–14. (In Russ.).

Об авторах:

Хамидуллина Елена Альбертовна, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности» Иркутского национального исследовательского технического университета (РФ, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), кандидат химических наук, доцент, [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), elena.irk@mail.ru

Васильева Виктория Витальевна, магистрант кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности» Иркутского национального исследовательского технического университета (РФ, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83) [ORCID](#), viktoriya_vasil00@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Е.А. Хамидуллина — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов, научное руководство. В.В. Васильева — проведение расчетов, анализ результатов исследований, формирование выводов, подготовка текста.

Поступила в редакцию 14.04.2023.

Поступила после рецензирования 21.04.2023.

Принята к публикации 24.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Elena A Khamidullina, associate professor of the Industrial Ecology and Life Safety Department, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontova st., Irkutsk, 664074, RF), Cand. Sci. (Chemistry), associate professor, [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), elena.irk@mail.ru

Viktoriya V Vasileva, Master's degree student of the Industrial Ecology and Life Safety Department, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontova st., Irkutsk, 664074, RF), [ORCID](#), viktoriya_vasil00@mail.ru

Claimed contributorship:

EA Khamidullina: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, revision of the text, correction of the conclusions, academic advising. VV Vasileva: calculations, analysis of the research results, formulation of the conclusions, preparation of the text.

Received 14.04.2023.

Revised 21.04.2023.

Accepted 24.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 621.039

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26>

Научная статья



Разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки

А.П. Тюрин  , И.М. Янников

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,
Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

✉ asd1978@mail.ru

Аннотация

Введение. При исследовании проблемы воздействия на людей и инфраструктуру населенных пунктов негативных факторов, возникающих при взрывах на заправочных станциях, зачастую применяется вероятностный подход. Ограничение данного подхода состоит в том, что при его реализации понятие загроможденности окружающего пространства не отражает соотношения между площадью застройки и общей площадью, подверженной воздействию ударной волны. Поэтому данная статья посвящена вопросам разработки и обоснования подхода к оценке последствий взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС) с учётом особенностей застройки населённых пунктов. Целью работы явилась разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки. Решение данной проблемы будет способствовать принятию решений для разработки эффективных защитных мероприятий для окружающих объектов.

Материалы и методы. Авторами проведён аналитический обзор результатов исследований в изучаемой области и существующих подходов к оценке последствий взрывов на автомобильных заправочных станциях (АЗС), газозаправочных станциях (АГЗС), исходя из конкретных условий их расположения на территории населённых пунктов.

Результаты исследования. Разработан подход для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки. Выявлены основные причины, виды аварий со взрывом на АЗС и масштабы их последствий. Наряду с теоретическим обоснованием рассматриваемого вопроса, авторами приведено подробное описание применённой методики исследования, а также характеристика объектов исследования с учётом их месторасположения. При расчете последствий взрывов топливно-воздушных смесей впервые предложено использовать коэффициент плотности застройки, равный отношению площади существующих объектов к общей площади территории, подверженной воздействию ударной волны. Данный подход обосновывает необходимость применения дополнительных защитных мероприятий в районах расположения заправочных станций. Подробно описаны использованные методы анализа с обоснованием достоверности результатов измерений.

Обсуждение и заключения. Применение предлагаемого в статье подхода для расчета последствий взрыва топливно-воздушных смесей с учетом величины плотности застройки даёт возможность контролировать расположение и уровень риска от возможных взрывов на заправочных станциях в условиях реальной обстановки. Предлагаемый подход к расчету последствий позволяет оперативно в реальном масштабе времени и в соответствии с существующей обстановкой в районе расположения АЗС оценивать возможные риски и планировать конкретные мероприятия по их минимизации.

Ключевые слова: автозаправочная (автогазозаправочная) станция, оценка риска, методика, дефлаграция, взрыв, вычисления, эксперимент, застройка.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективу разработчиков авторского курса «Электронная информационно-образовательная среда» в лице Султанова Р.О., Майоровой М.А. и Смирнова С.В. за

профессиональные компетенции, полученные при его изучении и использованные в дальнейшем при выполнении данного исследования.

Для цитирования: Тюрин А.П., Янников И.М. Разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учётом особенностей застройки. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2):17–26. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26>

Original article

Development of an Approach to Assess the Consequences of Fuel-Air Mixtures Explosions Taking into Account the Development Features

Aleksandr P Tyurin , Igor M Yannikov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7, Studencheskaya Street, Izhevsk, Russian Federation

 asd1978@mail.ru

Abstract

Introduction. In the study of the problem of the impact of negative factors from explosions at gas stations on people and the infrastructure of settlements, a probabilistic approach is often used. The limitation of this approach is that when it is implemented, the concept of clutter of the surrounding space does not reflect the relationship between the area occupied by buildings and the total area affected by the shock wave. Therefore, this article is devoted to the development and justification of an approach to assessing the consequences of explosions of fuel-air mixtures (FA), taking into account the peculiarities of the development of settlements. The work objective is to develop an approach for assessing the consequences of explosions of fuel-air mixtures, taking into account the development features. The solution to this problem will facilitate decision-making for the development of effective protective measures for surrounding objects.

Materials and Methods. The authors have conducted an analytical review of the research results in the field of study and the existing approaches to assessing the consequences of explosions at filling stations (FS) and gas stations (GS), based on the specific conditions of their location on the territory of settlements.

Results. An approach has been developed to assess the consequences of explosions of fuel-air mixtures, taking into account the development features. The main causes, types of accidents with an explosion at a gas station and the scale of their consequences have been identified. Along with the theoretical justification of the issue under consideration, the authors provide a detailed description of the applied research methodology, as well as the characteristics of the objects of research, taking into account their location. When calculating the consequences of explosions of fuel-air mixtures, it was proposed for the first time to use a development density factor equal to the ratio of the area of the existing facilities to the total area of the territory affected by the shock wave. This approach justifies the need to apply additional protective measures in the areas where gas stations are located. The methods of analysis used are described in detail with justification of the reliability of the measurement results.

Discussion and Conclusion. The application of the approach proposed in the article for calculating the consequences of an explosion of fuel-air mixtures, taking into account the development density, makes it possible to control the location and the level of risk from possible explosions at gas stations in a real situation. The proposed approach for calculating the consequences allows you to quickly assess possible risks in real time and plan specific measures to minimize them in accordance with the existing situation in the area of the gas station.

Keywords: filling (gas) station, risk assessment, methodology, deflagration, explosion, calculations, experiment, development.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the team of developers of the author's course "Electronic information and educational environment" represented by Sultanov RO., Mayorova MA. and Smirnov SV. for the professional competencies obtained during its study and used in the future when performing this research.

For citation. Tyurin AP., Yannikov IM. Development of an Approach to Assess the Consequences of Fuel-Air Mixtures Explosions Taking into Account the Development Features. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2): 17–26. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26>

Введение. На автомобильных газозаправочных станциях, находящихся в непосредственной близости от мест пребывания большого количества людей, зачастую происходят аварийные взрывы. Актуальным и крайне важным является оценка последствий таких взрывов. Тяжесть негативных воздействий зависит прежде всего от наличия и качества препятствий на пути распространения взрывной волны. Последующие оценки необходимы

для выполнения корректирующих мероприятий, направленных на снижение влияния негативных факторов взрыва. К ним можно отнести установку любых механических препятствий — защитных барьеров, деревьев, кустарников и др. Эффективность защитных мероприятий в количественном выражении должна быть достаточной для сведения рисков до минимально допустимых значений. Одновременно оценка опасностей должна иметь наглядное представление.

На практике нередки случаи, когда рядом с заправочными станциями, в том числе мультитопливного типа, находятся регулируемые и нерегулируемые пешеходные переходы, различные здания или остановки общественного транспорта. При этом на пути к ним со стороны взрывоопасных объектов зачастую отсутствуют элементарные преграды, способствующие снижению взрывной нагрузки.

Опасность тяжёлых последствий при авариях на заправочных станциях подтверждается Российской и международной статистикой. В частности, за период с 2005 по 2016 годы на автогазозаправочных станциях нашей страны ежегодно происходит 2–3 пожара с пострадавшими, при которых получают травмы или погибают 4 человека [1]. Аналогичные случаи происходят и в других странах, например, в [2] описаны 50 типичных случаев аварий на заправочных станциях Китая за последние 20 лет.

Ведущим подходом к исследованию проблемы воздействия на людей и инфраструктуру населённых пунктов негативных факторов взрывов на заправочных станциях является использование известных методик [3], реализованных в различных программных комплексах. Например, модуль «Взрыв ТВС. Расчёты зон поражения при взрывах ТВС»¹ позволяет комплексно рассмотреть все вышеописанные параметры. В практических и исследовательских целях методика даёт возможность управления введенными параметрами, логикой расчёта, оценкой масштабов последствий в случае изменения местных условий застройки.

Для анализа опасностей исследователи используют методы анализа режимов и последствий отказов. Типом и причиной отказа оборудования наиболее частых аварий является взрыв, вызванный статическим электричеством. В этой связи обычно предлагают эффективные меры по устранению аварий и смягчению последствий. Результаты исследований направлены на обеспечение возможности снижения рисков эксплуатации заправочных станций.

Научные источники, посвященные анализу аварий со взрывом сжиженных углеводородных газов, свидетельствуют о том, что их последствия часто приводят к значительным материальным потерям и человеческим жертвам. Анализ опасностей для режима дефлаграции и детонации обычно выполняется аналитическим методом, подробно описанным в вышеуказанной методике [3]. Однако применяются и более сложные численные методы расчёта [4]. Например, с помощью программного обеспечения² рассматриваются сценарии взрывов в условиях сложной застройки местности в трехмерном представлении, в том числе в случае взрыва внутри здания. Для анализа дефлаграционной опасности топливно-воздушных смесей численным методом могут быть исследованы давление взрыва и особенности распространения пламени предварительно перемешанной смеси сжиженных углеводородных газов (СУГ) с воздухом. Например, в замкнутом трубопроводе при повышенных начальных давлениях и температурах. Результаты подобных исследований позволяют выявлять наибольшее влияние на параметры взрыва, например, начального давления. В связи с общей наблюдающейся тенденцией существует подход прогнозирования аварий и их последствий с использованием концепции риска. Особенности риска дефлаграции СУГ в сложных рабочих ситуациях, оценки риска взрыва связанных процедур и устройств для разработки научных и эффективных мер по взрывозащите рассматриваются в работе китайских исследователей [5].

Исследования безопасности и оценки риска все чаще используются для управления деятельностью по обращению с опасными материалами. Полученные модели в исследованиях по анализу рисков могут использоваться, например, для планирования землепользования или для расчёта последствий аварийных ситуаций уже существующих объектов. В некоторых работах представлены модели расчёта последствий пожаров, взрывов и выбросов ядовитых газов для людей, зданий и сооружений. Источником таких моделей, как правило, является справочник по расчёту последствий, разработанный для Министерства жилищного строительства и окружающей среды Нидерландов, в котором приводится значительное количество моделей [6]. В зарубежной литературе можно встретить источники, раскрывающие основные концепции с точки зрения акустических воздействий взрыва и их физических характеристик [7].

Автозаправочные станции (АЗС) их мультитопливные варианты, одиночные автогазозаправочные станции (АГЗС) представляют собой достаточно сложные социально-технические системы с динамичными

¹ Модуль «Взрыв ТВС». Расчёты зон поражения при взрывах. Линейка Российских программных средств по промышленной безопасности. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmyi-kompleks-toxirisk-5/moduli-toxirisk-5/modul-vzryv-tvs-raschety-zon-porazhenia-pri-vzryvah-tvs> (дата обращения: 20.04. 2023).

² BREEZE ExDAM. Modeling Software for EHS Professionals. Trinity Consultants. URL: <https://www.trinityconsultants.com/software/explosion/exdam> (дата обращения: 20.04. 2023).

отношениями между различными факторами риска. В настоящее время причинно-следственный анализ аварий, связанных со взрывом топливно-воздушных смесей, в основном сосредоточен на исследованиях аспектов человеческой ошибки и неисправности оборудования. В работе [8] выявлены 28 факторов риска взрывов газа. Девять из них, такие как вспышка, электрическая искра и локальное скопление газа, являются прямыми причинами взрыва газа. 17 факторов связаны с действиями при эксплуатации, неисправностью систем вентиляции и ошибками в управлении безопасностью. Они являются косвенными. Вероятность взрыва газа возрастает с увеличением количества факторов риска. В ряду слабо подверженных управлению находятся риски, связанные с несовершенством государственной политики и законодательных актов. Установлено, что по сравнению с субъективными факторами риска объективные факторы имеют более высокую вероятность вызвать взрыв газа вследствие сопряжения рисков.

Существует ряд исследований, посвященных сравнительной оценке последствий взрыва на основе различных подходов. Например, в работе [9] для оценки последствий взрыва использовались упрощенные эмпирические модели. Тем не менее, в большинстве случаев для оценки степени уязвимости людей используется методология, принятая международным сообществом и основанная на вероятностных моделях. Результаты расчета с использованием различных подходов имеют некоторые различия, однако все воспроизводят реальный ущерб и предсказывают последствия произошедшего взрыва с достаточной точностью.

Среди российских ученых также ведутся работы по систематизации результатов исследований по поражающему воздействию воздушных ударных волн при взрывах газопаровоздушных смесей. Так, в работе [10] получены различные эмпирические зависимости основных параметров воздушной ударной волны от расстояния на основе универсального метода энергетического подобия. Разработана методика расчета мощности поражающего действия для человека, находящегося в укрытиях различной степени защиты.

Простейший пример оценки шумового воздействия при взрывах топливно-воздушных смесей представлен в источнике [11]. По сведениям, представленным в данной работе, можно определить расстояние от эпицентра взрыва, на котором наблюдается уровень звукового давления в 140 дБ, являющийся критической величиной для слухового анализатора человека.

Данная статья направлена на разработку подхода по выявлению расчетных значений вероятности возникновения события — воздействия ударной нагрузки на человека и объекты окружающей среды вследствие возможного взрыва топливно-воздушной среды с учетом особенностей застройки на местности, которые определяются по специально введенной формуле. Такой расчет проводится в единой расчетной парадигме с возможностью задания исходных параметров и наглядного представления результатов для пользователя.

Анализ ранее описанных материалов исследований позволил установить, что характер и динамика протекания и последствия аварийных ситуаций на отдельно стоящих АЗС напрямую зависят от особенностей окружающей местности. Недостатком проанализированных методик является отсутствие в расчетах фактора, учитывающего особенности застройки местности. К объектам, которые необходимо рассматривать могут относиться остановки общественного транспорта, жилые дома, регулируемые пешеходные переходы, другие автозаправочные станции. Для них свойственно близкое расположение к местам единовременного скопления и даже массового пребывания людей с численностью от 50 человек и выше.

Авторы проанализировали и другой тип материалов — нормативно-правовые акты Российской Федерации и пришли к выводу, что в настоящее время существует некоторая правовая неопределённость в применении ряда понятий, используемых при обосновании подходов к размещению и проектированию АЗС на территории населённых пунктов. В частности, понятие «место массового пребывания людей», введенное законом «О противодействии терроризму»³, означает единовременное нахождение в определённом месте 50 и более человек. Постановлением Правительства Российской Федерации⁴ проведено ранжирование этих мест по трём категориям: с численностью до 200 человек — третья категория, до 1000 человек — вторая и более 1000 человек — первая. Объект с массовым пребыванием людей — это здание или сооружение (кроме жилых

³ О противодействии терроризму. Федеральный закон №35-ФЗ от 06.03.2006. КонсультантПлюс: URL: http://www.Consultant.ru/document/cons_doc_LAW_58840/ (дата обращения: 20.04. 2023).

⁴ Об утверждении требований к антитеррористической защищённости мест массового пребывания людей и объектов (территорий), подлежащих обязательной охране войсками национальной гвардии Российской Федерации, и форм паспортов безопасности таких мест и объектов (территорий). Постановление Правительства Российской Федерации. № 272 от 25.03.2015 г. (ред. от 29.07.2020 г.). Электронный фонд правовых и нормативно технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420264843?section=text> (дата обращения: 20.04. 2023).

домов), в котором может одновременно находиться 50 и более человек⁵. То есть чтобы обосновывать риск размещения потенциально опасного объекта или места с массовым пребыванием людей необходимо рассматривать только объекты с численностью от 50 и более человек. Представить себе транспортную остановку с одновременным нахождением более 50 человек при нынешней насыщенности городов общественным транспортом достаточно сложно. Действующие документы, регламентирующие размещение заправочных станций, НПБ–111–98* и СП156.13130.2014^{6,7} устанавливают конкретные нормативы удалённости АЗС от тех или иных объектов, зданий и сооружений, дорог общего пользования и др. Однако вместо понятия «остановка общественного транспорта» используется, как правило, формулировка «место массового пребывания людей». Поскольку жизнь человека является наивысшей ценностью и безусловным приоритетом при обосновании любых подходов, представляется целесообразным уменьшить порог численности мест (объектов) массового пребывания людей или ввести понятие «место скопления людей» с установлением численности в 20 и более человек. Тогда под такое определение будут попадать остановки общественного транспорта, регулируемые и нерегулируемые переходы и пр.

Таким образом напрашивается вывод, что использование сложившихся подходов к оценке последствий возможных взрывов на заправочных станциях способно привести к пересмотру нормативов их расположения в границах населённых пунктов, степени их противоаварийной защищённости и защищённости объектов, находящихся в зоне возможного воздействия негативных факторов взрыва.

Материалы и методы. Достижение поставленной в работе цели осуществлялось на основе применения аналитического моделирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей с оценкой плотности застройки на территории опасного объекта. Такой подход позволяет уточнить характеристику типа окружающего пространства, выразив его не только качественной, но и количественной мерой и обосновать необходимость и приоритетность выполнения защитных мероприятий для снижения возможных рисков и ущерба.

Методы выполнения основных расчетов основаны на использовании положений методики [8], позволяющей определять последствия детонационного или дефлаграционного горения топливно-воздушных смесей, содержащих пропан, метан или бензин. Дополнительно использовались измерительные инструменты площади или длины, существующие в 2GIS и подобных программах. Это дало возможность выполнения онлайн-измерений площадей или длин на отображаемой местности.

В качестве расчетных параметров оценивались параметры, заложенные в вышеуказанном руководстве [3] с учетом положений [6]: существенные или полные структурные повреждения зданий, вероятность разрыва барабанной перепонки, выживания в результате отброса волной давления или повреждения легких. Благодаря доступности математической логики вычислений возможна реализация оценки последствий в результате действия осколков как вторичных факторов поражения.

Всего были проанализированы особенности местности вблизи семнадцати заправочных станций, расположенных на территории г. Ижевска, на которых используются такие виды топлива как пропан, метан или бензин. Характерные объекты, представляющие ключевой интерес представлены в таблице 1. По понятным причинам данные объекты обезличены.

Таблица 1

Характеристика исследованных объектов

№ п/п	Вид топлива	Особенности расположения, в т.ч. близость подобных объектов	Возможность скопления людей
1.	Пропан	В зоне прямой видимости располагается АЗС на расстоянии 95 м, рядом с которой размещена автобусная остановка	Нет
2.	Метан	Автобусная остановка на расстоянии в 60 м	Да
3.	Пропан	Высотное здание (5 и более этажей) на расстоянии 25 м	Нет, но возможно действие вторичных факторов взрыва — осколков стекла
4.	Бензин	В зоне прямой видимости расположена автотранспортная остановка, а также 5-ти этажное жилое здание	Да

⁵ Об утверждении Правил противопожарного режима Российской Федерации. Постановление Правительства Российской Федерации. №1479 от 16.09.2020 г. Электронный фонд правовых и нормативнотехнических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565837297?section=text> (дата обращения: 20.04. 2023).

⁶ Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности. Свод правил СП 156.13130.2014. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110842> (дата обращения: 20.04. 2023).

⁷ Автозаправочные станции. Требования пожарной безопасности. Нормы пожарной безопасности. НПБ 111-98*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000020> (дата обращения: 20.04.2023).

Результаты исследования. Перед выполнением расчетов ставились две задачи, необходимые для проверки достоверности вычислений:

- оценка правильности расчетов вероятностей оценочных параметров на основе вероятностной функции;
- оценка правильности измерения площадей и длин применительно к объектам на местности.

Проверка правильности и полноты решения первой задачи была выполнена на условиях решения задачи, приведенной в примере № 1 методики [3]. Решение второй задачи было подтверждено в эксперименте с использованием измерительной «линейки» на сайте публичной кадастровой карты Удмуртской Республики⁸. Использование характерных точек измерения в измерительном эксперименте на кадастровой карте показало результаты измерений по длине. Отсюда был сделан вывод о достоверности измерения и площадей на местности. Пояснение принципа выполнения измерений представлено на рис. 1 (получен авторами с использованием публичной кадастровой карты <https://egrp365.org/map/?id=g2ApXz>), визуальное отображение результата расчетов — на рис. 2.

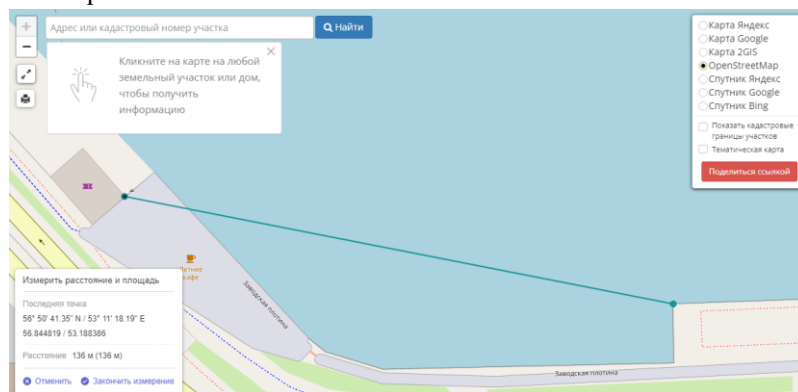


Рис. 1. Измерения по публичной кадастровой карте

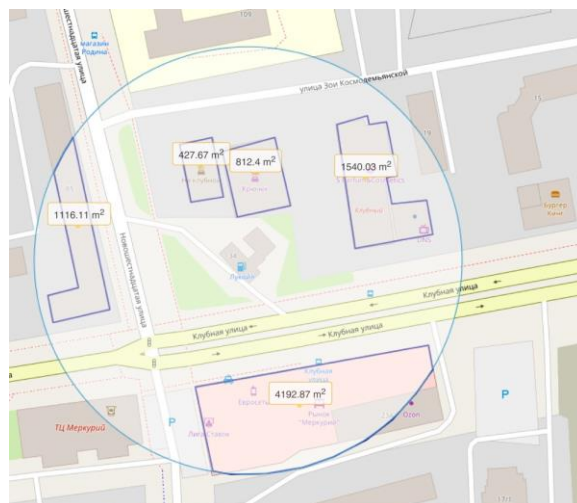


Рис. 2. Визуальное представление расчетной зоны, для границы которой определялись вероятности последствий

Следующим этапом модельного эксперимента явилась оценка коэффициента плотности застройки на территории выбранных объектов. Графическое отображение измеренных площадей также представлено на рис. 2.

Коэффициент плотности застройки ρ определялся по формуле:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n S_n}{S_{ref}}, \quad (1)$$

где n — число измеренных участков; S_n — площадь одного измеренного участка, м^2 ; S_{ref} — базовая площадь, м^2 .

В качестве базовой площади была выбрана площадь окружности радиусом 100 м. Для всех проанализированных АГЗС коэффициент плотности застройки не превышает величину в 26,7 %. Следует отметить, что в эту величину не входит площадь зеленых насаждений типа кустарников или деревьев, которые в летний период в определенной степени выполняют барьерные функции в связи с наличием листвы, но в зимнее время не приводят к снижению воздействия воздушной ударной волны. При коэффициенте плотности в

⁸ Публичная кадастровая карта Удмуртской Республики. ЕГРП 365 проверка недвижимости. URL: <https://egrp365.org/> (дата обращения: 20.04.23).

26,7 %, в соответствии с определениями [3], обстановку можно характеризовать как слабо загроможденную. Практически нужно учитывать направленность постройки по отношению к эпицентру взрыва и материал, из которого она построена. Из семнадцати исходных объектов было выбрано четыре, как удовлетворяющие критериям исследования. Далее на основе измеренных значений расстояний до мест возможного массового пребывания людей определялись вероятности возникновения событий — поражающих факторов взрыва топливно-воздушной смеси. Результаты исследований и вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты вычислений модельного эксперимента

№ объекта п/п	Коэфф-т плотности застройки/ радиус расчета, м	Вероятности поражающих факторов, %				
		Серьезные структурные повреждения зданий, P1	Полные разрушения зданий, P2	Вероятность разрыва барабанной перепонки, P3	Вероятность выживания в результате отброса волной давления, P4	Повреждения легких, P5
1.	0/95	84	27,1	2,2	1,4	0
2.	13,2/60	23	2,9	0,7	0,6	0
3.	22,4/25	92,6	39,6	4,4	29,1	0
4.	26,7/60	87,6	31,7	2,9	23,6	0

Исходя из анализа полученных результатов (таблица 2), можно констатировать, что вероятности травмирования людей находятся на достаточном высоком уровне, при этом они могут быть снижены проведением специальных мероприятий — сооружением барьеров на пути распространения негативных факторов взрыва.

Обсуждение и заключения. Как показало выполненное исследование, прогнозирование последствий взрывов топливно-воздушных смесей может быть оправдано наличием характерных особенностей местности вблизи автозаправочных станций с такими видами топлива как бензин, пропан или метан. Особенности местности, как правило, заключаются в том, что в зоне значимых последствий могут находиться места массового пребывания или скопления людей, например, остановки общественного транспорта.

С точки зрения полноты проявления последствий возможны два варианта:

- как в зимнее, так и в летнее время барьерные препятствия могут отсутствовать;
- наличие зеленых насаждений в зимнее время оказывает слабый барьерный эффект по отношению к объектам поражения. Выявление таких опасных объектов может быть произведено при комплексном рассмотрении всей территории населенного пункта.

Обосновано, что измерение плотности застройки может быть определено как отношение площади объектов, заключенных в окружности целевого диаметра к площади данной окружности. Для проведения исследования были рассчитаны последствия взрыва топливно-воздушных смесей на основе вероятностной функции. Такой подход зарекомендовал себя, в том числе в международной практике, с положительной стороны. Он способен дать точные прогнозные результаты с меньшими вычислительными затратами, по сравнению с вычислительными процедурами. Новизной, реализованной в проекте, является использование модуля «Линейка», позволяющее оценивать площади и линейные расстояния на географической карте местности. Данный модуль позволяет определять коэффициент плотности застройки, как отношение суммы площадей к площади окружности радиусом в 100 м, хотя данное расстояние может быть любым. При этом центром окружности является «условная» середина автозаправочной станции. В лучшем случае следует учитывать относительное расположение зданий или сооружений, расположенных вблизи целевого объекта, которое может быть, как «продольное» или «поперечное» к эпицентру.

В соответствии с результатами измерений для наблюдаемых в рамках данного исследования объектов, коэффициент их плотности застройки не превышает 26,7 %, что позволяет характеризовать тип окружающего пространства как «открытое» или «слабо загроможденное» в соответствии с [3], и таким образом подтверждается количественно.

Как показали результаты расчетов, вероятность выживания человека при отбросе волной давления для двух из 4-х автозаправочных станций находится на уровне 29,1 % и 23,6 %. Сравнение с предельно-допустимыми значениями не представляется возможным в связи с отсутствием таковых. Однако по отношению к приемлемой вероятности эти величины являются существенными. Приемлемая вероятность может быть рассчитана как

значение вероятности данного критерия для расстояния, указанного в методике [3]. Для АЗС жидкого моторного топлива с наземными резервуарами, расположенных вне территорий населенных пунктов, минимальные расстояния от них до таких объектов, как места массового скопления людей должны составлять не менее 50 м.

Предложено ввести понятие «место скопления людей», как место, на котором может одновременно находиться 20 и более человек. К ним предложено отнести остановки общественного транспорта, регулируемые и нерегулируемые переходы, в том числе наземные, подземные и пр.

Доступность и простота использованной методики с использованием открытых картографических данных даёт возможность проведения данных видов вычислений. Результаты картографических исследований наряду с вычислительными процедурами показали, что в настоящее время среди АЗС или АГЗС существуют те, которые характеризуются возможностью скопления людей на близких расстояниях от них.

Как показало исследование, наличие условий допускающих вероятность взрывов достаточно распространено, хотя их реализация носит эпизодический характер. Возможно их возникновение обусловлено историческими причинами. Вышеупомянутые остановки общественного транспорта и тому подобные некапитальные объекты при проектировании и строительстве АЗС могут и не существовать, и быть установлены решением местных администраций значительно позже. Применение предлагаемого подхода даёт возможность контролировать их расположение и уровень риска от возможных взрывов на заправочных станциях в условиях реальной обстановки.

В конечном итоге, предлагаемый подход к оценке последствий взрывов топливно-воздушных смесей позволяет оперативно в реальном масштабе времени и в соответствии с реальной обстановкой в районе расположения АЗС оценить возможные риски и спланировать конкретные мероприятия по их минимизации.

Список литературы

1. Шахманов Ф.Ф. *Риск-ориентированный метод осуществления пожарного надзора автомобильных газозаправочных станций*. Дис. докт. техн. наук. Москва; 2018. 115 с.
2. Liu Y., Kong Z., Zhang Q. Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018;164:325–330. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.028>
3. Иванов Е.А., Аганов А.А., Буйко К.В. и др. *Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах*. Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2. 3-е изд., испр. и доп. Москва: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности»; 2010. 208 с.
4. Zhou X.Q., Hao H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *International Journal of Impact Engineering*. 2008;35(5):363–375. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.03.003>
5. Liang H., Wang T., Luo Z., et al. Risk Assessment of Liquefied Petroleum Gas Explosion in a Limited Space. *ACS Omega*. 2021;6(38):24683–24692. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03430>
6. *Green Book. Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials. Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances*. The Hague: Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment. CPR 16E, Second Edition, 2005, 337 p.
7. Balocki James B. (Secretary of the Navy) *Northwest Training and Testing. Final Supplemental Environmental Impact Statement/Overseas Environmental Impact Statement (SEIS/OEIS)*. Appendix D Acoustic and Explosive Concepts: U.S. Navym, 2022. 26 p. URL: https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/final_seis/section/NWTT_Final_SEIS_Sept2020_Appendix_D_Acoustic_and_Explosive_Concepts.pdf (дата обращения: 18.09.2022).
8. Zhang J., Xu K., You G., et al. Causation Analysis of Risk Coupling of Gas Explosion Accident in Chinese Underground Coal Mines. *Risk Analysis*. 2019;39(7):1634–1646. <https://doi.org/10.1111/risa.13311>
9. Lobato J., Rodríguez J., Jiménez C., et al. Consequence analysis of an explosion by simple models: Texas refinery gasoline explosion case. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*. 2009;66(543). URL: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/279547> (дата обращения: 27.09.2022).
10. Гришкевич А.А., Филин В.А., Ушаков В.С., Маньковский Г.И. *Оценка мощности взрывов газопаровоздушных смесей при аварийных проливах сжиженного природного газа*. Системы безопасности. Security and Safety. Каталог «Пожарная безопасность — 2017». 2017. С. 46–52. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/otsenka-moschnosti-vzryvov-gazoparovozdushnyh-smesey-pri-avariynyh-prolivah-szhizhennogo-prirodnogo-gaza> (дата обращения: 24.11.2022).
11. *Formulae for ammunition management: International Ammunition Technical Guidelines IATG 01.80:2021[E]*. Third edition. United Nations Office for Disarmament Affairs; 2021. 1331 p.

References

1. Shakhmanov FF. *Risk-orientirovannyi metod osushchestvleniya pozharnogo nadzora avtomobil'nykh gazozapravochnykh stantsii*. Author's thesis. Moscow; 2018. 115 p. (In Russ.).
2. Liu Y, Kong Z, Zhang Q. Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018;164:325–330. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.028>
3. Ivanov EA, Aganov AA, Buiko KV, et al. *Metodiki otsenki posledstviy avarii na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh*. Collection of documents. Ser. 27. Iss. 2. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Scientific and Technical Center of Industrial Safety Problems Research (Closed Joint Stock Company); 2010. 208 p. (In Russ.).
4. Zhou XQ, Hao H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *International Journal of Impact Engineering*. 2008;35(5):363–375. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.03.003>
5. Liang H, Wang T, Luo Z, et al. Risk Assessment of Liquefied Petroleum Gas Explosion in a Limited Space. *ACS Omega*. 2021;6(38):24683–24692. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03430>
6. *Green Book. Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials. Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances*. The Hague: Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment. CPR 16E, Second Edition, 2005, 337 p.
7. Balocki James B. (Secretary of the Navy) *Northwest Training and Testing. Final Supplemental Environmental Impact Statement/Overseas Environmental Impact Statement (SEIS/OEIS)*. Appendix D Acoustic and Explosive Concepts: U.S. Navym, 2022. 26 p. URL: https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/final_seis/section/NWTT_Final_SEIS_Sept2020_Appendix_D_Acoustic_and_Explosive_Concepts.pdf (accessed 18.09.2022).
8. Zhang J, Xu K, You G, et al. Causation Analysis of Risk Coupling of Gas Explosion Accident in Chinese Underground Coal Mines. *Risk Analysis*. 2019;39(7):1634–1646. <https://doi.org/10.1111/risa.13311>
9. Lobato J, Rodríguez J, Jiménez C, et al. Consequence analysis of an explosion by simple models: Texas refinery gasoline explosion case. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*. 2009;66(543). URL: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/279547> (accessed 27.09.2022).
10. Grishkevich AA, Filin VA, Ushakov VS, Mankovskii GI. *Otsenka moshchnosti vzryvov gazoparovozdushnykh smesei pri avariinykh prolivakh szhizhennogo prirodnogo gaza*. Sistemy bezopasnosti. Security and Safety. Katalog «Pozharnaya bezopasnost' — 2017». 2017. P. 46–52. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/otsenka-moschnosti-vzryvov-gazoparovozdushnyh-smesei-pri-avariinykh-prolivakh-szhizhennogo-prirodnogo-gaza> (accessed 24.11.2022). (In Russ.).
11. *Formulae for ammunition management: International Ammunition Technical Guidelines IATG 01.80:2021[E]*. Third edition. United Nations Office for Disarmament Affairs; 2021. 1331 p.

Об авторах:

Тюрин Александр Павлович, профессор кафедры «Техносферная безопасность», Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (426069, РФ, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), доктор технических наук, доцент, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), asd1978@mail.ru

Янников Игорь Михайлович, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (426069, РФ, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), доктор технических наук, доцент, imyannikov@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.П. Тюрин — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. И.М. Янников — анализ результатов исследований, доработка текста, формирование выводов, корректировка выводов.

Поступила в редакцию 10.04.2023.

Поступила после рецензирования 20.04.2023.

Принята к публикации 23.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Aleksandr P Tyurin, professor of the Technosphere Safety Department, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya str., Izhevsk, Udmurt Republic, 426069, RF), Dr. Sci. (Eng), associate professor, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), asd1978@mail.ru

Igor M Yannikov, professor of the Technosphere Safety Department, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya str., Izhevsk, Udmurt Republic, 426069, RF), Dr. Sci. (Eng), associate professor, imyannikov@mail.ru

Claimed contributorship:

AP Tyurin: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of the conclusions. IM Yannikov: analysis of the research results, revision of the text, formulation of the conclusions, correction of the conclusions.

Received 10.04.2023.

Revised 20.04.2023.

Accepted 23.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 614.84

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-27-37>


Обоснование необходимости использования службы радиационной и химической защиты в составе специализированных пожарно-спасательных частей в субъектах Российской Федерации

В.А. Маштаков , Е.В. Бобринев , Е.Ю. Удавцова , А.А. Кондашов , Е.С. Трещин 

Всероссийский Ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, Российская Федерация, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12

✉ otdel_1_3@mail.ru

Аннотация

Введение. В последнее время большое внимание уделяется вопросам перспективного развития специализированных пожарно-спасательных частей Федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы (ФПС ГПС). В связи с этим существует потребность в разработке критериев для обоснования использования той или иной службы в составе специализированных пожарно-спасательных частей (СПСЧ). Поэтому цель данного исследования состояла в разработке математической модели для обоснования необходимости использования службы радиационной и химической защиты в составе СПСЧ в субъектах Российской Федерации.

Материалы и методы. Обоснование необходимости использования службы радиационной и химической защиты (РХЗ) в составе СПСЧ проведено с использованием теории нечетких множеств. В математической модели учитываются природно-климатические и географические особенности субъектов, показатели социального и технико-экономического развития и риски возникновения чрезвычайных ситуаций и пожаров. Также учитывается наличие сил и средств РСЧС в каждом субъекте Российской Федерации. Всего отобрано 15 показателей, характеризующих необходимость использования службы РХЗ в составе СПСЧ. Для каждого показателя определена функция желательности, которая показывает, какие значения показателя являются наиболее приемлемыми с точки зрения необходимости использования службы РХЗ в составе СПСЧ.

Результаты исследования. С использованием разработанной модели определены субъекты Российской Федерации, в которых потребность в службе РХЗ в составе СПСЧ наиболее высокая. Службу РХЗ 1-го разряда предлагается создать в Московской, Свердловской и Ростовской областях, в Красноярском и Приморском краях и в г. Санкт-Петербурге. В 21 субъекте предлагается использовать службу РХЗ 2-го разряда. В остальных субъектах предложено присвоить службе РХЗ 3-ий разряд.

Обсуждение и заключения. Разработанная с использованием теории нечетких множеств математическая модель позволит более дифференцированно подходить к созданию службы РХЗ в составе СПСЧ и повысить эффективность функционирования данной службы и СПСЧ в целом. Представленная модель может быть применена для обоснования необходимости использования других служб и групп в составе СПСЧ.

Ключевые слова: нечеткое множество, специализированная пожарно-спасательная часть, чрезвычайная ситуация, пожар, риск, радиационная и химическая защита.

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Для цитирования. Маштаков В.А., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю. и др. Обоснование необходимости использования службы радиационной и химической защиты в составе специализированных пожарно-спасательных частей в субъектах Российской Федерации. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(2):27–37. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-27-37>

Justification of the Need to Use the Radiation and Chemical Protection Service as Part of Special Fire and Rescue Units in the Subjects of the Russian Federation

Vladislav A Mashtakov  , Evgeniy V Bobrinev , Elena Yu Udavtsova , Andrey A Kondashov ,
Evgeniy S Treshchin 

All-Russian Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 7, VNIIPPO md., Balashikha, Russian Federation

 otdel_1_3@mail.ru

Abstract

Introduction. Recently, much attention has been paid to the issues of long-term development of specialized fire and rescue units of the Federal Fire Service of the State Fire Service. In this regard, there is a need to develop criteria to justify the use of a particular service as part of specialized fire and rescue units. Therefore, the objective of this study is to develop a mathematical model to justify the need to use radiation and chemical protection services as part of specialized fire and rescue units in the subjects of the Russian Federation.

Materials and Methods. Justification of the need to use radiation and chemical protection services as part of specialized fire and rescue units has been carried out using the theory of fuzzy sets. The mathematical model takes into account the climatic and geographical features of the subjects, indicators of social, technical and economic development, and the risks of emergencies and fires. It also takes into account the availability of forces and means of a Unified State system for the prevention and liquidation of emergency situations in each subject of the Russian Federation. In total, 15 indicators were selected that characterize the need to use radiation and chemical protection services as part of specialized fire and rescue units. A desirability function is defined for each indicator, which shows which values of the indicator are the most acceptable from the point of view of the need to use radiation and chemical protection services as part of specialized fire and rescue units.

Results. Using the developed model, the subjects of the Russian Federation are identified in which the need for radiation and chemical protection service as part of specialized fire and rescue units is the highest. It is proposed to create a radiation and chemical protection service of the 1st category in the Moscow, Sverdlovsk and Rostov regions, in the Krasnoyarsk and Primorsky Territories and in St. Petersburg. In 21 subjects it is proposed to use the radiation and chemical protection service of the 2nd category. In other subjects, it is proposed to assign the 3rd category to the radiation and chemical protection service.

Discussion and Conclusion. The mathematical model developed using the theory of fuzzy sets will allow a more differentiated approach to the creation of a radiation and chemical protection service as part of specialized fire and rescue units and increase the efficiency of the functioning of this service and specialized fire and rescue units as a whole. The presented model can be applied to justify the need to use other services and groups as part of specialized fire and rescue units.

Keywords: fuzzy set, specialized fire and rescue unit, emergency, fire, risk, radiation and chemical protection.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the editorial board of the journal and the reviewer for their professional analysis and recommendations for correcting the article.

For citation. Mashtakov VA., Bobrinev EV., Udavtsova EYu, et al. Justification of the Need to Use the Radiation and Chemical Protection Service as Part of Special Fire and Rescue Units in the Subjects of the Russian Federation. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):27–37. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-27-37>

Введение. На специализированные пожарно-спасательные части ФПС ГПС (далее — СПСЧ) в территориальных гарнизонах пожарной охраны возлагаются задачи по тушению крупных пожаров в населенных пунктах и на объектах, проведению аварийно-спасательных, водолазных и иных специальных инженерно-технических работ, связанных с ликвидацией пожаров, ликвидацией последствий техногенных и природных чрезвычайных ситуаций [1, 2].

Согласно типовому штатному расписанию (приказ МЧС от 21.03.2014 № 129 «О внесении изменений в приказ МЧС России от 30.12.2005 № 1027 и признании утратившими силу приказов МЧС России и отдельных положений приказов МЧС России») в состав СПСЧ могут входить следующие службы и группы:

- водолазная служба;
- медико-психологическая служба;
- служба телекоммуникации и связи;

- инженерная служба;
- служба радиационной и химической защиты;
- служба тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ;
- кинологовическая группа;
- группа пиротехнических работ;
- группа технического обеспечения и обслуживания;
- группа робототехнических средств и беспилотных летательных аппаратов.

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам перспективного развития СПСЧ [2]. В связи с этим возникла необходимость сформулировать критерии для обоснования использования той или иной службы в составе СПСЧ.

Целью настоящего исследования является разработка математической модели с применением теории нечетких множеств [3–6] для определения необходимости использования службы радиационной и химической защиты (далее — РХЗ) в составе СПСЧ для обеспечения пожарной безопасности и защиты территорий от чрезвычайных ситуаций в субъектах Российской Федерации.

Служба РХЗ в СПСЧ Главных управлений МЧС России по субъектам Российской Федерации создается для обеспечения мер безопасности и повышения готовности СПСЧ к тушению пожаров, ликвидации аварийных ситуаций на объектах с наличием химически опасных веществ, а также тушения пожаров и проведения связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ на объектах с наличием радиоактивных веществ и других источников ионизирующих излучений.

Материалы и методы. Для разработки математической модели был сформирован перечень показателей, которые характеризуют необходимость использования СПСЧ и отдельных служб (групп) СПСЧ в субъектах Российской Федерации. Всего отобрано 34 показателя. Из этих показателей выделены те, которые характеризуют необходимость использования службы РХЗ. Все показатели разбиты на три группы.

Природно-климатические и географические особенности субъекта характеризуют следующие показатели:

- площадь территории;
- сейсмическая опасность;
- наличие горных массивов;
- социальные и технико-экономические факторы, которые включают следующие показатели;
- доля промышленного производства в общем объеме;
- степень износа основных производственных фондов;
- протяженность автомобильных дорог;
- протяженность железных дорог;
- количество радиационно-опасных объектов;
- количество химически опасных объектов;
- количество взрывопожароопасных объектов.

В третью группу входят риски возникновения чрезвычайных ситуаций и пожаров, а также показатели, характеризующий наличие сил и средств РСЧС в рассматриваемом и соседних субъектах Российской Федерации:

- среднее расстояние до ближайшей СПСЧ, в которой есть служба РХЗ;
- среднее расстояние до ближайшего подразделения сил РСЧС, в котором есть служба РХЗ;
- наличие службы РХЗ в СПСЧ в рассматриваемом субъекте Российской Федерации;
- риск чрезвычайных ситуаций, связанных с химической и радиационной опасностью;
- риск чрезвычайных ситуаций, связанных со взрывами, обрушениями.

Для каждого показателя определена функция желательности [7, 8], значения которой лежат в интервале от 0 до 1. Функция желательности демонстрирует, какие значения показателя являются наиболее приемлемыми с точки зрения необходимости использования службы РХЗ в составе СПСЧ.

Если с увеличением значения показателя востребованность службы РХЗ возрастает, функция желательности имеет вид:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1, \\ \frac{x-x_1}{x_2-x_1}, & x_1 \leq x \leq x_2, \\ 1, & x > x_2. \end{cases} \quad (1)$$

Если большее значение показателя соответствует меньшей востребованности службы РХЗ, функция желательности имеет вид:

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1, & x < x_1, \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0, & x > x_2. \end{cases} \quad (2)$$

Граничные значения x_1 и x_2 для каждого показателя определяются путем анализа статистических данных. Функции $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$ используются для показателей, значения которых меняются непрерывно.

Для формализации показателей, задаваемых на качественном уровне, используются лингвистические оценки степени выраженности показателя. Функция желательности для таких показателей принимает дискретные значения.

Для показателя «сейсмическая опасность» функция желательности имеет вид:

$$\mu_3(y) = \begin{cases} 0, & y < 6, \\ 0,2, & y = 6, \\ 0,4, & y = 7, \\ 0,6, & y = 8, \\ 0,8, & y = 9, \\ 1, & y \geq 10, \end{cases} \quad (3)$$

где величина y характеризует наличие в субъекте Российской Федерации населенных пунктов с указанной сейсмической интенсивностью для степени сейсмической опасности C (согласно своду правил СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах»).

Для показателя «наличие горных массивов» функция желательности имеет вид:

$$\mu_4(z) = \begin{cases} 0, & z = 0, \\ 0,25, & 0 \leq z < 0,2, \\ 0,5, & 0,2 \leq z < 0,4, \\ 0,75, & 0,4 \leq z < 0,6, \\ 1, & z \geq 0,6, \end{cases} \quad (4)$$

где величина z характеризует долю территории субъекта Российской Федерации, занятую горными массивами.

Для показателя «наличие службы РХЗ в СПСЧ» функция желательности имеет вид:

$$\mu_5(r) = \begin{cases} 0, & \text{если служба РХЗ создана,} \\ 1, & \text{если служба РХЗ отсутствует.} \end{cases} \quad (5)$$

Интегральная оценка необходимости использования службы РХЗ в СПСЧ в субъекте Российской Федерации определяется по формуле:

$$W = \sum_{m=1}^3 \beta_m w_m, \quad (6)$$

где β_m — весовой множитель для m -ой группы показателей.

Обобщенная оценка w_m для m -ой группы показателей для субъекта Российской Федерации определяется по формуле:

$$w_m = \sum_{k=1}^{N_m} \alpha_{km} \mu_k(x_k), \quad (7)$$

где N_m — количество показателей в m -ой группе; α_{km} — весовой множитель для k -го показателя в m -ой группе; μ_k — функция желательности для k -го показателя; x_k — значение k -го показателя для субъекта Российской Федерации.

Для определения весовых множителей для каждой группы показателей использовался метод попарных сравнений на основе лингвистической шкалы оценок [9, 10]. При сравнении i -го и j -го показателей ставится оценка a_{ij} в зависимости от степени важности этих показателей с точки зрения необходимости использования службы РХЗ в СПСЧ от 1 (если показатели одинаково значимы) до 9 (если i -ый показатель строго предпочтительней j -го). Оценка сравнения j -го показателя с i -ым имеет обратное значение $1/a_{ij}$.

В качестве примера в таблице 1 приведена матрица попарных сравнений для показателей, характеризующих социально- и технико-экономические особенности субъекта Российской Федерации. Названия показателей приведены в таблице 2.

Искомые значения весовых множителей $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ для каждой группы показателей являются решением оптимизационной задачи

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (a_{ij} \alpha_j - \alpha_i)^2 \rightarrow \min; \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1, \quad (8)$$

которое находится методом неопределенных множителей Лагранжа [11]. Оптимизационная задача (8) сводится к системе из $N+1$ линейных уравнений, решением которой являются искомые весовые множители α_i и множитель Лагранжа λ .

Таблица 1

Матрица парных сравнений для показателей, характеризующих социально- и технико-экономические особенности субъекта Российской Федерации, с точки зрения необходимости использования службы РХЗ в СПСЧ

№ пок.	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0,33	0,50	0,25	0,25	1
2	1	1	0,33	0,50	0,25	0,25	1
3	3	3	1	3	1	1	5
4	2	2	0,33	1	0,33	0,33	1
5	4	4	1	3	1	1	4
6	4	4	1	3	1	1	4
7	1	1	0,20	1	0,25	0,25	1

В таблице 2 приведены вид функции желательности и ее параметры, расчетные значения весовых множителей α_{km} для показателей, входящих в каждую группу, а также весовые множители β_m для каждой из трех групп показателей.

Таблица 2

Параметры функции желательности и весовые множители для показателей, характеризующих необходимость использования службы РХЗ в СПСЧ

№ п/п	Название показателя	Функция	Значение x_1	Значение x_2	Весовой множитель α_{km}
Природно-климатические и географические характеристики ($\beta_1 = 0,127$)					
1	Площадь территории, тыс. км ²	$\mu_1(x)$	20	200	0,583
2	Сейсмическая опасность	$\mu_3(x)$	—	—	0,258
3	Наличие горных массивов	$\mu_4(x)$			0,159
Социально- и технико-экономические характеристики ($\beta_2 = 0,222$)					
1	Доля промышленного производства в общем объеме, %;	$\mu_2(x)$	20	50	0,063
2	Степень износа основных производственных фондов, %	$\mu_1(x)$	40	60	0,063
3	Протяженность автомобильных дорог, тыс. км	$\mu_1(x)$	5	20	0,239
4	Протяженность железных дорог, тыс. км	$\mu_1(x)$	0,5	2	0,084
5	Количество радиационно-опасных объектов, ед.	$\mu_1(x)$	0	5	0,247
6	Количество химически-опасных объектов, ед.	$\mu_1(x)$	30	100	0,247
7	Количество взрывопожароопасных объектов, ед.	$\mu_1(x)$	50	150	0,057
Риски возникновения чрезвычайных ситуаций и пожаров ($\beta_3 = 0,651$)					
1	Расстояние до ближайшей СПСЧ, в которой есть служба РХЗ, км	$\mu_1(x)$	50	500	0,075
2	Расстояние до ближайшего подразделения РСЧС, в котором есть служба РХЗ, км	$\mu_1(x)$	50	500	0,075
3	Наличие службы РХЗ в СПСЧ	$\mu_5(x)$	—	—	0,703
4	Риск чрезвычайных ситуаций, связанных с химической и радиационной опасностью, год ⁻¹	$\mu_1(x)$	0	0,2	0,085
5	Риск чрезвычайных ситуаций, связанных со взрывами, обрушениями, год ⁻¹	$\mu_1(x)$	0	0,4	0,061

Результаты исследования. Разработанная математическая модель была применена для определения необходимости использования службы РХЗ в составе СПСЧ для обеспечения пожарной безопасности и защиты территорий от чрезвычайных ситуаций в субъектах Российской Федерации. Значения показателей социально-

экономического развития субъектов определены по данным Федеральной службы государственной статистики¹. Количество опасных объектов в субъектах определено с использованием данных [12]. Риски возникновения ЧС определены на основании анализа данных по видам источников возникновения и характера ЧС в субъектах Российской Федерации за период 2010-2021 гг.

На первом этапе были определены субъекты Российской Федерации, в которых необходимо использовать СПСЧ 1-го разряда. Для этих субъектов должно быть выполнено условие:

$$W \geq W_{\text{гр}} = \frac{2W_{\text{max}} + W_{\text{min}}}{3}, \quad (9)$$

где W — значение интегрального показателя необходимости использования СПСЧ в субъекте Российской Федерации; W_{min} и W_{max} — минимальное и максимальное значения интегрального показателя среди субъектов Российской Федерации. Граничное значение $W_{\text{гр}}$ получено равным 0,650.

По результатам расчетов СПСЧ 1-го разряда предлагается использовать в шести субъектах Российской Федерации: в Московской, Свердловской и Ростовской областях, в Красноярском и Приморском краях и в г. Санкт-Петербурге. Во всех СПСЧ 1-го разряда службе РХЗ присваивается 1-ый разряд.

На втором этапе для остальных субъектов Российской Федерации были определены значения показателя «среднее расстояние до ближайшей СПСЧ» с учетом СПСЧ 1-го разряда и вычислены значения интегрального показателя необходимости использования службы РХЗ в СПСЧ.

Службу РХЗ 2-го разряда предлагается использовать в СПСЧ, если выполнено условие:

$$W_{\text{РХЗ}} \geq W_{\text{РХЗ,гр}} = \frac{2W_{\text{РХЗ,max}} + W_{\text{РХЗ,min}}}{3}, \quad (10)$$

где $W_{\text{РХЗ}}$ — значение интегрального показателя необходимости использования службы РХЗ в СПСЧ в субъекте Российской Федерации; $W_{\text{РХЗ,min}}$ и $W_{\text{РХЗ,max}}$ — минимальное и максимальное значения интегрального показателя среди субъектов Российской Федерации, в которых нет СПСЧ 1-го разряда. Граничное значение $W_{\text{РХЗ,гр}}$ получено равным 0,759.

В оставшихся субъектах Российской Федерации предлагается в СПСЧ использовать службу РХЗ 3-го разряда.

Полученные значения интегрального показателя необходимости использования службы РХЗ в СПСЧ в субъектах Российской Федерации $W_{\text{РХЗ}}$, приведены на рис. 1. Службу РХЗ 1-го разряда предлагается использовать в 6 субъектах Российской Федерации (выделены красным цветом на рисунке), службу РХЗ 2-го разряда — в 21 субъекте (выделены желтым цветом), 3-го разряда — в 58 субъектах (выделены зеленым цветом).

Проведено сравнение результатов расчетов по математической модели с фактическим наличием службы РХЗ в СПСЧ в субъектах Российской Федерации. Для этого были собраны сведения из Главных управлений МЧС России по субъектам Российской Федерации о наличии и потребности в службе РХЗ в составе СПСЧ.

Из субъектов, вошедших в красную группу, служба РХЗ не создана только в СПСЧ г. Санкт-Петербург.

Из субъектов, вошедших в желтую группу, служба РХЗ в СПСЧ создана в 19 субъектах из 21.

¹ Регионы России. Социально-экономические показатели. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://www.gks.ru/bgd/regl/b20_14p/Main.htm (дата обращения: 20.02.2023)

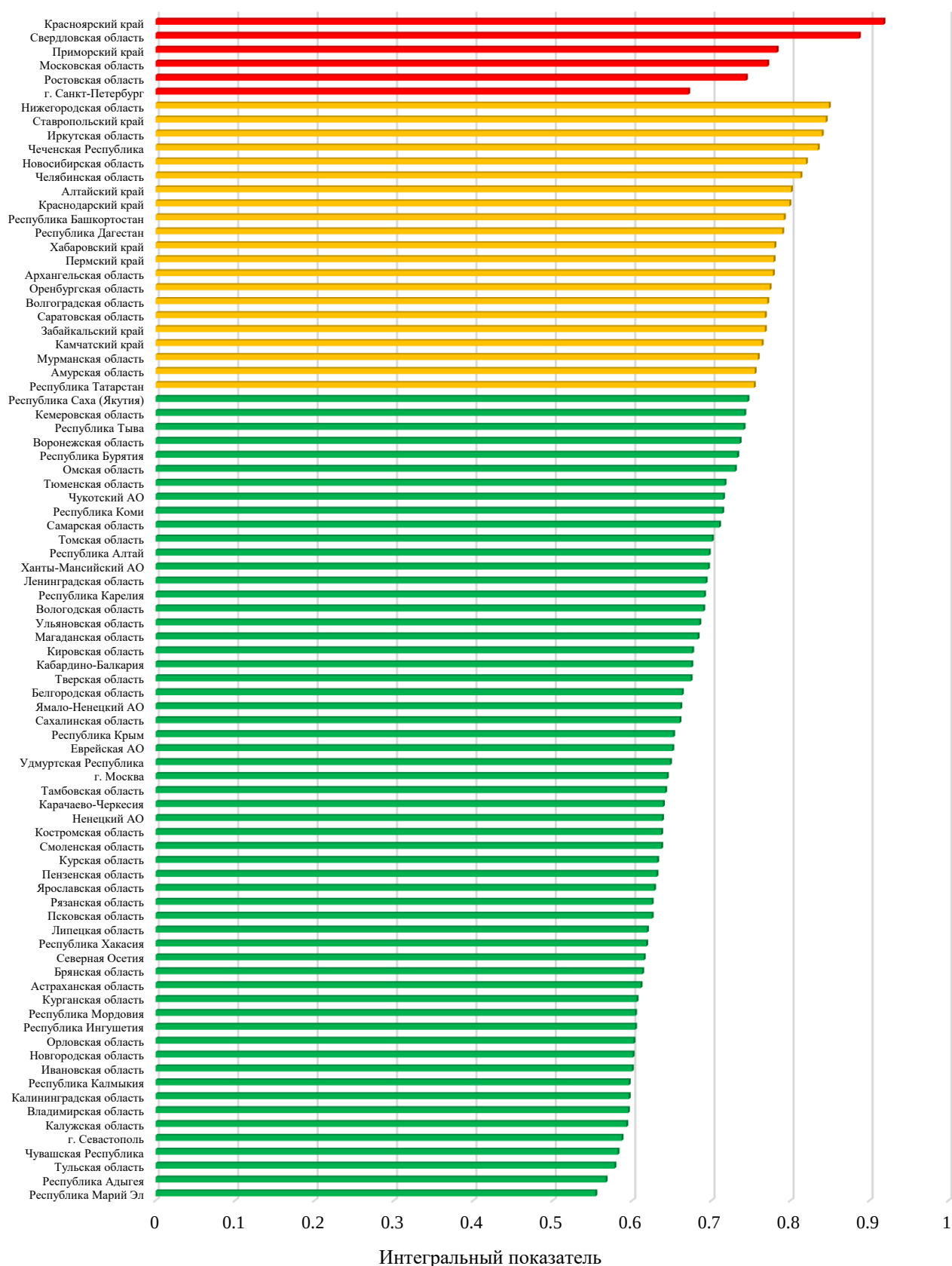


Рис. 1. Распределение субъектов Российской Федерации по интегральному показателю необходимости использования службы РХЗ в СПСЧ в субъектах Российской Федерации

Из субъектов, вошедших в зеленую группу, служба РХЗ в СПСЧ есть в 40 субъектах Российской Федерации из 58, 9 субъектов заявили о необходимости создания службы РХЗ, еще 5 субъектов, в которых создана данная служба, заявили об отсутствии потребности в ней.

Была выполнена проверка существования статистической взаимосвязи между результатами расчетов по математической модели и фактическим наличием службы РХЗ в СПСЧ в субъектах Российской Федерации с использованием χ^2 критерия Пирсона [13, 14]. Полученные результаты можно отобразить в виде таблицы сопряженности (таблица 3).

Таблица 3

Таблица сопряженности для проверки взаимосвязи между результатами расчетов по математической модели и фактическим наличием или заявленной потребности в службе РХЗ в СПСЧ в субъектах Российской Федерации

Название группы	Количество субъектов Российской Федерации, в которых		Общее количество субъектов Российской Федерации
	создана служба РХЗ или есть потребность	служба РХЗ отсутствует или нет потребности	
Красная группа	5	1	6
Желтая группа	19	2	21
Зеленая группа	44	14	58
Всего	68	17	85

Значение χ^2 -статистики для двухпольной таблицы 3 равно 2,11. Критическое значение критерия χ^2 для двух степеней свободы при уровне значимости 0,05 составляет 5,99. Расчетное значение меньше критического, что говорит об отсутствии взаимосвязи между результатами расчетов по математической модели и фактическим наличием службы РХЗ в СПСЧ в субъектах Российской Федерации. Это указывает на то, что службы РХЗ в составе СПСЧ в настоящее время созданы без учета рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и пожаров и других особенностей субъектов Российской Федерации. Использование предложенного в статье подхода позволит более дифференцированно подходить к созданию службы РХЗ в составе СПСЧ и повысить эффективность функционирования данной службы и СПСЧ в целом.

Обсуждение и заключения. Разработана математическая модель на основе теории нечетких множеств для обоснования необходимости службы радиационной и химической защиты в составе специализированных пожарно-спасательных частей для обеспечения пожарной безопасности и защиты территорий от чрезвычайных ситуаций в субъектах Российской Федерации. Модель учитывает природно-климатические и географические особенности субъектов, показатели социального и технико-экономического развития и риски возникновения чрезвычайных ситуаций и пожаров. Также учитывается наличие сил и средств РСЧС в рассматриваемом и соседних субъектах Российской Федерации.

Предложено присвоить каждой СПСЧ разряд от 1-го до 3-го, в зависимости от масштаба задач, к решению которых привлекается СПСЧ с учетом рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и пожаров. Аналогичным образом разрядность предложено устанавливать для служб и групп в составе СПСЧ.

На основе разработанной модели проведены расчеты интегральной оценки для обоснования необходимости использования службы РХЗ в СПСЧ для каждого субъекта Российской Федерации. Определены субъекты Российской Федерации, в которых потребность в службе РХЗ в составе СПСЧ наиболее высокая. В этих субъектах предлагается использовать службу РХЗ 1-го и 2-го разрядов.

Разработанная модель может быть применена для обоснования необходимости использования других служб (групп) в составе СПСЧ.

Список литературы

1. Киселёв Д.В. Модели управления развитием специализированных пожарно-спасательных частей. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2020;3:77–83. <https://doi.org/10.25257/FE.2020.3.77-83>
2. Дагиров Ш.Ш., Алешков М.В., Ищенко А.Д. и др. *Специализированные подразделения пожарной охраны: монография*. Москва: Академия ГПС МЧС России; 2017. 173 с.
3. Пегат А. *Нечеткое моделирование и управление*. 2-е изд. Москва: Бином. Лаборатория знаний; 2013. 798 с.
4. Tzeng G.H., Huang J.J. *Fuzzy Multiple Objective Decision Making*. New York: Chapman and Hall/CRC; 2013. P. 1–299. <https://doi.org/10.1201/b15337>

5. Zhu K., Zhan J. Fuzzy parameterized fuzzy soft sets and decision making. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. 2016;7(6):1207–1212. <https://doi.org/10.1007/s13042-015-0449-z>
6. Bloch I. Fuzzy sets for image processing and understanding. *Fuzzy Sets and Systems*. 2015;281:280–291. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.06.017>
7. Dubois D., Perny P. A review of fuzzy sets in decision sciences: Achievements, limitations and perspectives. *International Series in Operations Research and Management Science*. 2016;233:637–691. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47024-1_11
8. Straszecka E., Pander E. Possible Use of Fuzzy Sets Similarity for Patient's Parameters Observation. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021;1081:92–102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47024-1_11
9. Коршунов В.А. Ограничение «семь плюс-минус два» и многоуровневое структурирование информации. *Вестник образовательного консорциума Среднерусский университет. Серия: Гуманитарные науки*. 2014 4:12–20.
10. Khan A., Hadi A., Khan S.A., Hussain F. A decision making approach based on multi-fuzzy bipolar soft sets. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2019;37(2):1879–1892. [10.3233/JIFS-179250](https://doi.org/10.3233/JIFS-179250)
11. Fischer A., Scheck W., Izmailov A.F. et al. Adjusting dual iterates in the presence of critical Lagrange multipliers. *SIAM Journal on Optimization*. 2020;30(2):1555–1581. <https://doi.org/10.1137/19M1255380>
12. Цаликов Р.Х., Акимов В.А., Козлов К.А. *Оценка природной, техногенной и экономической безопасности России*. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России; 2009. 464 с.
13. Гржибовский А.М. Анализ номинальных данных (независимые наблюдения). *Экология человека*. 2008;6:58–68.
14. Balakrishnan N., Voinov V., Nikulin M.S. *Chi-squared goodness of fit tests with applications*. Amsterdam: Elsevier Inc.; 2013. 229 p.

References

1. Kisilev DV. Models for managing the development of specialized fire and rescue unit. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya*. 2020;3:77–83. <https://doi.org/10.25257/FE.2020.3.77-83> (In Russ.).
2. Dagirov ShSH, Aleshkov MV, Ishchenko AD, et al. *Spetsializirovannyye podrazdeleniya pozharnoi okhrany: monografiya*. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii; 2017. 173 p. (In Russ.).
3. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie*. 2nd ed. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy; 2013. 798 p. (In Russ.).
4. Tzeng GH., Huang JJ. *Fuzzy Multiple Objective Decision Making*. New York: Chapman and Hall/CRC; 2013. P. 1–299. <https://doi.org/10.1201/b15337>
5. Zhu K., Zhan J. Fuzzy parameterized fuzzy soft sets and decision making. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. 2016;7(6):1207–1212. <https://doi.org/10.1007/s13042-015-0449-z>
6. Bloch I. Fuzzy sets for image processing and understanding. *Fuzzy Sets and Systems*. 2015;281:280–291. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.06.017>
7. Dubois D., Perny P. A review of fuzzy sets in decision sciences: Achievements, limitations and perspectives. *International Series in Operations Research and Management Science*. 2016;233:637–691. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47024-1_11
8. Straszecka E., Pander E. Possible Use of Fuzzy Sets Similarity for Patient's Parameters Observation. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021;1081:92–102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47024-1_11
9. Korshunov VA. The «seven plus or minus two» limitation and multilevel structuring of information. *Vestnik obrazovatel'nogo konsortsiума Srednerusskii universitet. Seriya: Gumanitarnye nauki*. 2014 4:12–20. (In Russ.).
10. Khan A., Hadi A., Khan SA., Hussain F. A decision making approach based on multi-fuzzy bipolar soft sets. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2019;37(2):1879–1892. [10.3233/JIFS-179250](https://doi.org/10.3233/JIFS-179250)
11. Fischer A., Scheck W., Izmailov A.F. et al. Adjusting dual iterates in the presence of critical Lagrange multipliers. *SIAM Journal on Optimization*. 2020;30(2):1555–1581. <https://doi.org/10.1137/19M1255380>
12. Tsalikov RKh, Akimov VA, Kozlov KA. *Otsenka prirodnoi, tekhnogennoi i ekonomicheskoi bezopasnosti Rossii*. Moscow: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po problemam grazhdanskoi oborony i chrezvychaynykh situatsii MChS Rossii; 2009. 464 p. (In Russ.).

13. Grzhibovskii AM. Analiz nominal'nykh dannyykh (nezavisimye nablyudeniya). *Human Ecology* 2008;6:58–68. (In Russ.).

14. Balakrishnan N., Voinov V., Nikulin M.S. *Chi-squared goodness of fit tests with applications*. Amsterdam: Elsevier Inc.; 2013. 229 p.

Об авторах:

Маштаков Владислав Александрович, начальник отдела научно-исследовательского центра организационно-управленческих проблем пожарной безопасности Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны (143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12), [ORCID](#), otdel_1_3@mail.ru

Бобринев Евгений Васильевич, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра организационно-управленческих проблем пожарной безопасности Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны (143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12), кандидат биологических наук, [ORCID](#), otdel_1_3@mail.ru

Удавцова Елена Юрьевна, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра организационно-управленческих проблем пожарной безопасности Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны (143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12), кандидат технических наук, [ORCID](#), otdel_1_3@mail.ru

Кондашов Андрей Александрович, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра организационно-управленческих проблем пожарной безопасности Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны (143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12), кандидат физико-математических наук, [ORCID](#), [ScopusID akond2008@mail.ru](mailto:ScopusID_akond2008@mail.ru)

Трещин Евгений Сергеевич, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра организационно-управленческих проблем пожарной безопасности Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны (143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12), [ORCID](#), akond2008@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2023.

Поступила после рецензирования 25.04.2023.

Принята к публикации 05.05.2023.

Заявленный вклад авторов:

В.А. Маштаков — верификация статистических данных, редактирование окончательного варианта статьи. Е.В. Бобринев — сбор статистических данных, сопоставление результатов расчета с фактическими данными. Е.Ю. Удавцова — проведение расчетов по математической модели, редактирование окончательного варианта статьи. А.А. Кондашов — разработка математической модели, написание первого варианта статьи. Е.С. Трещин — подготовка матриц парных сравнений, определение параметров функций желательности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vladislav A Mashtakov, head of Department of the Research Center for Organizational and Managerial Problems of Fire Safety, All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia (12, VNIPO md., Balashikha, Moscow reg., 143903, RF), [ORCID](#), otdel_1_3@mail.ru

Evgeniy V Bobrinev, leading researcher of the Research Center for Organizational and Managerial Problems of Fire Safety, All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia (12, VNIPO md., Balashikha, Moscow reg., 143903, RF), Cand. Sci. (Biol.), [ORCID](#), otdel_1_3@mail.ru

Elena Yu. Udavtsova, leading researcher at the Research Center for Organizational and Managerial Problems of Fire Safety, All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia (12, VNIIPO md., Balashikha, Moscow reg., 143903, RF), Cand. Sci. (Eng.), [ORCID](#), otdel_1_3@mail.ru

Andrey A. Kondashov, leading researcher at the Research Center for Organizational and Managerial Problems of Fire Safety, All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia (12, VNIIPO md., Balashikha, Moscow reg., 143903, RF), Cand. Sci. (Phys.-Math.), [ORCID](#), [ScopusID akond2008@mail.ru](mailto:akond2008@mail.ru)

Evgeniy S. Treshchin, senior researcher at the Research Center for Organizational and Managerial Problems of Fire Safety, All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia (12, VNIIPO md., Balashikha, Moscow reg., 143903, RF), [ORCID](#), akond2008@mail.ru

Received 19.04.2023.

Revised 25.04.2023.

Accepted 05.05.2023.

Claimed contributorship:

VA Mashtakov: verification of statistical data, editing of the final version of the article. EV Bobrinev: collection of statistical data, comparison of calculation results with actual data. EY Udavtsova: calculations with the use of a mathematical model, editing the final version of the article. AA Kondashov: development of a mathematical model, writing the first version of the article. ES Treshchin: preparation of matrices of paired comparisons, determination of parameters of desirability functions.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 667:620.199

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-38-46>

Научная статья



Огнестойкость строительного элемента с интумесцентной огнезащитой: стандартная оценка и экспресс-анализ

А.В. Мартынов¹ , В.В. Греков¹ , О.В. Попова² ¹ ООО «Строительство Качество Безопасность», Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Космонавтов, 37, оф. 68, 69² Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1 olvp2808@rambler.ru

Аннотация

Введение. Рассматривается проблема оценки огнестойкости строительных конструкций с интумесцентной огнезащитой. Для получения достоверных результатов нужно проводить огневое испытание только после полной готовности интумесцентного покрытия на объекте. Такой подход позволит выявить низкое качество материала и предотвратить обрушение при возможном пожаре. Цель исследования — испытание экспресс-анализа интумесцентных покрытий в сравнении со стандартными методами оценки огнестойкости.

Материалы и методы. Исследовались элементы строительных конструкций, покрытые огнезащитной интумесцентной краской Defender M Solvent с различным содержанием разбавителя. Огнестойкость покрытий определяли двумя методами. Первый — экспресс-анализ. Фиксировались следующие показатели:

- общий вид пенококса (ПК);
- коэффициент вспучивания;
- прочность ПК на сжатие и на сдвиг-отрыв приграничного слоя.

Второй — стандартный подход согласно требованиям ISO 834–75 (ГОСТ 30247.0–94). Показатели:

- время достижения критической температуры;
- критический прогиб при нагревании.

Результаты исследования. Кроме заявленных выше показателей тестирование учитывало также количество разбавителя. Рассматривались коэффициент вспучивания ПК, сила сжатия ПК, предел прочности и плотность. Выявленные закономерности систематизированы в табличном виде. Полученные показатели сопоставлялись с техническими требованиями к материалу. Зафиксирован период, в течение которого стальная подложка образца достигает критической температуры. Установлено, что с увеличением этого времени повышается коэффициент вспучивания защитного слоя (ПК) и его прочности на сдвиг-отрыв. Одновременно уменьшаются значения прочности на сжатие и плотности ПК. При разбавлении интумесцентной краски сверх нормы ухудшаются параметры огнезащиты и не достигается предел огнестойкости R45. Итоги изысканий визуализированы в виде диаграмм. Они подтверждают, что экспресс-анализ позволяет обоснованно судить о пригодности или непригодности краски для огнезащиты, если требуемый предел огнестойкости — R45.

Обсуждение и заключения. В сопоставлении с результатами применения стандартных методик подтверждена эффективность методики экспресс-анализа и корректность результатов оценки интумесцентной огнезащиты. В условиях стройки экспресс-анализа ПК будет достаточно для определения качества интумесцентного огнезащитного покрытия.

Ключевые слова: огнестойкость, интумесцентное покрытие, пенококс, метод экспресс-анализа, предел прочности, критическая температура, коэффициент вспучивания, пожаробезопасные конструкции.

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Для цитирования. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Огнестойкость строительного элемента с интумесцентной огнезащитой: стандартная оценка и экспресс-анализ. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2):38–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-38-46>

Original article

Fire Resistance of a Building Element with Intumescent Fire Protection: Standard Assessment and Express Analysis

Aleksey V Martynov¹ , Vasiliy V Grekov¹ , Olga V Popova² 

² Stroitel'stvo Kachestvo Bezopasnost' OOO, 68, 69 office, 37, Kosmonavtov Avenue, Rostov-on-Don, Russian Federation

¹ Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ olvp2808@rambler.ru

Abstract

Introduction. The paper considers the problem of fire resistance assessment of building structures with intumescent fire protection. For the results reliability, a fire test should be carried out only when the intumescent coating at the facility is ready, which will make it possible to detect hidden factors of violation of its quality and prevent collapse in case of a possible fire. The work objective is to test the express analysis of intumescent coatings in comparison with standard methods for fire resistance assessment.

Materials and Methods. The elements of building structures covered with fire-resistant intumescent paint Defender M Solvent with different diluent content were studied. The fire resistance of the coatings was determined by two methods. The first one is an express analysis. The following indicators were recorded:

- general appearance of the coked cellular material (CCM);
- swelling coefficient;
- CCM compressive and shear-tear strength of the boundary layer.

The second one is a standard approach according to the requirements of ISO 834-75 (GOST 30247.0-94). The indicators were:

- time to reach the critical temperature;
- critical deflection during heating.

Results. In addition to the above indicators, testing also took into account the amount of diluent. The CCM swelling coefficient, CCM compression force, tensile strength and density were considered. The revealed patterns are systematized in a table. The obtained indicators were compared with the technical requirements for the material. The period during which the steel substrate of the sample reaches a critical temperature is recorded. It is established that with an increase in this time, the coefficient of swelling of the protective layer (CCM) and its shear-tear strength increases. At the same time, the values of compressive strength and CCM density decrease. When the intumescent paint is diluted beyond the norm, the fire protection parameters deteriorate and the fire resistance limit R45 is not reached. The research results are visualized in the form of diagrams. They confirm that the express analysis makes it possible to reasonably judge the suitability or unsuitability of the paint for fire protection, if the required fire resistance limit is R45.

Discussion and Conclusions. In comparison with the results of the application of standard techniques, the effectiveness of the express analysis technique and the correctness of the results of the assessment of intumescent fire protection were confirmed. In construction conditions, an express CCM analysis will be sufficient to determine the quality of an intumescent fire retardant coating.

Keywords: fire resistance, intumescent coating, coked cellular material, express analysis method, tensile strength, critical temperature, swelling coefficient, fireproof structures.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the editorial board of the journal and the reviewer for their professional analysis and recommendations for correcting the article.

For citation. Martynov AV, Grekov VV, Popova OV. Fire Resistance of a Building Element with Intumescent Fire Protection: Standard Assessment and Express Analysis. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2): 38–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-38-46>

Введение. При проектировании относительно пожаробезопасных железобетонных и стальных конструкций широко применяются интумесцентные покрытия. Этим объясняется интерес исследователей к оценке огнезащитной эффективности таких материалов [1–3]. В публикациях критикуются неинформативные методики, основанные на стандартных испытаниях огнестойкости. Для решения проблемы предлагаются

комплексные подходы к изучению эффективности интумесцентных покрытий, которые вспучиваются под действием огня [1, 2]. Они должны соответствовать определенным стандартам. В академических исследованиях затруднительно установить соответствие материала промышленным стандартам. Две основные причины:

- необходимое стационарное оборудование, как правило, недоступно;
- эксперименты требуют длительного времени и значительных ресурсов (в частности, энергетических).

Однако авторы работ [4, 5] используют некоторые промышленные стандарты — кривые номинальной температуры и времени. Отметим, что параметры реального пожара в современном здании могут существенно отличаться от номинальных кривых, определенных в промышленных стандартах [6–8]. Тем не менее промышленные стандарты остаются основным ориентиром. Международный стандарт испытаний на огнестойкость строительных конструкций ISO 834-75 (ГОСТ 30247.0-94)¹ определяет общие требования к методам огневого воздействия для установления предельных состояний.

Исследования и разработки интумесцентных покрытий проходят в разных условиях. Задействуется разное испытательное оборудование. Это позволяет быстро проверять новые рецептуры покрытий [4, 5, 9, 10], проводить испытания в нестандартных условиях пожара [11, 12] и измерять дополнительные параметры [13, 14]. Большинство авторов уделяют внимание прочности и адгезии собственно краски, не обращая внимания на механические свойства пенококса (ПК). Однако готовый лакокрасочный слой не является огнезащитой. Корректнее представить его как запас материалов для формирования такой защиты, т. е. для трансформирования в другой материал — пенококс. Авторы публикаций [15–17] исследовали прочность пенококса на стационарном лабораторном оборудовании.

Эффективность покрытия определяется главным образом толщиной интумесцентного слоя и степенью разбавления готовой краски непосредственно перед нанесением. Все это влияет на качество ПК — толщину слоя и плотность. Современные стандарты не позволяют установить названные показатели при внешнем осмотре слоя краски, измерении его толщины и фиксации условной адгезии [18].

Авторы представленной работы разработали метод экспресс-анализа, который позволяет оперативно выявить фактическую пригодность огнезащиты. При этом задействуется простое и недорогое оборудование, нет необходимости в специальных лабораторных условиях и высоких энергозатратах. Качество огнезащиты можно определить непосредственно на строительной конструкции [19, 20].

Цель работы — обоснование эффективности разработанного авторами экспресс-метода оценки эффективности интумесцентных покрытий строительных конструкций. Предложенный подход испытывается и сравнивается со стандартными способами оценки огнестойкости.

Материалы и методы. При испытаниях огнезащитных свойств элементов металлической строительной конструкции применяли три различных варианта интумесцентного (вспучивающегося) материала:

- краска средней ценовой категории Defender M Solvent ООО «Лаборатория «Евростиль»» с параметрами, заявленными в технической документации (состав 1);
- та же краска, разбавленная 6 % мас. ортоксилола, что немного превышает максимум, заявленный в технической документации (состав 2);
- та же краска, избыточно разбавленная ортоксилолом — 10 % мас. (состав 3).

Отметим, что излишнее разбавление нередко встречается на практике. Речь идет о случаях, когда вязкость краски корректируют с помощью неподходящего, дешевого оборудования для нанесения покрытия или чрезмерно разбавляют с целью экономии краски [18]. По инструкции разбавление не должно превышать 5 %.

В рамках работы защищали два вида конструкций.

1. Горячекатаные двутавры с параллельными полками № 12 (ГОСТ Р 57837-2017). Толщина слоя готового красочного покрытия после сушки — 1–1,2 мм. Вертикально ориентированная в печи конструкция (колонна) испытывалась на огнезащитную эффективность по параметру «время достижения критической температуры».

2. Балки сортамента 35Ш1 длиной 4,2 м с тонкослойным огнезащитным покрытием 0,87 мм. Горизонтально ориентированная в печи балка с нагрузкой испытывалась на огнестойкость конструкции по параметру «критический прогиб при нагревании».

Покрытия после нанесения на конструкции сушили до полного удаления разбавителя — 10–14 дней при температуре +20 °С и влажности не более 80 %. Проводили испытания для каждого образца по разработанному

¹ ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9055248> (дата обращения: 10.04.2023).

методу экспресс-анализа [19], после чего покрытия в местах испытаний восстанавливали. Далее проводили испытания для каждого образца в факельной печи согласно ГОСТ Р 53295-2009² и ГОСТ 30247.1-94³.

Результаты испытаний по методу экспресс-анализа оценивали по показателям:

- общий вид ПК;
- коэффициент вспучивания;
- прочность ПК на сжатие;
- прочность ПК на сдвиг-отрыв приграничного слоя ПК толщиной 1 мм от подложки (по методике, описанной в [19]).

Дополнительно в условиях лаборатории измеряли плотность ПК.

Оценивалось время достижения критической температуры защищаемого материала по ГОСТ Р 53295-2009. Для этого строили температурную кривую — зависимость критической температуры стальной подложки от времени проведения огневого испытания. Условия испытаний:

- температура окружающей среды — +18° С;
- относительная влажность воздуха — 30 %;
- скорость движения воздуха — менее 0,5 м/с.

Средние температуры в огневой камере печи не превышали допустимых отклонений. Огнестойкость конструкции до достижения предельно допустимой деформации балок при огневом воздействии определяли в специальной горизонтальной печи. Балки с покрытиями испытывали под точечной нагрузкой 16 т через каждые 1/3 пролета. В процессе испытаний регистрировали время наступления предельных состояний и их вид, температуру в печи, температуру на необогреваемой поверхности образца, деформацию балки, температурный режим в камере.

Результаты исследования. После проведения огневых испытаний по стандартной методике и методике экспресс-анализа [19] образцы осмотрели и измерили их физико-механические параметры. Результаты свели в таблице 1. Здесь же представлены итоги измерений плотности ПК, не предусмотренные методикой экспресс-анализа [19].

Таблица 1

Результаты испытаний интумесцентной огнезащиты методом экспресс-анализа и по ГОСТ Р 53295-2009

Параметр	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Количество разбавителя в ИК, % мас.	0	5	10
Время достижения критической температуры подложки (+500 °С), мин	47	34	27
Коэффициент вспучивания ПК	36	17	11
Сила сжатия ПК вне газовых пузырей, при инденторе диаметром 3 мм, гс	6	14	27
Предел прочности на сжатие ПК, гс/см ²	86	200	360
Предел прочности на сдвиг и отрыв приграничного слоя ПК от подложки, гс/см	78	56	42
Плотность ПК вне крупных газовых пузырей, г/см ³	0,28	0,44	0,51
Плотность ПК с учетом крупных газовых пузырей, г/см ³	0,28	0,14	0,45

На рис. 1 показаны испытание на огнестойкость в стандартной печи и формирование пенококса из интумесцентной краски составов 1–3 на металлической колонне двутаврового сечения.

² ГОСТ Р 53295-2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071913> (дата обращения: 10.04.2023).

³ ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9055247> (дата обращения: 10.04.2023).



Рис. 1. Результат огневого испытания в стандартной печи двутавровой колонны с интумесцентным покрытием составом 1:
а — через 10 мин после начала обжига; б — через 30 мин

Рассмотрим результаты испытаний стандартным методом. При нагреве образца, покрытого составом 1, через 47 мин фиксируется предельное состояние по параметрам «время достижения критической температуры» (рис. 2) и «критический прогиб при нагревании» (рис. 3). Это подтверждает соответствие состава 1 заявленному в технической документации времени достижения критической температуры (45 мин).

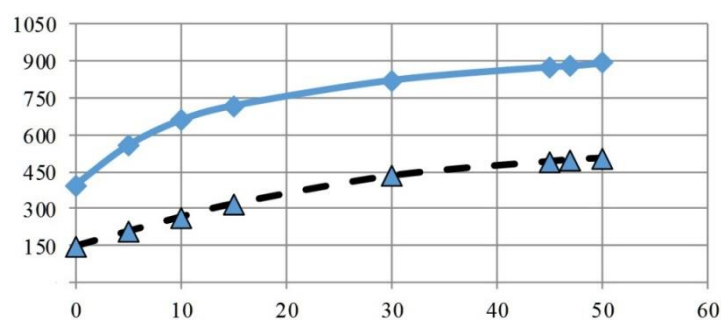


Рис. 2. Время достижения критической температуры образца с покрытием составом 1 (без разбавления).
Сплошная линия — температура нагрева, пунктирная — температура поверхности под слоем ПК. По вертикальной оси указана температура (°C), по горизонтальной — время (мин)

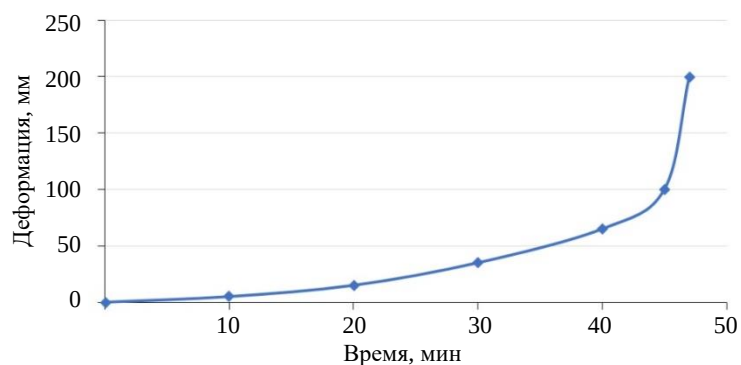


Рис. 3. Зависимость прогиба образца с огнезащитным покрытием состава 1 (без разбавителя) от времени теплового воздействия в огневой камере печи

Результаты экспресс-анализа в части соответствия огнезащитного состава технической документации (коэффициент вспучивания ПК, таблица 1) свидетельствуют о корректности предложенной методики.

При испытании образца с покрытием состава 2 по стандартной методике время достижения предельных состояний составило 34 мин (рис. 4). То есть испытываемый материал не соответствует технической документации, состав нельзя использовать для огнезащиты, если требуемый предел огнестойкости — R45.

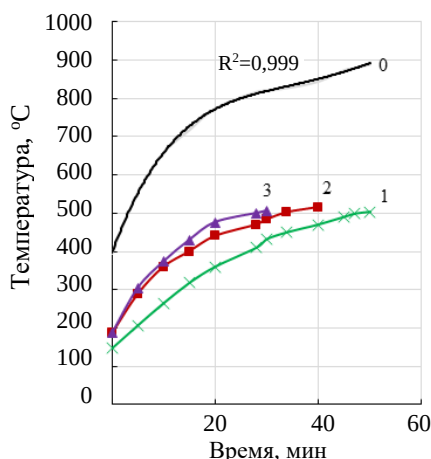


Рис. 4. Динамика изменения температуры в огневой камере (кривая 0) и температуры защищаемой поверхности в процессе испытания образцов 1–3 (кривые 1–3)

Результаты испытаний по методу экспресс-анализа подтверждают непригодность краски, несмотря на то, что коэффициент вспучивания покрытия превышает минимальное значение, указанное в нормативной документации. Полученный ПК внешне неоднороден, заметны крупные газовые полости. Слои ПК вне этих дефектов имеют повышенную прочность и плотность, а также относительно низкую адгезию к защищаемому материалу.

Испытания образца 3 дали следующие результаты. Стальная подложка достигает предельного состояния через 27 мин при испытаниях по стандартной методике (рис. 4). Это свидетельствует о непригодности состава 3 по показателю «время достижения критической температуры» (45 мин). Данный факт подтвердили результаты испытаний экспресс-методом. ПК неоднороден, присутствуют крупные газовые полости. Прочность и плотность слоя ПК вне этих дефектов повышена, адгезия к защищаемому материалу низкая.

Экспресс-анализ позволил установить, что при заданном критическом значении прогиба 200 мм потеря несущей способности у образца 1 наблюдалась через 47 мин, у образца 2 — через 42 мин, у образца 3 — через 35 мин.

Итак, чем больше время нагрева стальной подложки образца до критической температуры, тем выше показатель коэффициента вспучивания защитного слоя ПК и ниже показатель прочности ПК на сжатие (таблица 1, рис. 5).

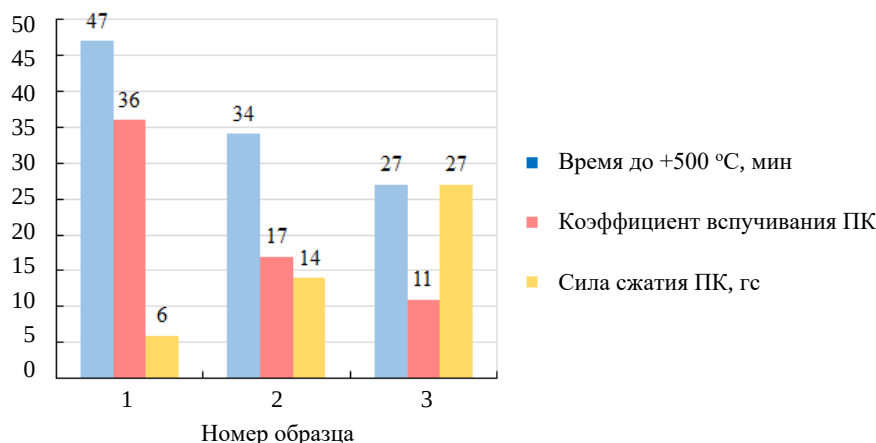


Рис. 5. Результаты испытаний огнестойкости по ГОСТу 30247.0-94 (время достижения критической температуры подложки) и методом экспресс-анализа (коэффициент вспучивания ПК, прочность ПК)

Относительно высокая прочность ПК на сжатие, установленная методом экспресс-анализа для образца 3, предполагает высокую плотность ПК (таблица 1) и увеличение теплопроводности защитного слоя, что сокращает время достижения критической температуры подложки и подтверждается результатами испытаний по ГОСТ 30247.0-94.

Обсуждение и заключения. Предложенный авторами экспресс-анализ огнестойкости интумесцентных покрытий протестировали на двутавровых строительных конструкциях. Результаты сравнили с аналогичной проверкой по ГОСТ 30247.0-94. Сопоставление продемонстрировало корректность авторского подхода.

Итоги испытаний по обеим методикам делятся на три группы. К первой относятся результаты, полученные для покрытий качественной неразбавленной огнезащитной краской, по всем параметрам отвечающие требованиям нормативной документации. Ко второй — результаты испытания покрытий, не обеспечивающих заданные огнезащитные параметры. При этом уменьшается коэффициент вспучивания ПК и его адгезия к подложке, увеличивается прочность и плотность. Для третьей группы характерны значительные отклонения от требуемых параметров. На основании полученных результатов можно утверждать, что оценка параметров ПК по методу экспресс-анализа в условиях строительного объекта является достаточной, чтобы сделать вывод о пригодности или непригодности интумесцентного покрытия для огнезащиты.

Библиографический список

1. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019;162:105712. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>
2. Wail E.D. Fire-Protective and Flame-Retardant Coatings — A State-of-the-Art Review. *Journal of Fire Sciences*. 2011;29(3):259–296. <https://doi.org/10.1177/0734904110395469>
3. Голованов В.И., Крючков Г.И. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожаров. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2021;3:52–60. <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.52-60>
4. Dreyer J.A.H., Weinell C.E., Dam-Johansen K. et al. Review of heat exposure equipment and in-situ characterisation techniques for intumescent coatings. *Fire Safety Journal*. 2021;121:103264. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103264>
5. Lucherini A., Maluk C. Assessing the onset of swelling for thin intumescent coatings under a range of heating conditions. *Fire Safety Journal*. 2019;106:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.014>
6. Ng Y.H., Dasari A., Tan K.H. et al. Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of testing. *Progress in Organic Coatings*. 2021;150:105985. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105985>
7. Андришкин А.Ю., Цой А.А., Симонова М.А. Об основных предпосылках метода испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках. *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2016;1(37):39–46.
8. Акулов А.Ю., Аксенов А.В. Огнезащитные покрытия на основе минеральных термостойких заполнителей для металлоконструкций нефтегазового комплекса. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2011;1:66–70.
9. Рудакова Т.А., Евтушенко Ю.М., Григорьев Ю.А. и др. Пути снижения температуры пенообразования в системе полифосфат аммония-пентаэритрит в интумесцентных системах. *Пожаровзрывобезопасность*. 2015;24(3):24–31.
10. Zeng Y., Weinell C.E., Dam-Johansen K. et al. Exposure of hydrocarbon intumescent coatings to the UL1709 heating curve and furnace rheology: Effects of zinc borate on char properties. *Progress in Organic Coatings*. 2019;135:321–330. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.020>
11. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018;95:42–50. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.10.004>
12. Zhang Y., Wang Y.C., Bailey C.G. et al. Global modelling of fire protection performance of an intumescent coating under different furnace fire conditions. *Journal of Fire Safety*. 2013;31:51–72. <https://doi.org/10.1177/0734904112453566>
13. Morys M., Illerhaus B., Sturm H. et al. Size is not all that matters: Residue thickness and protection performance of intumescent coatings made from different binders. *Journal of Fire Sciences*. 2017;35(4):284–302. <https://doi.org/10.1177/0734904117709479>
14. Omrane A., Wang Y.C., Göransson U. et al. Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence. *Fire Safety Journal*. 2007;42:68–74. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.08.006>
15. Гравит М.В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий. *Пожаровзрывобезопасность*. 2013;22(5):33–37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19419639> (дата обращения: 10.04.2023).
16. Morys M., Illerhaus B., Sturm H. et al. Revealing the inner secrets of intumescence: Advanced standard time temperature oven (STT Mufu+)-μ-computed tomography approach. *Fire and Materials*. 2017;41(8):927–939. <https://doi.org/10.1002/fam.2426>

17. Maluk C., Bisby L., Krajcovic M. et al. A Heat-Transfer Rate Inducing System (H-TRIS) Test Method. *Fire Safety Journal*. 2019;105:307–319. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.05.001>
18. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Некоторые причины нарушения качества интумесцентных покрытий. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;11:69–75. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-11-69-75>
19. Мартынов А.В., Попова О.В., Греков В.В. Нестандартные методы оценки качества интумесцентных покрытий. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;6:15–20. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-6-15-20>
20. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Комплект средств измерений для экспресс-анализа интумесцентной огнезащиты на строительном объекте. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2021;3:61–68. <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68>

References

1. Lucherini A, Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019;162:105712. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>
2. Wail ED. Fire-Protective and Flame-Retardant Coatings — A State-of-the-Art Review. *Journal of Fire Sciences*. 2011;29(3):259–296. <https://doi.org/10.1177/0734904110395469>
3. Golovanov VI, Kryuchkov GI. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* 2021;3:52–60. <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.52-60> (In Russ.).
4. Dreyer JAH, Weinell CE, Dam-Johansen K, et al. Review of heat exposure equipment and in-situ characterisation techniques for intumescent coatings. *Fire Safety Journal*. 2021;121:103264. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103264>
5. Lucherini A, Maluk C. Assessing the onset of swelling for thin intumescent coatings under a range of heating conditions. *Fire Safety Journal*. 2019;106:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.014>
6. Ng YH, Dasari A, Tan KH, et al. Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of testing. *Progress in Organic Coatings*. 2021;150:105985. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105985>
7. Andryushkin AYu, Tsoy AA, Simonova MA. About the basic preconditions of creation of the method of testing fire-resistant coatings in high temperature gas flow. *Problems of risk management in the technosphere*. 2016;1(37):39–46. (In Russ.).
8. Akulov AYu, Aksenov AV. Oгнезашchitnye pokrytiya na osnove mineral'nykh termostoikikh zapolnitelei dlya metallokonstruktsii neftegazovogo kompleksa. *Oil and Gas Studies*. 2011;1:66–70. (In Russ.).
9. Rudakova TA, Evtushenko YuM, Grigorev YuA, et al. Ways of reducing the temperature of foaming in the system ammonium polyphosphate-pentaerythritol in intumescent systems. *Fire and Explosion Safety*. 2015;24(3):24–31. (In Russ.).
10. Zeng Y, Weinell CE, Dam-Johansen K, et al. Exposure of hydrocarbon intumescent coatings to the UL1709 heating curve and furnace rheology: Effects of zinc borate on char properties. *Progress in Organic Coatings*. 2019;135:321–330. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.020>
11. Lucherini A, Giuliani L, Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018;95:42–50. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.10.004>
12. Zhang Y, Wang YC, Bailey CG, et al. Global modelling of fire protection performance of an intumescent coating under different furnace fire conditions. *Journal of Fire Safety*. 2013;31:51–72. <https://doi.org/10.1177/0734904112453566>
13. Morys M, Illerhaus B, Sturm H, et al. Size is not all that matters: Residue thickness and protection performance of intumescent coatings made from different binders. *Journal of Fire Sciences*. 2017;35(4):284–302. <https://doi.org/10.1177/0734904117709479>
14. Omrane A, Wang YC, Göransson U, et al. Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence. *Fire Safety Journal*. 2007;42:68–74. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.08.006>
15. Gravit MV. Evaluation of pore space form of intumescent fire retardant coating. *Fire and Explosion Safety*. 2013;22(5):33–37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19419639> (accessed 10.04.2023). (In Russ.).
16. Morys M, Illerhaus B, Sturm H, et al. Revealing the inner secrets of intumescence: Advanced standard time temperature oven (STT Mufu+)—μ-computed tomography approach. *Fire and Materials*. 2017;41(8):927–939. <https://doi.org/10.1002/fam.2426>

17. Maluk C, Bisby L, Krajcovic M, et al. A Heat-Transfer Rate Inducing System (H-TRIS) Test Method. *Fire Safety Journal*. 2019;105:307–319. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.05.001>
18. Martynov AV, Grekov VV, Popova OV. Some Reasons for the Violation of the Intumescent Coatings Quality. *Occupational Safety in Industry*. 2020;11:69–75. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-11-69-75> (In Russ.).
19. Martynov AV, Popova OV, Grekov VV. Non-Standard Methods for Assessing the Quality of Intumescent Coatings. *Occupational Safety in Industry*. 2021;6:15–20. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-6-15-20> (In Russ.).
20. Martynov AV, Grekov VV, Popova OV. Measuring tool kit for express analysis of intumescent fire protection at a construction facility. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya*. 2021;3:61–68. <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68> (In Russ.).

Об авторах

Мартынов Алексей Владимирович, генеральный директор, ООО СКБ «Строительство Качество Безопасность» (344113, РФ, г. Ростов-на-Дону, пр. Космонавтов, 37, оф. 68, 69), [ORCID](#), mail@fireguard.ru

Греков Василий Владимирович, технический консультант, ООО СКБ «Строительство Качество Безопасность» (344113, РФ, г. Ростов-на-Дону, пр. Космонавтов, 37, оф. 68, 69), [ORCID](#), Torobas@mail.ru

Попова Ольга Васильевна, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), olvp2808@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.В. Мартынов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формулирование выводов. В.В. Греков — проведение экспериментов, подготовка текста, формулирование выводов. О.В. Попова — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Поступила в редакцию 03.04.2023.

Поступила после рецензирования 18.04.2023.

Принята к публикации 21.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Aleksey V Martynov, general director, Stroitel'stvo Kachestvo Bezopasnost' OOO (68, 69 office, 37, Kosmonavtov Avenue, Rostov-on-Don, 344113, RF), [ORCID](#), mail@fireguard.ru

Vasiliy V Grekov, technical adviser, Stroitel'stvo Kachestvo Bezopasnost' OOO (68, 69 office, 37, Kosmonavtov Avenue, Rostov-on-Don, 344113, RF), [ORCID](#), Torobas@mail.ru

Olga V Popova, professor of the Life Safety and Environmental Protection Department, Don State Technical University (q. Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Eng.), professor, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), olvp2808@rambler.ru

Claimed contributorship:

AV Martynov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of the conclusions. VV Grekov: conducting experiments, preparation of the text, formulation of the conclusions. OV Popova: academic advising, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions.

Received 03.04.2023.

Revised 18.04.2023.

Accepted 21.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 657.6.012.16

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-47-57>

Научная статья



К вопросу оценки уровня шумовых и вибрационных воздействий на работников промышленных предприятий Республики Казахстан

Р.Б. Ширванов , И.К. Жумагалиев 

Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, Республика Казахстан, г. Уральск, пр. Н. Назарбаева, 208

✉ wirvanov@mail.ru

Аннотация

Введение. Обеспечение безопасных и комфортных условий труда является одной из наиболее важных задач в организации современных производственных процессов, оказывающих непосредственное влияние на производительность труда работников, травматизм и профессиональные заболевания. Несмотря на все усилия, предпринимаемые как на государственном, так и на ведомственном уровнях, современное состояние безопасности и охраны труда (БиОТ) работников промышленных предприятий в Республике Казахстан (РК) продолжает оставаться на недостаточно высоком уровне. Главной причиной производственного травматизма и профессиональных заболеваний является воздействие на работающий персонал опасных и вредных производственных факторов, одним из которых является повышенный уровень шума и вибрации от производственного оборудования. Авторы анализируют по отраслям экономики республики статистические данные о количестве случаев травматизма, их видах и причинах возникновения у работников. Рассмотрено влияние шума и вибрации на здоровье работающих, при этом установлено, что повышенный уровень шумовых и вибрационных воздействий в меньшей степени вызывает травматизм, а в большей — профессиональные заболевания. Целью данного исследования является инструментальное измерение уровня шума и вибрации на рабочих местах производственных участков машиностроительного предприятия и оценка условий труда там для выработки действенных мер по снижению вредного воздействия на здоровье работников.

Материалы и методы. В качестве базовой информации использованы статистические данные по производственному травматизму и профессиональным заболеваниям, а также результаты инструментальных измерений уровня шумовых и вибрационных воздействий на работников с использованием методик, изложенных в ГОСТ ISO 9612-2016 и ГОСТ 31319-2006 с учетом приказа министра здравоохранения Республики Казахстан от 16 февраля 2022 года № ҚР ДСМ-15 «Об утверждении гигиенических нормативов к физическим факторам, оказывающим воздействие на человека».

Результаты исследования. Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о том, что около 22,6 % рабочих мест на производственных участках характеризуются вредными и опасными условиями труда по уровню шумовых и вибрационных воздействий на работников.

Обсуждение и заключения. По итогам исследования был разработан план первоочередных мероприятий по снижению вредных воздействий повышенного уровня шума и вибрации на рабочих местах, а также рекомендованы особый режим труда, льготы и доплаты работникам за условия труда, не отвечающие требованиям безопасности.

Ключевые слова: безопасность и охрана труда, производственный травматизм, профессиональные заболевания, рабочее место, опасные и вредные производственные факторы, шум, вибрация.

Для цитирования: Ширванов Р.Б., Жумагалиев И.К. К вопросу оценки уровня шумовых и вибрационных воздействий на работников промышленных предприятий Республики Казахстан. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(2):47–57. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-47-57>

On the Issue of Assessing the Levels of Noise and Vibration Impacts on Workers of Industrial Enterprises of the Republic of Kazakhstan

Rashid B Shirvanov^{ID}✉, Isatai K Zhumagaliyev^{ID}

West Kazakhstan Innovation and Technological University, 208, N. Nazarbayev Avenue, Uralsk, Republic of Kazakhstan

✉ wirvanov@mail.ru

Abstract

Introduction. Ensuring safe and comfortable working conditions is one of the most important tasks in the organization of modern production processes that have a direct impact on employee productivity, injuries and occupational diseases. Despite all the efforts made both at the state and departmental levels, the current state of occupational safety and health of industrial workers in the Republic of Kazakhstan continues to remain at an insufficiently high level. The main cause of occupational injuries and occupational diseases is the impact on working personnel of dangerous and harmful production factors, one of which is an increased level of noise and vibration from production equipment. The authors analyze statistical data on the number of cases of injuries, their types and causes of occurrence in workers by sectors of the economy of the republic. The influence of noise and vibration on the health of workers is considered. It is found that an increased level of noise and vibration effects causes injuries to a lesser extent, and occupational diseases to a greater extent. The work objective is instrumental measurement of noise and vibration levels in the workplaces of production sites of a machine-building enterprise and assessment of working conditions there to develop effective measures to reduce the harmful effects on the health of workers.

Materials and Methods. Statistical data on occupational injuries and occupational diseases were used as basic information, as well as the results of instrumental measurements of the level of noise and vibration effects on workers using the methods set out in GOST ISO 9612-2016 and GOST 31319-2006, taking into account Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan of February 16, 2022 No. KR DSM-15 "On approval of hygienic standards to physical factors that have an impact on a person".

Results. The results of the conducted research allowed us to conclude that about 22.6% of workplaces at production sites are characterized by harmful and dangerous working conditions in terms of noise and vibration effects on workers.

Discussion and Conclusion. Based on the results of the study, a plan of priority measures was developed to reduce the harmful effects of increased noise and vibration in the workplace. The authors also recommend a special working regime, benefits and additional payments to employees for working conditions that do not meet safety requirements.

Keywords: occupational health and safety, occupational injuries, occupational diseases, workplace, dangerous and harmful production factors, noise, vibration.

For citation. Shirvanov RB, Zhumagaliyev IK. On the Issue of Assessing the Levels of Noise and Vibration Impacts on Workers of Industrial Enterprises of the Republic of Kazakhstan. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):47–57. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-47-57>

Введение. Гарантии обеспечения безопасных условий труда на предприятиях в Республике Казахстан заложены на государственном уровне: статьей 24 Конституции страны декларируется право каждого гражданина «...на условия труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены...», а в статье 31 провозглашается, что государство ставит своей целью «...охрану окружающей среды, благоприятной для жизни и здоровья человека»¹. Разъясняя эти положения, Трудовой кодекс Республики Казахстан (ТК РК) определяет, что под безопасностью труда работников понимается уровень их защищенности от воздействия опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ), а безопасность обеспечивается соответствием трудового процесса и производственной среды требованиям безопасности и охраны труда². Вышеуказанные аспекты также закрепляются и другими нормативно-правовыми актами страны в сфере БиОТ [1].

Тем не менее, как свидетельствуют данные комитета промышленной безопасности РК, из 1,6 млн проверенных в 2019 году рабочих мест на 373 тысячах работники были подвержены воздействию опасных и вредных производственных факторов, то есть каждый четвертый работник (22,3 %) был занят на производстве,

¹Конституция Республики Казахстан. Официальный сайт Президента Республики Казахстан. URL: https://www.akorda.kz/ru/official_documents/constitution (дата обращения: 06.04.2023).

²Трудовой кодекс Республики Казахстан. Кодекс Республики Казахстан. № 414-V ЗПК от 23.11.2015 г. URL: https://kodeksy.kz.com/ka/trudovoj_kodeks.htm (дата обращения: 06.04.2023).

обусловленным наличием ОВПФ³. На рис. 1 приведены статистические данные о количестве погибших и пострадавших от несчастных случаев (НС) на производстве в республике с 2017 по 2021 год [2, 3].

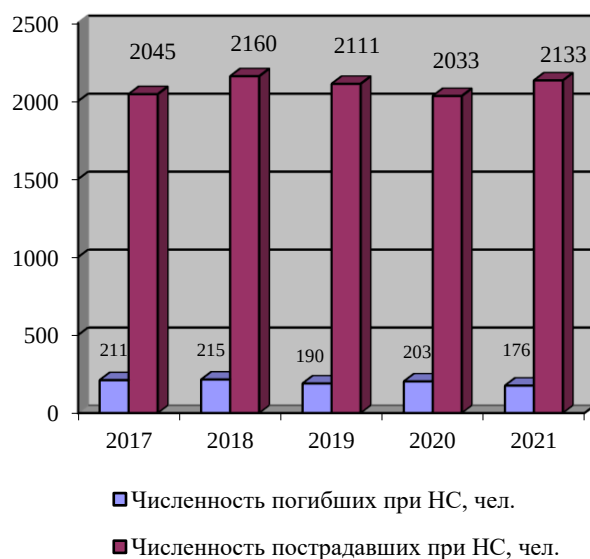


Рис. 1. Показатели производственного травматизма в Республике Казахстан с 2017 по 2021 год

В целом по Республике Казахстан и по ее регионам за последние годы каких-либо позитивных сдвигов в сторону снижения производственного травматизма не произошло, его уровень остается достаточно высоким. По данным, представленным на рис. 1, видно, что в 2021 году в результате НС на производстве погибло 176 человек (в 2017 году — 211 человек), если показатель смертности и снизился на 16,5 %, то объясняется это не повышением уровня безопасности и охраны труда работающих, а простоем предприятий в связи с карантином, а также последующим закрытием части из них в период с 2019 по 2021 год. Число же пострадавших на производстве, наоборот, увеличилось — с 2045 человек в 2017 году до 2133 человек в 2021 году, или на 4,3 %.

Еще одной негативной стороной производственного травматизма являются его высокие материальные последствия, или потери для экономики страны, данные по которым представлены на рис. 2.

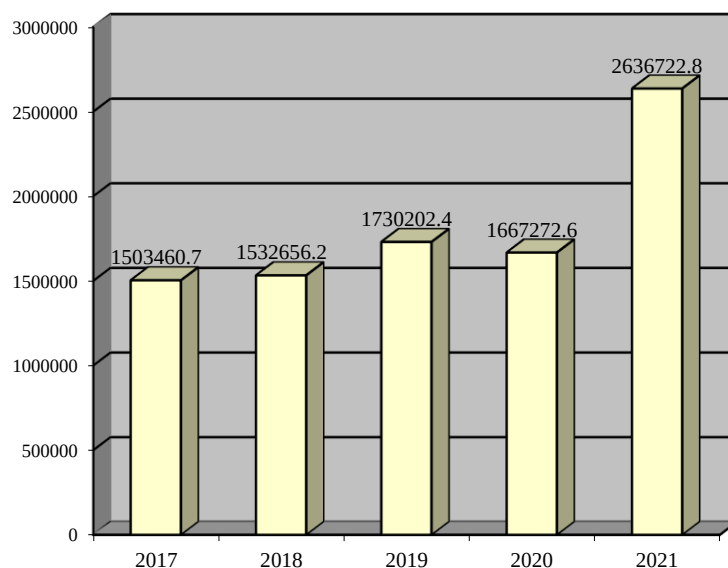


Рис. 2. Материальные последствия от НС в Республике Казахстан с 2017 по 2021 год, тыс. тенге

³Итоги работы за 2020, 2021 гг. Официальный сайт комитета промышленной безопасности министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/kpb/documents/details/198142?lang=ru> (дата обращения: 06.04.2023).

В 2021 году данные потери составили по республике 2 млрд 636 млн 722,8 тыс. тенге (или по курсу ЦБ РК 383 млн 802,4 тыс. руб. РФ).

Рассмотрим подробнее причины возникновения НС на промышленных предприятиях Республики Казахстан в 2021 году (таблица 1)^{4,5}.

Таблица 1

Количество погибших и травмированных из-за несчастных случаев работников в Республике Казахстан в 2021 году⁴

Причина НС	Количество, чел.	
	Пострадавших	Погибших
Воздействие на пострадавших повышенного уровня запыленности и загазованности воздуха производственной среды	10	1
Нарушение требований безопасности при эксплуатации транспортных средств	54	10
Нарушение требований правил дорожного движения	165	20
Аварии и другие чрезвычайные ситуации	63	13
Неудовлетворительная организация производства работ	266	26
Плохое техсостояние зданий, сооружений и недостатки в организации рабочих мест	34	3
Недостатки в организации обучения работников правилам и требованиям БиОТ	41	5
Отсутствие или неиспользование пострадавшими средств индивидуальной защиты	19	1
Повышенный уровень шумовых воздействий	1	-
Наличие ОВПФ и их воздействие на пострадавших	88	14
Воздействие повышенного уровня ионизирующих излучений	1	-
Отсутствие или неприменение средств коллективной защиты	11	-
Нарушение пострадавшими норм и правил производственной и трудовой дисциплины	39	9
Нарушение правил по БиОТ	276	19
Нарушение пострадавшими установленного режима труда и отдыха	6	-
Грубая неосторожность самих пострадавших	688	61
Воздействие повышенных физических нагрузок	3	-
Конструктивные недостатки или использование неисправного оборудования	25	1
Грубое нарушение технологических регламентов и процессов	17	3
Другие	63	4

Таким образом, по приведенным данным можно сделать вывод, что основными причинами гибели и травм на производстве явились допущенные персоналом предприятий нарушения требований и правил БиОТ, недостатки в организации производства работ, наличие на рабочих местах ОВПФ и их воздействие на работников и так далее. Так, в 2021 году неудовлетворительная организация производства работ явилась причиной гибели 26 и травмирования 266 работников, а нарушения элементарных правил БиОТ со стороны работников — 19 и 276 человек соответственно. Одной из главных причин производственного травматизма на предприятиях республики стала грубая неосторожность самих пострадавших при выполнении ими трудовых обязанностей (по этой причине погиб 61 и пострадали 688 человек).

На промышленных предприятиях наряду с другими ОВПФ наиболее распространенными негативными производственными факторами являются шум и вибрация [2, 4, 5]. Так, в условиях шума и вибрации, специфически влияющих на организм человека, трудится каждый третий работник предприятий. На производственных участках и рабочих местах установлено большое количество различного технологического оборудования, которое, являясь источником повышенного уровня шума и вибрации, оказывает негативное влияние на здоровье и общее самочувствие работающих [3, 6–8]. По этим причинам, к которым можно частично отнести и представленные в таблице 1 такие показатели, как повышенный уровень шума, воздействие ОВПФ, необеспеченность средствами индивидуальной и коллективной защиты, конструктивные недостатки и эксплуатация неисправных машин и механизмов, в 2021 году погибло 16 человек и пострадало 144 человека.

⁴Статистика здравоохранения. Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/social-statistics/stat-medicine/publications/> (дата обращения: 06.04.2023).

⁵Безопасность и охрана труда за 11 месяцев 2022 года. Официальный сайт Комитета труда и социальной защиты населения Республики Казахстан. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/lspm/activities/292?lang=ru> (дата обращения: 06.04.2023).

Однако повышенный уровень шума и вибрации в меньшей степени обуславливают травматизм работников, а в большей — возникновение у них профессиональных заболеваний, о чем свидетельствуют данные таблицы 2.

Из 351 выявленного случая профессиональных заболеваний работников в целом по республике 167 (47,5 %) составили профзаболевания, причиной которых стали повышенный уровень шума и вибрации, вызвавший у пострадавших развитие вибрационной болезни, кондуктивную и нейросенсорную потерю слуха, двустороннюю нейросенсорную потерю слуха, двустороннюю смешанную кондуктивную и нейросенсорную тугоухость.

Материалы и методы. Базой для проведения исследований по оценке уровня шума и вибрации от оборудования стали рабочие места производственных участков Уральского завода по выпуску трансформаторов. Исследования проводились по методикам, изложенным в ГОСТ ISO 9612-2016 «Межгосударственный стандарт. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека»⁶, ГОСТ 31319-2006 «Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах»⁷, с учетом положений, содержащихся в приказе министра здравоохранения РК от 16.02.2022 № КР ДСМ-15⁸. В ходе проведения инструментальных измерений уровня шума и вибрации использовались следующие приборы и оборудование: шумомер (прибор для измерения уровня звука) марки АТТ-9001 и измеритель параметров вибрации (вибромметр) марки «Вибротест-МГ4.01».

Таблица 2

Количество работников, получивших профессиональные заболевания в 2021 году⁴

Наименование профессионального заболевания	Количество пострадавших, чел.
Всего по Республике Казахстан, из них:	351
воздействие вибрации	73
нейросенсорная и кондуктивная потеря слуха	46
двусторонняя кондуктивная потеря слуха	1
односторонняя нейросенсорная потеря слуха с нормальным слухом на одном ухе	2
нейросенсорная потеря слуха двусторонняя	22
смешанная кондуктивная и нейросенсорная тугоухость	20
двусторонняя неуточненная смешанная кондуктивная и нейросенсорная тугоухость	1

Методом сравнения измеренных параметров фактических значений шума и вибрации с предельно допустимыми уровнями (ПДУ) рабочим местам (РМ) присваивался класс условий труда (КУТ) согласно «Правилам обязательной периодической аттестации производственных объектов по условиям труда»⁹. Согласно вышеуказанным Правилам в зависимости от степени отклонения фактических уровней ОВПФ от гигиенических нормативов условия труда по степени вредности и опасности подразделялись на четыре класса: 1 — оптимальные, 2 — допустимые, 3 — вредные и опасные (с подклассами 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 в зависимости от степени превышения над нормативами), 4 — недопустимые.

Результаты исследования. Результаты проведенных исследований по оценке уровня шумовых и вибрационных воздействий на человека от работы производственного оборудования представлены в таблицах 3 и 4.

⁶ГОСТ ISO 9612-2016. Межгосударственный стандарт. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах. Online.zakon.kz. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=39455237 (дата обращения: 06.04.2023).

⁷ГОСТ 31319-2006. Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах. Online.zakon.kz. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30979214 (дата обращения: 06.04.2023).

⁸Об утверждении гигиенических нормативов к физическим факторам, оказывающим воздействие на человека. Приказ министра здравоохранения Республики Казахстан от 16 февраля 2022 года № КР ДСМ-15. Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200026831> (дата обращения: 06.04.2023).

⁹Правила обязательной периодической аттестации производственных объектов по условиям труда. Приказ министра здравоохранения и социального развития Республики Казахстан от 28 декабря 2015 года № 1057. Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500012743> (дата обращения: 06.04.2023).

Таблица 3

Результаты исследования уровня шумовых и вибрационных воздействий на работников

№ п/п	Наи- мено- вание Произ- водст- венного участка	Характеристика РМ	Об- щее число РМ	Шум, дБА			Вибрация, дБ			КУТ				
				ПДУ	Изме- ренный уровень	Превыше-ние над ПДУ	ПДУ	Измере- нный уровень	Превышение над ПДУ					
1	Участки № 1 и № 2 сбороч- ного цеха	Заготовщик изоляционных материалов	15	Не более 80	71,3	Нет	Не более 97	83,1	Нет	2				
		Оператор станка (по плазменной резке металла)	3	Не более 80	69,7 70,1 70,5	Нет	Не более 97	81,3 80,6 82,1	Нет	2				
		Оператор станка (поперечной резки металла)	9	Не более 80	90,7 90,4 89,8 90,3 91,8 90,5 91,2 92,1 91,1	+10,7 +10,4 +9,8 +10,3 +11,8 +10,5 +11,2 +12,1 +11,1	Не более 97	102,3 101,9 102,4 101,5 102,4 101,5 101,5 102,4 101,6	+5,3 +4,9 +5,4 +4,5 +5,4 +4,5 +4,5 +5,4 +4,6	3,2 3,2 3,2 3,2 3,2 3,2 3,2 3,2 3,2				
					Оператор станка (продольной резки металла)	3		Не более 80	90,3 89,2 90,4	+10,3 +9,2 +10,4	Не более 97	101,7 100,9 100,2	+4,7 +3,9 +3,2	3,2 3,2 3,2
					Оператор шиногибочного станка	3		Не более 80	70,3 69,2 70,4	Нет	Не более 97	83,2 82,1 82,4	нет	2
					Оператор станка (гиловитинные ножницы)	3		Не более 80	88,7 89,5 87,8	+8,7 +9,5 +7,8	Не более 97	100,7 99,6 100,8	+3,7 +2,6 +3,8	3,2 3,2 3,2
					Плотник (деревообрабатываю- щий станок)	2		Не более 80	78,1 77,1	Нет	Не более 97	92,3 90,9	нет	2
					Сварщик аргонно- дуговой сварки	7		Не более 80	71,9	Нет	Не более 97	81,1	нет	2
					Шихтовщик	9		Не более 80	70,7 70,4 69,8 70,3 71,8 70,5 71,2 72,1 71,1	Нет	Не более 97	82,3 81,9 82,4 81,5 82,4 81,5 81,5 82,4 81,6	нет	2
		2	Участок № 3 сбороч- ного цеха	Сборщик трансформаторов	23	Не более 80	70,3	Нет	Не более 97	81,7	нет	2		
3	Участок сварки и покраски	Электросварщик (сварочный аппарат)	13	Не более 80	69,1	Нет	Не более 97	81,4	нет	2				
		Маляр	13	Не более 80	60,4	Нет	Не более 97	64,8	нет	2				
		Сверлильщик (сверлильные станки)	4	Не более 80	84,2	+4,2	Не более 97	98,9	+1,9	3.1				
4	Механи- ческий участок	Токарь (токарные станки)	8	Не более 80	91,7 92,5 91,8 92,5 93,4 92,8 91,9 91,4	+11,7 +12,5 +11,8 +12,5 +13,4 +12,8 +11,9 +11,4	Не более 97	100,4 101,2 100,1 101,4 100,7 99,8 100,2 101,4	+3,4 +4,2 +3,1 +4,4 +3,7 +2,8 +3,2 +4,4	3,2 3,2 3,2 3,2 3,2 3,2 3,2 3,2				
		Фрезеровщик (фрезерные станки)	2	Не более 80	84,8 84,1	+4,8 +4,1		Не более 97	98,4 99,3	1,4 1.3	3,1 3,1			
5	Участок намотки и проводов	Намотчик НН	11	Не более 80	68,9	Нет	Не более 97	80,4	нет	2				

Таблица 4

Обобщенные результаты оценки КУТ на рабочих местах по уровню шумовых и вибрационных воздействий на работников

Производственный участок	Число РМ	Число работников на РМ	Распределение числа РМ по КУТ						
			класс 1	класс 2	класс 3				класс 4
					3,1	3,2	3,3	3,4	
Участки № 1 и № 2 сборочного цеха	45	28	–	30	–	15	–	–	–
Участок № 3 сборочного цеха	23	23	–	23	–	–	–	–	–
Участок сварки и покраски	30	18	–	26	4	–	–	–	–
Механический участок	10	6	–	2	8	–	–	–	–
Участок намотки и проводов	11	11	–	11	–	–	–	–	–
Итого:	119	86	–	92	12	15	–	–	–

Более наглядно результаты оценки условий труда на рабочих местах производственных участков завода по уровню шумовых и вибрационных воздействий на работников и их аттестация по КУТ представлены на рис. 3.

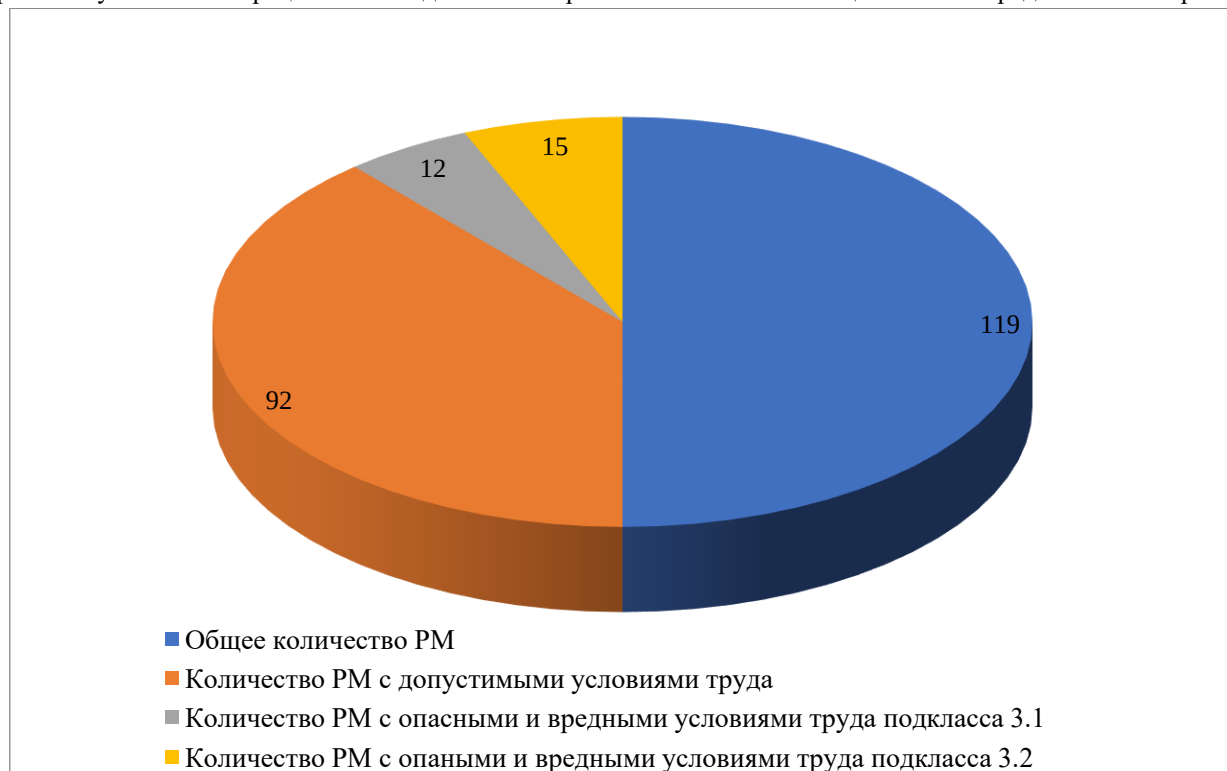


Рис. 3. Результаты оценки условий труда на рабочих местах и их аттестации по КУТ

Обсуждение и заключения. По данным, представленным в таблице 4 и на рис. 3, видно, что 27 из 119 рабочих мест, или 22,6 % от их общего числа, характеризуются наличием ОВПФ по факторам шума или вибрации, а также при их сочетанном влиянии. Однако полностью локализовать или ликвидировать повышенные уровни шума и вибрации оборудования, машин и механизмов, как и другие ОВПФ, в условиях реального производства зачастую затруднительно, а иногда и невозможно, так как они являются сопутствующей частью технологических процессов. Причем данная проблема характерна не только для Казахстана, что многие отечественные ученые и специалисты объясняют устаревшим оборудованием и отсталыми технологиями, но и для промышленно развитых западных стран [9–14]. И тем не менее, параметры шума и вибрации, а также степень их воздействия на работников должны постоянно контролироваться, и в случае выявления негативного влияния своевременно разрабатываться и внедряться меры технического и организационного характера по их снижению до безопасных уровней.

Результаты исследований выявили еще одну проблему, заключающуюся в том, что ранее проведенная аккредитованной организацией аттестация рабочих мест (АРМ) производственных участков завода каких-либо отклонений в условиях труда от допустимых не выявила, а по ее итогам всем рабочим местам был присвоен 2-й класс. Дело в том, что АРМ занимаются аккредитованные организации, с которыми работодатель заключает договор на ее проведение и оплачивает все работы, поэтому в полученных результатах такие организации отражают не фактическое положение дел, а пожелания работодателя [15].

Так как по результатам исследований часть рабочих мест производственных участков завода по условиям труда была оценена по КУТ как соответствующая подклассам 3.1 или 3.2, т. е. характеризующаяся вредными и опасными условиями по уровню шумовых и вибрационных воздействий, персонал, осуществляющий трудовой процесс на этих местах, в соответствии с действующим трудовым законодательством Республики Казахстан имеет право на ряд льгот и компенсаций.

При начислении заработной платы, определении режимов труда и отдыха в соответствии с указанными льготами и компенсациями необходимо предусмотреть:

а) доплаты к основной тарифной ставке за работу в условиях воздействия ОВПФ (повышенного уровня шума и вибрации) до 10 % (согласно п. 1 ст. 105 ТК РК);

б) предоставление дополнительного ежегодного отпуска к основному продолжительностью не менее шести дней (п. 1 ст. 88 ТК РК);

в) сокращение продолжительности рабочего времени — не более 36 часов в неделю (п. 2 ст. 69 ТК РК), а рабочей смены — не более восьми часов;

г) два внутрисменных перерыва в течение смены (п. 1 ст. 82 ТК РК), включаемых в рабочее время, длительностью не более 20 мин. через 1,5–2 часа после начала смены и после перерыва для отдыха и приема пищи (обеда);

д) перерыв для отдыха и приема пищи ориентировочно в середине смены продолжительностью не менее 30 мин. (как правило, продолжительность устанавливается в один час.) (п. 1 ст. 81 ТК РК).

Предложения по подбору персонала:

– возраст работников — не моложе 18 лет;

– запрет на использование труда женщин и подростков (пп. 2 п. 1 и пп. 4 п. 2 ст. 26 ТК РК).

Предусматривается проведение следующих обязательных медосмотров: предварительного (с указанием противопоказаний для приема на работу при наличии на рабочем месте ОВПФ) — перед заключением индивидуального трудового договора и периодических — один раз в два года.

Для внедрения на производственных участках и рабочих местах завода был разработан план мероприятий технического характера по снижению повышенных шумовых и вибрационных воздействий на работников от производственного оборудования.

Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о том, что около четверти рабочих мест на производственных участках завода характеризуются опасными и вредными условиями труда по уровню шумовых и вибрационных воздействий на работников от производственного оборудования, поэтому был рекомендован режим труда, льготы и доплаты работникам за условия труда, не отвечающие требованиям безопасности. Обеспечение работников безопасными и комфортными условиями труда, в т. ч. и по таким ОВПФ, как повышенный уровень шума и вибрации, способствует снижению потенциальных рисков возникновения травматизма и профессиональных заболеваний и, как следствие, повышению в целом эффективности трудовой деятельности и производительности труда.

Список литературы

1. Shirvanov R.B. Legal and regulatory provision of safety and labor protection of industrial personnel. *Фылым және білім*. 2020;2(59):186–193.
2. Карабакин С.К., Ниязбекова Л.С., Сейдуанова М.К. и др. Гигиеническая оценка шумо-вибрационного фактора на горно-обогатительных производствах. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019;12(1):71–75.
3. Аденинская Е.Е., Симонова Н.И., Мазитова Н.Н. и др. Принципы диагностики потери слуха, вызванной шумом, в современной России (систематический обзор литературы). *Вестник современной клинической медицины*. 2017;10(3):48–55. [https://doi.org/10.20969/VSKM.2017.10\(3\).48-55](https://doi.org/10.20969/VSKM.2017.10(3).48-55)

4. Хоменко А.О., Якшина Н.В., Мушников В.С. и др. Влияние виброакустических факторов на безопасность и здоровье работников промышленных предприятий. *Экономика труда*. 2022;9(12):2175–2196. <https://doi.org/10.18334/et.9.12.116410>
5. Спирин В.Ф., Старшов А.М. К некоторым проблемам хронического воздействия производственного шума на организм работающих (обзор литературы). *Анализ риска здоровью*. 2021;1:186–196. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.19>
6. Федина И.Н., Преображенская Е.А. Особенности снижения слуха, вызванного шумом, в современных условиях. *Медицина труда и промышленная экология*. 2017;9:200–201.
7. Киселев В.Д., Малахов А.И., Суковин М.В. Анализ влияния шума на организм человека. *NovaInfo*. 2016;48:20–27. URL: <https://novainfo.ru/article/6813> (дата обращения: 08.03.2023).
8. Бухтияров И.В., Измеров Н.Ф., Тихонова Г.И. и др. Условия труда как фактор риска повышения смертности в трудоспособном возрасте. *Медицина труда и промышленная экология*. 2017;8:43–49.
9. Li X., Dong Q., Wang B., et al. The Influence of Occupational Noise Exposure on Cardiovascular and Hearing Conditions among Industrial Workers. *Scientific Reports*. 2019;9:11524. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47901-2>
10. Wang B., Han L., Dai S., et al. Hearing Loss Characteristics of Workers with Hypertension Exposed to Occupational Noise: A Cross-Sectional Study of 270,033 Participants. *BioMed Research International*. 2018;2018;7. <https://doi.org/10.1155/2018/8541638>
11. Kim T.S., Chung J.W. Associations of Dietary Riboflavin, Niacin, and Retinol with Age-related Hearing Loss; An Analysis of Korean National Health and Nutrition Examination Survey Data. *Nutrients*. 2019;11(4)896. <https://doi.org/10.3390/nu11040896>
12. Concha-Barrientos M., Campbell-Lendrum D., Steenland H. *Occupational noise: assessing the burden of disease from work-related hearing impairment at national and local levels*. Geneva: World Health Organization, 2004. (WHO Environmental Burden of Disease Series, No. 9). P. 41.
13. Staseva E., Kvitkina M., Litvinov A., et al. *The effect of noise on the human body, in particular, on cardiovascular diseases*. In: E3S Web of Conferences. 2020;164(2):01028. P.2–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016401028>
14. Huang Yu., Michael J.G. The effects of sound level and vibration magnitude on the relative discomfort of noise and vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012;131:4558–4569. <https://doi.org/10.1121/1.4705285>
15. Ширванов Р.Б. Анализ существующих подходов к оценке опасностей и профессиональных рисков работников промышленных предприятий Республики Казахстан. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;2:14–23. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-14-23>

References

1. Shirvanov RB. Legal and regulatory provision of safety and labor protection of industrial personnel. *Gylym jäne bilim*. 2020;2(59):186–193.
2. Karabalin SK, Niyazbekova LS, Seiduanova MK, et al. Hygienic assessment of the noise-vibration factor in the mining and processing industries. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2019;12(1):71–75. (In Russ.).
3. Adeninskaya EE, Simonova NI, Mazitova NN, et al. The principles of noise induced hearing loss diagnostics in modern Russia (systematic review). *The Bulletin of Contemporary Clinical Medicine*. 2017;10(3):48–55. [https://doi.org/10.20969/VSKM.2017.10\(3\).48-55](https://doi.org/10.20969/VSKM.2017.10(3).48-55) (In Russ.).
4. Khomenko AO, Yakshina NV, Mushnikov VS, et al. The influence of vibroacoustic factors on the safety and health of industrial employees. *Russian Journal of Labor Economics*. 2022;9(12):2175–2196. <https://doi.org/10.18334/et.9.12.116410> (In Russ.).
5. Spirin VF, Starshov AM. On certain issues related to chronic exposure to occupational noise and impacts exerted by it on workers' bodies (literature review). *Health Risk Analysis*. 2021;1:186–196. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.19> (In Russ.).
6. Fedina IN, Preobrazhenskaya EA. Features of noise-induced hearing loss in modern conditions. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2017;9:200–201. (In Russ.).
7. Kiselev VD, Malakhov AI, Sukovin MV. Analiz vliyaniya shuma na organizm cheloveka. *NovaInfo*. 2016;48:20–27. URL: <https://novainfo.ru/article/6813> (accessed 08.03.2023). (In Russ.).
8. Bukhtiyarov IV, Izmerov NF, Tikhonova GI, et al. Work conditions as a risk factor mortality increase in able-bodied population. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2017;8:43–49. (In Russ.).
9. Li X, Dong Q, Wang B, et al. The Influence of Occupational Noise Exposure on Cardiovascular and Hearing Conditions among Industrial Workers. *Scientific Reports*. 2019;9:11524. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47901-2>

10. Wang B, Han L, Dai S, et al. Hearing Loss Characteristics of Workers with Hypertension Exposed to Occupational Noise: A Cross-Sectional Study of 270,033 Participants. *BioMed Research International*. 2018;2018;7. <https://doi.org/10.1155/2018/8541638>
11. Kim TS, Chung JW. Associations of Dietary Riboflavin, Niacin, and Retinol with Age-related Hearing Loss; An Analysis of Korean National Health and Nutrition Examination Survey Data. *Nutrients*. 2019;11(4)896. <https://doi.org/10.3390/nu11040896>
12. Concha-Barrientos M, Campbell-Lendrum D, Steenland H. *Occupational noise: assessing the burden of disease from work-related hearing impairment at national and local levels*. Geneva: World Health Organization, 2004. (WHO Environmental Burden of Disease Series, No. 9). P.41.
13. Staseva E, Kvitkina M, Litvinov A, et al. *The effect of noise on the human body, in particular, on cardiovascular diseases*. In: E3S Web of Conferences. 2020;164(2):01028. P.2–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016401028>
14. Huang Yu, Michael JG. The effects of sound level and vibration magnitude on the relative discomfort of noise and vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012;131:4558–4569. <https://doi.org/10.1121/1.4705285>
15. Shirvanov RB. Analysis of existing approaches to the assessment of hazards and occupational risks of workers of industrial enterprises of the Republic of Kazakhstan. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;2:14–23. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-14-23> (In Russ.).

Об авторах:

Ширванов Рашид Булатович, доцент кафедры «Ветеринария и техносферная безопасность» Западно-Казахстанского инновационно-технологического университета (090006, Республика Казахстан, г. Уральск, пр. Н. Назарбаева, 208), кандидат технических наук, доцент, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9129-2541), wirvanov@mail.ru

Жумагалиев Исатай Кенесович, старший преподаватель кафедры «Ветеринария и техносферная безопасность» Западно-Казахстанского инновационно-технологического университета (090006, Республика Казахстан, г. Уральск, пр. Н. Назарбаева, 208), магистрант, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9129-2541), issatay80@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Р.Б. Ширванов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, анализ результатов исследований, формирование выводов. И.К. Жумагалиев — проведение инструментальных измерений, доработка текста, корректировка выводов.

Поступила в редакцию 01.04.2023.

Поступила после рецензирования 13.04.2023.

Принята к публикации 14.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Rashid B Shirvanov, associate professor of the Veterinary Medicine and Technosphere Safety Department, West Kazakhstan Innovation and Technological University (208, N. Nazarbayev Ave., Uralsk, 090006, Republic of Kazakhstan), Cand. Sci. (Eng.), associate professor, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9129-2541), wirvanov@mail.ru

Isatai K Zhumagaliev, senior lecturer of the Veterinary Medicine and Technosphere Safety Department, West Kazakhstan Innovation and Technological University (208, N. Nazarbayev Ave., Uralsk, 090006, Republic of Kazakhstan), Master's degree student, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9129-2541), issatay80@mail.ru

Claimed contributorship:

RB Shirvanov: formulation of the main concept, goals and objectives of the study, academic advising, analysis of the research results, formulation of the conclusions. IK Zhumagaliyev: carrying out instrumental measurements, finalizing the text, correction of the conclusions.

Received 01.04.2023.

Revised 13.04.2023.

Accepted 14.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 629.03.01

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-58-69>

Оценка безопасности производственных объектов по предельным значениям безотказности машин

В.В. Дерюшев^{ID}, С.В. Теплякова^{ID}✉, М.М. Зайцева^{ID}

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ svet-tpl@yandex.ru

Аннотация

Введение. На этапе проектирования технических устройств и выполнения соответствующих прочностных расчетов металлоконструкций принимаются достаточно большие запасы прочности, теоретически исключающие какие-либо отказы деталей. В действительности машины работают с частыми отказами. Интерес вызывают недиагностируемые отказы, приводящие к критическому снижению безопасности, особенно на опасных производственных объектах. Предполагается, что ранее применяемые подходы выборочного определения предельного (минимального) значения безотказности, основывающиеся на точечных оценках параметров распределения двухпараметрического закона Вейбулла, приводят к завышению расчетных показателей вероятности безотказной работы, т.е. занижению риска. Поэтому целью работы явилось рассмотрение подхода к оцениванию риска эксплуатации производственных объектов в ситуации случайного возникновения опасных и недиагностируемых отказов в системах.

Материалы и методы. В работе применялись методы оценивания безопасности технических устройств, основанные на теории вероятностей, а вероятность отказа машины определялась на основе известного метода теории надёжности. Данный метод заключается в расчете и построении функций распределения случайных величин (несущей способности и нагруженности), оказывающих влияние на возникновение отказа. Определен уровень повышения показателя надежности, приводящий к частым непрогнозируемым отказам технических устройств (машин) и снижению безопасности их эксплуатации.

Результаты. Выявлены и обоснованы признаки противоречивости прочностных расчетов, основанные на завышенных запасах прочности, в теории исключающие отказы деталей и машин в целом. Разработан и реализован новый подход к оцениванию риска эксплуатации производственных объектов в ситуации случайного возникновения опасных и недиагностируемых отказов системами безопасности. Разработан алгоритм определения трех параметров закона Вейбулла для совокупности по выборочным данным. Построены плотности распределения ресурса стрелы одноковшового экскаватора ЕК-14. Даны рекомендации по увеличению значения вероятности безотказной работы до 0,9989.

Обсуждение и заключения. Результаты проведенных исследований позволяют обосновать новый подход к оцениванию риска эксплуатации производственных объектов в случае возникновения опасных и недиагностируемых системами безопасности отказов базовых деталей, приводящих к негативным последствиям.

Ключевые слова: промышленная безопасность, надежность, безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость, отказ, машина, ресурс.

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Дерюшев В.В., Теплякова С.В., Зайцева М.М. Оценка безопасности производственных объектов по предельным значениям безотказности машин. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(2):58–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-58-69>

Production Facilities Safety Assessment According to the Maximum Values of Machines Reliability

Viktor V Deryushev¹, Svetlana V Teplyakova¹✉, Marina M Zaitseva¹

Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Introduction. At the stage of designing technical devices and performing appropriate strength calculations of metal structures, sufficiently large reserves of strength are taken, which, theoretically, exclude any failures of parts. In fact, the machines work with frequent failures. Of interest are undiagnosed failures that lead to a critical decrease in safety, especially at hazardous production facilities. It is assumed that the previously applied approaches of selective determination of the maximum (minimum) reliability value, based on point estimates of the distribution parameters of the two-parameter Weibull law, lead to an overestimation of the calculated indicators of the probability of failure-free operation, i.e. underestimation of risk. Therefore, the work objective is to consider an approach to assessing the risk of operating production facilities in a situation of accidental occurrence of dangerous and undiagnosed failures in systems.

Materials and Methods. Methods for technical devices safety assessment based on probability theory were used in the work, and the probability of machine failure was determined based on the well-known method of reliability theory. This method consists in calculating and constructing distribution functions of random variables (load-bearing capacity and loading) that influence the occurrence of failure. The level of increase in the reliability index was determined, leading to frequent unpredictable failures of technical devices (machines) and a decrease in the safety of their operation.

Results. The signs of inconsistency of strength calculations based on overestimated safety margins, which in theory exclude failures of parts and machines in general, are identified and substantiated. A new approach to risk assessment of operating production facilities in a situation of accidental occurrence of dangerous and undiagnosed failures by safety systems has been developed and implemented. An algorithm for determining the three parameters of Weibull's law for a population based on sample data has been developed. The resource distribution densities of the boom of the single-bucket excavator EK-14 are constructed. The recommendations are given to increase the probability of failure-free operation to 0.9989.

Discussion and Conclusion. The results of the conducted research allow us to substantiate a new approach to risk assessment of operating production facilities in the event of dangerous and undiagnosed failures of basic parts by safety systems, leading to negative consequences.

Keywords: industrial safety, safety, reliability, maintainability, durability, persistence, failure, machine, resource.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the comments, which made it possible to improve its quality.

For citation. Deryushev VV, Teplyakova SV, Zaitseva MM. Production Facilities Safety Assessment According to the Maximum Values of Machines Reliability. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):58–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-58-69>

Введение. Ключевыми факторами, определяющими безопасность опасных производственных объектов, являются так называемый «человеческий фактор», наличие систем безопасности и надежность используемых на объекте машин и механизмов. Как известно [1–4], надежность является комплексным свойством, включающим безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость. В данной статье рассматривается влияние безотказности машины, как одного из основных параметров надежности, на безопасность ее эксплуатации. При этом для анализа показателей безотказности используются традиционные методы теории надежности и некоторые новые подходы к определению параметров распределений случайных величин, позволяющие оценить предельные значения безотказности [1]. Следует отметить, что применяемые здесь методы оценивания безопасности строятся на основных понятиях теории вероятностей, основным из которых является понятие случайной величины¹. Поэтому в данной работе рассматриваются только случайные отказы, приводящие к снижению безопасности. В то же время следует отметить, что не все отказы машин являются случайными. Например, отказы, связанные с систематическими ошибками измерительных приборов и «человеческим

¹ ГОСТ Р 53195.3-2015. *Безопасность функциональная связанных с безопасностью зданий и сооружений систем. Часть 3. требования к системам*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124221> (дата обращения: 23.01.2023).

фактором», случайными не являются². В таком случае нельзя применять для их анализа предлагаемые подходы без строгого математического обоснования³.

Выделяется четыре типа случайных отказов, возникающих в процессе эксплуатации машин и механизмов, применяемых на опасных производственных объектах (таблица 1).

Исследование диагностируемых отказов в рамках описываемой работы не представляет интереса, так как в данном случае приборы (устройства, датчики, сенсоры) системы безопасности промышленного объекта выполняют свои функции в полном объёме и катастрофическое снижение безопасности исключается. В случае же возникновения опасных и недиагностируемых отказов может возникнуть ситуация, когда система безопасности будет уязвима. При этом в соответствии с ГОСТ ISO 12100–2013 под безопасностью понимается способность машины выполнять свою(и) функцию(и) в течение всего срока службы при адекватном (достаточном) снижении рисков.

Таблица 1

Типы случайных отказов машин и механизмов

Тип отказа	Описание отказа	Пример отказа
Опасный	Оказывает значительное влияние на безопасность вплоть до возникновения катастрофы с вероятным травмированием персонала	Разрушение несущих конструкций техники (оборудования) вследствие возникновения усталостных разрушений
Безопасный	Влияния на безопасность эксплуатации не оказывает. Вследствие возникновения могут снижаться параметры экономики, эстетики, эргономики и другие	Проявление коррозионных явлений, возникновение дефектов лакокрасочного покрытия
Диагностируемый	Приборы (устройства, датчики, сенсоры) системы безопасности диагностируют отказы этого типа	Возникновение нарушения работоспособности гидравлической системы машины (оборудования). Нарушение предельных значений грузоподъемности
Недиагностируемый	Приборы (устройства, датчики, сенсоры) системы безопасности не диагностируют отказы этого типа	Проявление скрытых дефектов при расширении, например, усталостных трещин

Из определения следует, что ключевым понятием безопасности здесь является риск, который определяется как возможность осуществления неблагоприятного события, то есть сочетание степени негативного последствия с возможностью его возникновения.

Материалы и методы. Обычно негативным последствием является нанесение травм или другого вреда здоровью при эксплуатации машины. В то же время последствием случайного опасного отказа машины может быть экономический ущерб. В этом случае риск оценивает так называемую функциональную безопасность производственного объекта [3–5]. Следовательно, к исследованию безопасности производственного объекта, в котором происходит случайный опасный и недиагностируемый отказ машины, следует применять методы теории надежности как часть теории вероятностей. Именно риск является связующим звеном надежности машин и безопасности опасных производственных объектов, в том числе их функциональной безопасности.

Повышение вероятности наступления неблагоприятного события вследствие возникновения опасного и недиагностируемого отказа приводит к необходимости прогнозирования и оценивания риска негативных последствий, тяжесть которых является трудноопределимой величиной. В работе тяжесть вероятных негативных последствий, возникающих при опасном и недиагностируемом отказе, принимается одинаковой, а оценивание риска сводится к оцениванию вероятности наступления неблагоприятного события.

Вероятность отказа машины определена известными методами теории надёжности [6], заключающимися в построении функций распределения случайных величин, оказывающих влияние на возникновение отказа. При

²ГОСТ Р 51901.14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200065647> (дата обращения: 23.01.2023).

³ГОСТ Р 50779.27-2017 Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146523> (дата обращения: 23.01.2023).

рассмотрении силовых элементов конструкции строились функции распределения характеристик несущей способности и нагруженности.

Для построения функции распределения генеральной совокупности случайной величины обычно формируется репрезентативная выборка значений, полученная на основании испытаний. Однако в реальных условиях провести испытания является часто затруднительным из-за финансовых, технологических и временных ограничений. Для экономии затрат в ряде исследований [6–10] применяется подход корректировки параметров выборочных распределений. В работе используется данный подход для определения предельного (минимального) значения безотказности, что позволяет обеспечить максимальную безопасность рассматриваемого объекта путём повышения минимальной расчётной безотказности и минимизации риска возникновения неблагоприятного события. Требуемая безотказность достигается при корректировке параметров распределения случайных величин, влияющих на вероятность наступления опасного и недиагностируемого отказа.

С точки зрения надежности машина является идеально безотказной, если в пределах заданного ресурса отказа не возникает. В этом случае детали данной машины откажут приблизительно в одно время, отработав заданное значение ресурса T_p [10, 11].

Практика определения надежности отечественных машин показывает, что средняя наработка на отказ составляет $T=20\text{--}200$ ч, поэтому за ресурс до капитального ремонта $T_p=8\,000\text{--}10\,000$ ч происходит от 40 до 500 отказов, то есть десятки и сотни [12–15]. Многие из них являются опасными и недиагностируемыми. В этом случае фактический ресурс $T_{рф}$ значительно меньше заданного T_p , а вероятность отказа стремится к единице. В то же время, для обеспечения требуемого уровня безопасности необходимо уменьшить риски возникновения неблагоприятных событий, т.е. вероятности отказов.

Рассматривать вариант повышения безопасности машины за счет уменьшения вероятности наступления отказа одной детали нецелесообразно, так как одновременно в машине эксплуатируются сотни и тысячи деталей, поэтому риск наступления неблагоприятных событий растёт.

При составлении структурной схемы надежности среди всех деталей машин выделим группу деталей, которую будем называть базовой. В эту группу входят детали, отказы одной из которых приводит к опасному и недиагностируемому отказу машины. В этом случае необходимо использовать последовательность структурной схемы надежности машины. Тогда риск отказа определится по известной формуле [15]:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - Q_i), \quad (1)$$

где Q — риск (вероятность) отказа машины; Q_i — вероятность отказа i -ой детали, m — объем группы деталей.

Например, если вероятность наступления отказа одной детали в базовой группе одинаковая и равна $Q_i = 0,05$, что является вполне приемлемым условием безотказности детали в эксплуатации, а объем всех деталей в базовой группе машины $m = 200$, то вероятность опасного и недиагностируемого отказа машины составит:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^{200} (1 - 0,05) = 0,997.$$

Такой показатель риска является неприемлемым. То есть можно предположить, что для снижения риска необходимо увеличивать ресурс каждой детали, в этом случае риск будет снижаться. Например, если увеличить ресурс каждой детали на порядок, а именно, если вероятность отказа равна $Q_i = 0,005$, то вероятность отказа машины останется значительно высокой:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^{200} (1 - 0,005) = 0,63.$$

Разработка рекомендаций для увеличения ресурса второй группы деталей (все остальные детали и узлы, не вошедшие в первую группу), к которой относятся расходные материалы и запасные части, приводит только к минимизации суммарных затрат на устранение отказов, никак не влияя на безопасность эксплуатации.

Повышение надежности путем уменьшения рассеивания отказов деталей из базовой группы сокращает риски, связанные с опасными и недиагностируемыми отказами. В результате средняя наработка на отказ возрастет, а отказы будут возникать реже. Количество отказов снизится, но полностью их исключить не удастся, риск неблагоприятных событий будет сохраняться. Фактический ресурс, хотя и приблизится к заданному, определяющему допустимый риск, но будет ниже.

Тогда увеличение ресурса деталей из базовой группы в заданных пределах не позволяет достигнуть высокого уровня безотказности и для решения этой задачи необходим другой методический подход. Предлагаемый новый подход должен предусматривать появление расчётных отказов деталей из базовой группы только за пределами

заданного ресурса машины. В дальнейшем речь пойдет только о деталях из базовой группы, которые будем называть ответственными деталями.

Новый подход к оцениванию безотказности

Изучение надежности машин показало, что ресурс деталей может рассеиваться в значительных пределах. Рассмотрим этот факт на примере одной детали из некоторой совокупности таких же деталей. Ее ресурс является величиной случайной, определяемой параметрами совокупности, истинные параметры которой являются неизвестными и оцениваются только по параметрам выборочного распределения. Относительный размах выборочного распределения может быть определен по формуле:

где Tr_{max} — максимальное значение ресурса в выборке; Tr_{min} — минимальное значение ресурса в выборке.

$$R = \frac{Tr_{max} - Tr_{min}}{Tr_{min}} \quad (2)$$

Здесь следует отметить, что для выборки, как и для совокупности, выполняется принципиальное условие: $Tr_{min} > 0$. Поэтому для описания статистических закономерностей рекомендуется применять вероятностный закон со сдвигом Вейбулла (для прочности и ресурса) и закон Фишера-Типпета (для действующих напряжений). Распределения, полученные при использовании данных законов, имеют ограничения слева и справа соответственно. Кроме того, по форме функции распределения можно анализировать изменение интенсивности отказов с течением времени.

Тогда относительный размах, оцениваемый по формуле (2), отражающий отклонение крайнего верхнего значения выборочного распределения относительно крайнего минимального значения, может составлять от нескольких единиц до сотен и более. Поэтому плотность распределения ресурса деталей для выборки и совокупности может по-разному располагаться относительно заданного ресурса машины, например, как показано на рис. 1.

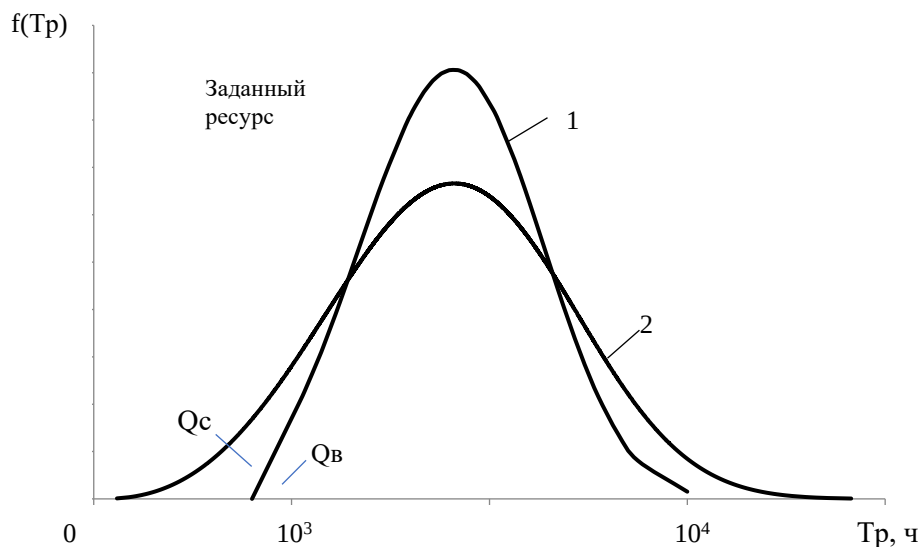


Рис. 1. Кривые плотностей распределения вероятности отказа для выборки (1) и совокупности (2) для трехпараметрического закона Вейбулла

Можно сделать вывод, что результат оценивания вероятности безотказной работы детали определяется степенью адекватности переноса результатов выборочных испытаний на совокупность. Очевидно, что распространение точечных оценок параметров распределения двухпараметрического закона Вейбулла, получаемых методом наименьших квадратов, может привести к завышению расчетных показателей вероятности безотказной работы, т.е. занижению риска. Основная причина этого заключается, как отмечается в [1], в оценке параметра сдвига только по результатам выборочных испытаний. При этом объем совокупности никак не учитывается. Однако можно предположить, что при увеличении объема рассматриваемой совокупности будет происходить уменьшение истинной величины минимального ресурса Tr_{min}^i , т.е. в совокупности всегда найдется деталь, ресурс которой меньше определенного значения в ходе выборочных испытаний: $Tr_{min}^i < Tr_{min}$.

Поэтому с целью повышения достоверности оценки безопасности деталей по выборке и приближении ее к истинному значению, определяемому по совокупности, необходимо скорректировать кривую плотности распределения для опасных и недиагностируемых отказов.

Для корректировки параметров распределения предлагается использовать следующую методику.

На первом этапе по результатам испытаний, в соответствии с рекомендациями [4], определяются параметры формы β_v и масштаба η_v для выборки объемом n . Минимальное значение ресурса в выборке принимается в качестве выборочного параметра сдвига $T_{0v} = T_{p\min}$.

На втором этапе определяется параметр сдвига для совокупности. В первую очередь параметр сдвига требует физического обоснования. Для рассматриваемой случайной величины — технического ресурса — таким физическим ограничением является нулевой ресурс. Поэтому здесь предлагается вероятностный подход. В соответствии с ним задается объем совокупности N , квантиль распределения Стьюдента $d = t_p(N - 1)$, у которого степень свободы $(N - 1)$ и уровень доверительной вероятности p . Далее определяется параметр сдвига для совокупности по следующей формуле:

$$T_{0c} = T_{0v} \left(1 - e^{-\frac{d}{\beta_v \sqrt{N-n}}} \right). \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что при возрастании $(N - n)$, т.е. при возрастании объема совокупности, параметр сдвига уменьшается в пределе до нуля, что соответствует существующему физическому ограничению.

На третьем этапе происходит коррекция параметров формы β_c и масштаба η_c для совокупности в соответствии с формулами, предложенными в работе [5, 6]. Достоверность такой корректировки доказывается в работе [5].

Алгоритм построения трехпараметрического закона Вейбулла для совокупности по выборочным данным приведен на рис. 2 и представляет собой следующую схему расчета параметров.

1. По исходному выборочному ряду X оцениваются следующие числовые характеристики: среднее значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ_x , коэффициент вариации C_v , коэффициент асимметрии C_s и минимальное значение $X_{\min}$.

2. В зависимости от C_s определяется значение коэффициента вариации C_v для совокупности, используя аппроксимирующее выражение:

$$C_v = 0,0009 \times C_s^4 - 0,0105 \times C_s^3 + 0,0277 \times C_s^2 + 0,3234 \times C_s + 0,31,$$

3. Коэффициент вариации C_v определяет значение коэффициента формы распределения совокупности β_c по формуле:

$$\beta_c = 0,9889 \times C_v^{-1,093}.$$

Для подтверждения методики проведем численный эксперимент, суть которого заключается в проведении следующей последовательности действий:

- признание параметров заданной совокупности истинными;
- моделирование вариационного ряда совокупности требуемого объема;
- формирование из истинной совокупности выборочных распределений объемом n в количестве m ;
- определение самого невыгодного варианта с максимальным значением сдвига выборки;
- корректировка сдвига и расчет параметров формы и масштаба для скорректированной выборки;
- сравнение скорректированных параметров с истинными.

Очевидно, что в реальных условиях проведения наблюдений (испытаний) в период эксплуатации машины можно получить лишь начальный участок левой ветви. При этом партия машин должна быть представительной и составлять из не менее 30 машин с наработкой 8–10 тыс. часов. Получение же экспериментальных данных для статистической обработки и построение всей кривой распределения ресурса объекта за весь период эксплуатации является невозможной задачей.

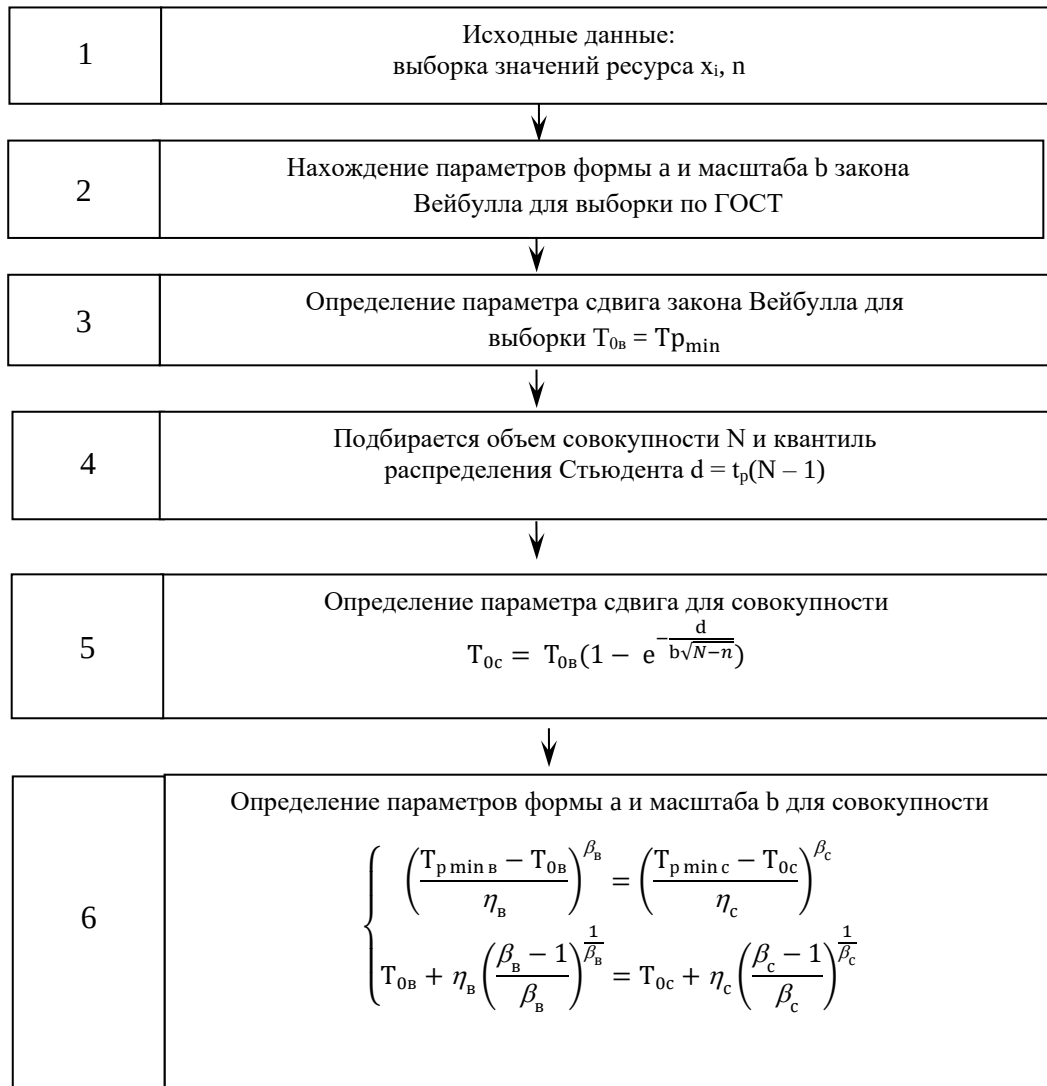


Рис. 2. Алгоритм определения трех параметров закона Вейбулла для совокупности по выборочным данным

Поэтому был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого для выборочных данных ресурса детали (деталей) объемом $n=50$ определены параметры трехпараметрического распределения Вейбула выборки.

Результаты исследования. По предложенному выше алгоритму и последовательности действий проведен численный эксперимент. Первоначально задали параметры истинной совокупности, смоделировали вариационный ряд совокупности объемом $N=10^4$, из него извлекли случайным образом выборки объемом $n=50$ в количестве $m=5$; $n=100$ в количестве $m=1$; $n=150$ в количестве $m=1$ и $n=1000$ в количестве $m=1$. Далее выбрали наиболее худший вариант выборки, соответствующий максимальному отклонению значения сдвига от сдвига совокупности. Плотности распределения закона Вейбулла для исходной совокупности и выборок, полученных из нее, приведены на рис. 3.

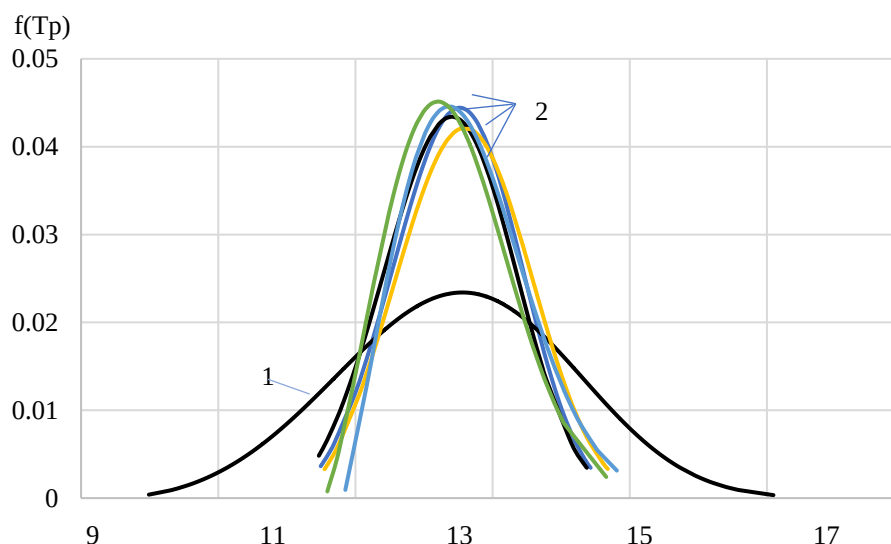


Рис. 3. Плотности распределения совокупности (1), моделированных из нее выборок объемом $n=50$ (2)

По результатам расчетов оцениваем параметры, сравнивая между собой значение сдвига истинной совокупности и выборок, взятых из нее (таблица 2).

Таблица 2

Параметры выборок и совокупности

Параметры	Совокупность	Выборки объемом n=50					
			1	2	3	4	5
a	155 900	Исходные	132 787	154 333	143 348	138 096	167 488
		Корректир.	135 008,7	159 917,03	151 330,36	143 957,4	166 778,2
b	1,07	Исходные	1,07	0,98	0,96	1,02	0,92
		Корректир.	1,19	1,20	0,95	1,13	0,94
x min	5 509	Исходные	7 344	6 007	6 813	5 962	7 491
		Корректир.	8 160,36	6 675,00	7 569,74	6 625,23	7 490,71
Δ, %			10,004	10,007	9,997	10,011	0

Анализ показывает, что выборочные параметры сдвига существенно отличаются от сдвига совокупности. Вероятность попадания в реальное значение сдвига минимальная, а увеличение объема выборок не дает гарантии попадания в нее минимального значения совокупности. Поэтому, чтобы добиться снижения рисков наступления опасного отказа, необходима корректировка параметров.

Для определения уровня достоверности при корректировке параметра сдвига трехпараметрического распределения Вейбулла предлагается критерий параметрической достоверности:

$$D_{ВБР} = e^{-\left(1 - \frac{n}{N}\right) \Delta} \quad (4)$$

где n и N — соответственно объемы выборок и генеральных совокупностей конечного объема; Δ — отклонение параметров выборочных распределений от истинного значения параметров совокупности.

Расчеты показали, что критерий параметрической достоверности для выборки с максимальным значением сдвига составляет 0,67.

Для проведения корректировки берем самый невыгодный вариант, то есть с максимальным значением сдвига выборки относительно значения совокупности. Графическое представление плотностей распределения этих выборок приведено на рис. 4.

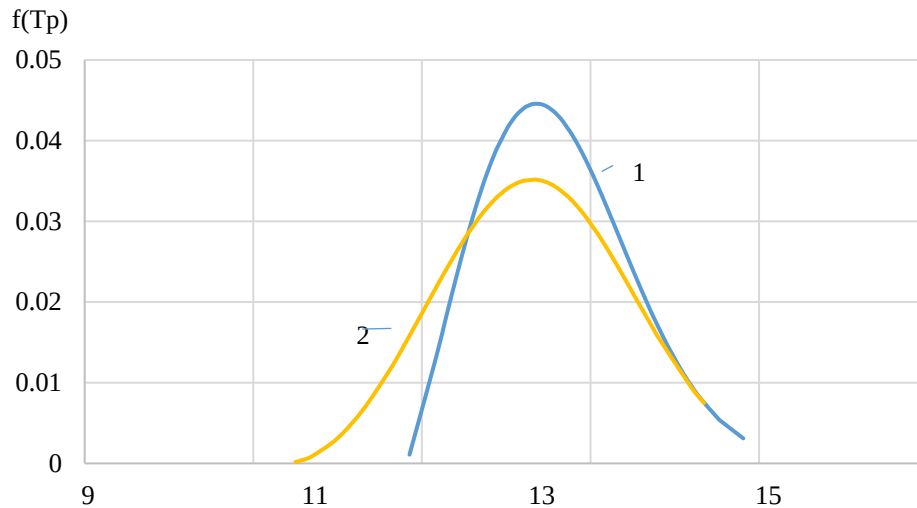


Рис. 4. Плотности распределения исходной (1) и скорректированной (2) выборок

Определение риска неконтролируемого опасного отказа детали стрелы одноковшового экскаватора ЕК-14

В качестве апробации предложенного метода определения параметров совокупности по выборочным данным рассмотрен пример для ответственной детали одноковшового экскаватора — боковой стенки стрелы с усталостным ресурсом до списания $T_p=20$ тыс. ч. Заданный ресурс определяется заводом изготовителем как ресурс до списания. Для стрелы, как базового элемента экскаватора, заданный ресурс составляет 20 тысяч часов.

Стрела одноковшового экскаватора ЕК-14 имеет коробчатое сечение, выполненное из проката стали Ст3, с толщиной боковой стенки 10 мм. Опыт эксплуатации показал, что отказ стрелы заключается в появлении усталостной трещины в опасном сечении, а различного рода ремонтные мероприятия не решали проблему роста трещины. Единственным решением проблемы является ее замена. Поэтому для стрелы определены выборочные данные по ресурсу и осуществлен переход от выборочных данных к параметрам совокупности [14, 16, 17].

Численный и натурный эксперимент показывает, что достоверность определения параметра сдвига совокупности по данным выборочных испытаний не отвечает необходимым требованиям. Поэтому необходимо производить корректировку полученных данных по предлагаемой методике.

Далее по предложенной последовательности из совокупности получена и откорректирована выборка. Корректировка параметров выборочного распределения позволила приблизиться к параметру сдвига совокупности, но не достичь его. Причем параметр сдвига совокупности не достиг значения в 10 тысяч часов, что в два раза ниже заданного ресурса, и подтверждает наличие преждевременных отказов.

Поэтому для деталей из базовой группы предлагается сдвигать (увеличивать) значение ресурса с помощью изменения параметров конструкции. Например, увеличить предел выносливости стали, заменив сталь серийного выпуска детали на более прочную, и (или) уменьшить действующее напряжение путем увеличения толщины стенки или размеров сечения. В работах [14, 15] рассчитаны и сравнены значения ресурса для боковой стенки стрелы с вариантами рекомендаций по изготовлению детали. Рекомендации предусматривали: увеличение толщины стенки с 10 до 12, а затем до 14 мм прокатного листа в опасном сечении детали; замену используемой марки стали Ст3 (малоуглеродистой) на низколегированные 09Г2С или 15ХСНД; увеличение опасного сечения стрелы до 20 %.

Параметры нагруженности задаются детерминировано. Усталостная прочность детали ограничена снизу имеющимся контролем материала и готовой детали, а нагруженность — сверху расчетными режимами работы и наличием элементов безопасности (предохранительных клапанов, муфт предельного момента и т.п.). Поэтому при усталостном разрушении деталей для генеральной совокупности возможны случаи, когда параметры нагруженности превышают параметры усталостной прочности вследствие воздействия неконтролируемых случайных факторов. Следствием этого является необходимость ограничения снизу ресурса детали, определяемого по распределению генеральной совокупности, а не по выборке.

Расчеты показали значение вероятности безотказной работы 0,9989 для стрелы одноковшового экскаватора, изготовленной из стали 15ХСНД с толщиной прокатного листа 12 мм, а вероятность отказа соответственно — 0,0011.

Обсуждение и заключения. Для создания безопасных машин необходимо, чтобы обоснованный по предлагаемой методике минимальный ресурс базовых деталей стремился к значению заданного ресурса машины. Исключением из этого правила являются только некоторые детали с преждевременными отказами, причины

возникновения которых установить невозможно из-за отсутствия соответствующих методов и средств. Кроме того, допустимы плановые замены отдельных деталей с низким ресурсом (увеличение их ресурса невозможно или нецелесообразно). Отказы таких деталей не влияют на безопасность машины.

Таким образом, обоснован новый подход к оцениванию риска эксплуатации производственных объектов в случае возникновения опасных и недиагностируемых системами безопасности отказов базовых деталей, приводящих к негативным последствиям.

Список литературы

1. Панфилов А.В., Дерюшев В.В., Короткий А.А. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;5:48–55. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55>
2. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И. и др. *Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем*. Новосибирск: Наука; 2021. 795 с.
3. Deryushev V.V., Kosenko E.E., Kosenko V.V., et al. Technical decisions in uncertain environment at risk. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;2:56–61.
4. Котесов А.А. Методика определения параметров вероятностного распределения совокупности прочностных характеристик конструкционных сталей по выборочным данным. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2020;4:23–29. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2020_4_23
5. Сикан А.В. Практические приемы оценки параметров распределения Вейбулла при выполнении гидрологических расчетов. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2011;19:37–45.
6. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем. *Вычислительные технологии*. 2009;14(6):58–70.
7. Doronin S.V., Reizmunt E.M., Rogalev A.N. Erratum to: Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018;47(4):387. <https://doi.org/10.3103/S1052618818040167>
8. Doronin S.V., Reizmunt E.M., Rogalev A.N. Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017;46(4):364–369. <https://doi.org/10.3103/S1052618817040069>
9. Kotesova A.A., Teplyakova S.V., Popov S.I., et al. Ensuring assigned fatigue gamma percentage of the components. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019;698(6):066029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/6/066029>
10. Лепихин А.М. Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования. *Вопросы материаловедения*. 2007;3:208–213.
11. Doronin S., Rogalev A. Numerical approach and expert estimations of multi-criteria optimization of precision constructions. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018;2098:323–337.
12. Махутов Н.А. *Безопасность и риски: системные исследования и разработки*. Новосибирск: Наука; 2017. 724 с.
13. Биргер И.А. *Техническая диагностика*, 2-е изд. Москва: URSS: ЛЕНАНД; 2018. 238 с.
14. Клюев В.В., Лозовский В.Н., Савилов В.П. *Диагностика деталей машин и механизмов*: в 2 ч. Ч. 1. В.В. Клюев (ред.). Москва: Спектр; 2017. 176 с.
15. Клюев В.В. (ред.). *Неразрушающий контроль*: справочник в 8 т. Т. 1 в 2 кн. Кн. 1: Соснин Ф.Р. *Визуальный и измерительный контроль*. Кн. 2: Соснин Ф.Р. *Радиационный контроль*. 2-е изд., испр. Москва: Машиностроение; 2008. 560 с.
16. Махутов Н.А., Албагачиев А.Ю., Алексеева С.И. и др. *Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин*. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»; 2008. 574 с.
17. Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Doronin S.V., et al. Probabilistic modeling of safe crack growth and estimation of the durability of structures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2000;23(5):395–401. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00303.x>

References

1. Panfilov AV, Deryushev VV, Korotkii AA. Recommended Safety Systems for Risk-Oriented Approach. *Occupational Safety in Industry*. 2020;5:48–55. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55> (In Russ.).
2. Moskvichev VV, Makhutov NA, Shokin YuI, et al. *Prikladnye zadachi konstruktivnoy prochnosti i mekhaniki razrusheniya tekhnicheskikh sistem*. Novosibirsk: Nauka; 2021. 795 p. (In Russ.).

3. Deryushev VV, Kosenko EE, Kosenko VV, et al. Technical decisions in uncertain environment at risk. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;2:56–61.
4. Kotesov AA. Method for determining the parameters of the probability distribution of the population strength characteristics of structural steels based on sample data. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2020;4:23–29. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2020_4_23 (In Russ.).
5. Sikan AV. Practical procedures of estimating parameters of Weibull distribution for hydrological computations. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2011;19:37–45. (In Russ.).
6. Lepikhin AM, Moskvichev VV, Doronin SV. Reliability, survivability and safety for complex technical systems. *Computational Technologies*. 2009;14(6):58–70. (In Russ.).
7. Doronin SV, Reizmunt EM, Rogalev AN. Erratum to: Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018;47(4):387. <https://doi.org/10.3103/S1052618818040167>
8. Doronin SV, Reizmunt EM, Rogalev AN. Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017;46(4):364–369. <https://doi.org/10.3103/S1052618817040069>
9. Kotesova AA, Teplyakova SV, Popov SI, et al. Ensuring assigned fatigue gamma percentage of the components. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019;698(6):066029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/6/066029>
10. Lepikhin AM. Nerazrushayushchii kontrol' i otsenka opasnosti defektov svarki na stadii ekspluatatsii oborudovaniya. *Materials of science issues*. 2007;3:208–213. (In Russ.).
11. Doronin S, Rogalev A. Numerical approach and expert estimations of multi-criteria optimization of precision constructions. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018;2098:323–337.
12. Makhutov NA. *Bezopasnost' i riski: sistemnye issledovaniya i razrabotki*. Novosibirsk: Nauka; 2017. 724 p. (In Russ.).
13. Birger IA. *Tekhnicheskaya diagnostika*, 2nd ed. Moscow: URSS: LENAND; 2018. 238 p. (In Russ.).
14. Klyuev VV, Lozovskii VN, Savilov VP. *Diagnostika detalei mashin i mekhanizmov*: in 2 parts. Part. 1. V.V. Klyuev (Ed.). Moscow: Spektr; 2017. 176 p. (In Russ.).
15. Klyuev VV. (Ed.). *Nerazrushayushchii kontrol'*: ref in 8 vol. Vol. 1 in 2 books. Book. 1: Sosnin FR. *Vizual'nyi i izmeritel'nyi kontrol'*. Book. 2: Sosnin FR. *Radiatsionnyi kontrol'*. 2nd ed., rev. Moscow: Mashinostroenie; 2008. 560 p. (In Russ.).
16. Makhutov NA, Albagachiev AYu, Alekseeva SI, et al. *Prochnost', resurs, zhivuchest' i bezopasnost' mashin*. Moscow: LIBROKOM Publishing house; 2008. 574 p. (In Russ.).
17. Lepikhin AM, Moskvichev VV, Doronin SV, et al. Probabilistic modeling of safe crack growth and estimation of the durability of structures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2000;23(5):395–401. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00303.x>

Об авторах:

Дерюшев Виктор Владимирович, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, [ORCID](#)

Теплякова Светлана Викторовна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [ScopusID](#), [ORCID](#), svet-tpl@yandex.ru

Зайцева Марина Михайловна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ScopusID](#), [ORCID](#), marincha1@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

В.В. Дерюшев — научное руководство, анализ результатов исследований. С.В. Теплякова — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов. М.М. Зайцева — анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов, подготовка текста, формирование выводов.

Поступила в редакцию 04.04.2023.

Поступила после рецензирования 22.04.2023.

Принята к публикации 23.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor V Deryushev, professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Eng.), [ORCID](#)

Svetlana V Teplyakova, associate professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci. (Eng.), [ScopusID](#), [ORCID](#), svet-tpl@yandex.ru

Marina M Zaitseva, associate professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci. (Eng.), associate professor, [ScopusID](#), [ORCID](#), marincha1@rambler.ru

Claimed contributorship:

VV Deryushev: academic advising, analysis of the research results. **SV. Teplyakova**: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations. **MM Zaitseva**: analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions, preparation of the text, formulation of the conclusions.

Received 04.04.2023.

Revised 22.04.2023.

Accepted 23.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ MACHINE BUILDING



УДК 614.8: [377+621.873+004.032.26]

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>

Научная статья



Влияние компетенций специалистов грузоподъемных кранов на вероятность возникновения аварийных ситуаций

В.В. Егельский^{ID}, Н.Н. Николаев^{ID}, Е.В. Егельская^{ID} ✉, А.А. Короткий^{ID}

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ egelskaya72@mail.ru

Аннотация

Введение. Эксплуатация грузоподъемных кранов является неотъемлемой частью производственных процессов. Для безаварийной работы этих механизмов необходимы определенные знания, умения и навыки, которыми должны обладать в том числе и специалисты, осуществляющие организационные и контролирующие функции на объектах, где задействованы такие краны. И здесь существует важная проблема — отсутствие обоснованной связи между уровнем освоения профессиональных компетенций и возможными аварийными ситуациями, а также различными инцидентами при эксплуатации грузоподъемных кранов. Авторы данного исследования пытаются решить ее. Их цель в связи с этим — посредством применения нейронных сетей дать оценку вероятности возникновения аварийной ситуации при эксплуатации грузоподъемных кранов в зависимости от уровня профессиональных компетенций специалистов.

Материалы и методы. Для обучения нейронных сетей в качестве исходных данных использовались компетенции работников по эксплуатации грузоподъемных кранов (знания, умения и трудовые обязанности), предусмотренные профессиональным стандартом «Специалист по эксплуатации подъемных сооружений». На их основе был составлен перечень возможных инцидентов. Для целей обучения сгенерированы результаты аттестации 200 условных работников. При генерации использовался метод Монте-Карло, и данные выведены в таблицы Excel. Обучение нейронных сетей производилось на языке Python 3.10 в среде разработки PyCharm. При обучении нейронных сетей использовались открытые библиотеки Keras и TensorFlow, а также вспомогательные библиотеки представления и обработки данных (Pandas, NumPy, Scikit-learn).

Результаты исследования. В результате получен инструмент — нейронная сеть в виде исполняемого программного кода, позволяющая выполнить оценку вероятности возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации грузоподъемных кранов посредством анализа степени владения специалистами профессиональными компетенциями. Предлагается осуществить внедрение технологий искусственного интеллекта на базе нейронных сетей с целью дать оценку знаний, умений и навыков специалистов объектов, эксплуатирующих грузоподъемные краны, как при проведении аттестации работников, так и в процессе трудовой деятельности.

Обсуждение и заключения. Основным результатом использования нейронных сетей для оценки знаний работников объектов, эксплуатирующих грузоподъемные краны, является предполагаемое снижение аварийности, что может быть обеспечено за счет своевременного выявления некомпетентного персонала на стадиях первичной аттестации и, что особенно важно, при периодических проверках знаний на основании беспристрастного анализа и оценки данных.

Ключевые слова: авария, грузоподъемный кран, вероятность, оценка, компетенция, человеческий фактор, нейронная сеть.

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам за помощь при подготовке материалов исследования.

Для цитирования. Егельский В.В., Николаев Н.Н., Егельская Е.В. и др. Влияние компетенций специалистов грузоподъемных кранов на вероятность возникновения аварийных ситуаций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2):70–79. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>

Original article

Influence of the Competencies of Lifting Crane Specialists on the Probability of Emergencies

Vladislav V Egelsky^{ID}, Nikolay N Nikolaev^{ID}, Elena V Egelskaya^{✉ ID}, Anatoliy A Korotki^{ID}

Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ egelskaya72@mail.ru

Abstract

Introduction. The operation of lifting cranes is an integral part of the production processes. For the trouble-free operation of these mechanisms, certain knowledge, skills and abilities are required, which should also be possessed by specialists performing organizational and supervisory functions at facilities where such cranes are involved. Here there is an important problem — the lack of a reasonable connection between the level of development of professional competencies and possible emergency situations, as well as various incidents during the operation of lifting cranes. The authors of this study are trying to solve it. Their goal in this regard is to assess the probability of an emergency during the operation of lifting cranes, depending on the level of professional competence of specialists, through the use of neural networks.

Materials and Methods. The competencies of workers in the operation of lifting cranes (knowledge, skills and work responsibilities) provided for by the professional standard "Specialist in the operation of lifting structures" were used as initial data to train neural networks. Based on them, a list of possible incidents was compiled. For the purposes of training, the results of the certification of 200 conditional employees were generated. During the generation, the Monte Carlo method was used, and the data were output to Excel tables. Neural networks were trained in Python 3.10 in the PyCharm development environment. Open libraries Keras and TensorFlow, as well as auxiliary libraries for data representation and processing (Pandas, NumPy, Scikit-learn) were used for neural networks training.

Results. As a result, a tool was obtained — a neural network in the form of executable program code, which makes it possible to assess the probability of emergencies during the operation of lifting cranes by analyzing the degree of proficiency of specialists in professional competencies. It is proposed to implement artificial intelligence technologies based on neural networks in order to assess the knowledge, skills and abilities of specialists of facilities operating lifting cranes, both during the certification of employees and in the course of work.

Discussion and Conclusion. The main result of using neural networks to assess the knowledge of employees of facilities operating lifting cranes is the expected reduction in accidents, which can be ensured by timely identification of incompetent personnel at the stages of primary certification and, most importantly, during periodic tests of knowledge based on an impartial analysis and evaluation of data.

Keywords: accident, lifting crane, probability, assessment, competence, human factor, neural network.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to their colleagues for their help in preparing the research materials.

For citation. Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, et al. Influence of the Competencies of Lifting Crane Specialists on the Probability of Emergencies. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):70–79. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>

Введение. Предприятия, эксплуатирующие подъемные сооружения (грузоподъемные краны, краны-манипуляторы, подъемники (вышки), подъемники строительные и т. д.), в соответствии с законодательством¹ относятся к опасным производственным объектам (ОПО), как правило, IV класса опасности, но также могут входить в состав объектов I, II или III классов опасности. Учет, контроль деятельности, расследование и учет аварий, произошедших на ОПО, возложены на Ростехнадзор.

По данным Ростехнадзора², в 2021 году на предприятиях и в организациях Российской Федерации эксплуатировалось порядка 600 тысяч подъемных механизмов, из них 209 935 — грузоподъемные краны. В 2021 году произошло 29 аварий при эксплуатации подъемных сооружений, 27 смертельных случаев. По

¹ О промышленной безопасности опасных производственных объектов. Федеральный закон № 116-ФЗ от 21.0.1997. КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (дата обращения: 18.01.2023).

² Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году. Ростехнадзор. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (дата обращения: 18.01.2023).

сравнению с 2020 годом, можно наблюдать незначительную положительную динамику — тогда случилось 30 аварий, 28 смертельных травмирований.

Наибольшее количество аварий в 2021 году, как и в 2015–2020 годах, произошло при эксплуатации башенных кранов:

- при эксплуатации башенных кранов в 2020 году произошло 12 аварий, в 2021 году — 13 аварий;
- при эксплуатации автомобильных кранов в 2020 году произошло четыре аварии, в 2021 году — тоже четыре аварии;
- при эксплуатации мостовых кранов в 2020 году произошла одна авария, в 2021 году — тоже одна авария;
- при эксплуатации козловых кранов в 2020 году произошла одна авария, в 2021 году — три аварии;
- при эксплуатации кранов-манипуляторов в 2020 году произошло две аварии, в 2021 году — тоже две аварии.

Анализируя приведенные выше данные, можно выделить среди прочих такую причину аварий, как отсутствие должного контроля за производственными процессами на объектах со стороны ответственных специалистов (человеческий фактор).

Причины аварий и несчастных случаев:

- отсутствие производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности со стороны руководства организации и владельцев опасного производственного объекта, а также лиц, ответственных за содержание подъемных сооружений в работоспособном состоянии и за безопасное производство работ;
- в отдельных организациях фиксируются факты неназначения ответственных за этот участок контроля специалистов, как того требуют нормативные правовые акты³;
- привлечение к производству работ персонала, не имеющего необходимой квалификации;
- отсутствие на объекте проектов производства работ, правил производства работ, должностных и производственных инструкций;
- несвоевременное проведение плановых осмотров, ремонтов и технических освидетельствований подъемных сооружений.

Нередко первопричиной допущенных нарушений в части не организованного надлежащим образом производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности является желание владельцев опасных производственных объектов снизить финансовые издержки.

Однако, как показывают статистика, а также многочисленные исследования на данную тему, существует прямая зависимость возникновения аварий на ОПО от уровня квалификации руководителей и ответственных специалистов [1–3].

Вероятность возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации грузоподъемных кранов определяется посредством оценки степени владения профессиональными компетенциями персонала. Чтобы оценивать такие знания, предлагается при проведении аттестации работников использовать технологии искусственного интеллекта на базе нейронных сетей.

В соответствии с указом Президента РФ⁴ и Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года применять технологии искусственного интеллекта на базе нейронных сетей для оценки остаточных знаний ответственных специалистов организаций, эксплуатирующих грузоподъемные краны, необходимо в следующих случаях:

- накануне проведения аттестации в аттестационных комиссиях предприятия или территориальной аттестационной комиссии Ростехнадзора;
- в случае возникновения аварии или травмирования (несчастного случая) на ОПО и др.

Уровень компетенции инженерно-технических работников ОПО, эксплуатирующих грузоподъемные краны, назначенных ответственными специалистами, определяется не только наличием профильного высшего профессионального образования, но и периодическими аттестациями согласно требованиям законодательства РФ, чему предшествует получение дополнительного профессионального образования для определенных категорий специалистов^{5,6}.

³Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 461 от 26 ноября 2020 года. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275657> (дата обращения: 30.03.2023).

⁴О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации. Указ Президента РФ № 490 от 10.10.2019. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/ (дата обращения: 30.03.2023).

⁵О подготовке и об аттестации в области промышленной безопасности, по вопросам безопасности гидротехнических сооружений, безопасности в сфере электроэнергетики. Постановление Правительства Российской Федерации № 1365 от 25 октября 2019 г. Информационно-правовая база РФ. URL: <https://ipbd.ru/doc/0001201910290010/> (дата обращения: 30.03.2023).

⁶Об аттестации в области промышленной безопасности, по вопросам безопасности гидротехнических сооружений, безопасности в сфере электроэнергетики. Постановление Правительства Российской Федерации № 13 от 13 января 2023 г. Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202301170020> (дата обращения: 30.03.2023).

Проверка уровня знаний и компетенций по итогам повышения квалификации в области промышленной безопасности осуществляется образовательными организациями посредством оценок, разработанных для конкретных программ [4–6].

Проверка уровня знаний и компетенций при прохождении периодических аттестаций в аттестационных комиссиях Ростехнадзора или эксплуатирующей организации осуществляется посредством тестирования в единой системе тестирования⁵. Итоги тестовых заданий будут способствовать оценке знания законодательных и нормативных документов, соответствующих области аттестации⁷.

Возникает также потребность оценить знания, умения и навыки специалистов ОПО, эксплуатирующих грузоподъемные краны, в соответствии с профессиональными стандартами для конкретных должностей⁸. При этом учитываются не только ответы на вопросы, то есть теоретические знания, но и умения и навыки посредством выполнения практических заданий (решение тематических задач, чтение чертежей, оформление соответствующей документации).

Материалы и методы. Во время аттестации по каждому виду проверок специалисты проставляют баллы. Аттестуемый должен набрать не менее 80 % правильных ответов для допуска к работе. Таким образом можно сформировать матрицу данных, а статистические данные в матрице связать с причинами аварий, травм и несчастных случаев. Тогда появляется возможность обучения нейронной сети, что позволит при выявлении недостаточных знаний, умений и навыков аттестуемого прогнозировать возможные аварии, травмы и несчастные случаи на объектах [7–9].

Профессиональный стандарт «Специалист по эксплуатации подъемных сооружений» предусматривает 132 компетенции, разделяющиеся на знания, умения и трудовые функции. Для обучения нейронной сети и удобства представления данных необходимо присвоить им буквенно-цифровые индексы. Результаты обучения условных аттестуемых специалистов получены методом Монте-Карло [10–12].

Полученные значения состоят из 0 и 1, что соответствует отрицательному и положительному (более 80 %) результату оценки владения соответствующей компетенцией. Генерация выполнена таким образом, чтобы данные были равномерно распределены по матрице и нейронная сеть обучалась на различных сочетаниях положительных и отрицательных оценок овладения компетенциями. При генерации были получены результаты аттестации 200 условных специалистов (рис. 1).

На основании данных Ростехнадзора об аварийных ситуациях на грузоподъемных кранах и перечня профессиональных компетенций сформулированы возможные инциденты, происходящие по причине недостаточного освоения специалистами профессиональных компетенций. Вероятность инцидента оценена в долях единицы и находится в диапазоне 0,0–1,0. Каждый из возможных инцидентов был соотнесен с набором компетенций из матрицы. Соответствующие инциденты и наборы компетенций, на них влияющие, представлены в таблице 1.

Производства работ, технологическими картами, технологическими регламентами и нарядами-допуске			
Трудовые действия		Необходимые умения	
Контроль соблюдения марочной системы при работе кранов мостового типа	Оформление необходимой документации	Организовывать документацию собственную деятельность и деятельность машинистов подъемных сооружений и стропальщиков, давать поручения и контролировать их выполнение	Осуществлять контроль выполнения требований промышленной безопасности и охраны труда машинистами подъемных сооружений и стропальщиками

Рис. 1. Матрица компетенций (фрагмент)

⁷ Об утверждении Перечня областей аттестации в области промышленной безопасности, по вопросам безопасности гидротехнических сооружений, безопасности в сфере электроэнергетики. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 334 от 4 сентября 2020 г. Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102040015> (дата обращения: 30.03.2023).

⁸ Об утверждении профессионального стандарта «Специалист по эксплуатации подъемных сооружений». Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ № 169н от 20 марта 2018 г. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542621605> (дата обращения: 30.03.2023).

Таблица 1

Возможные инциденты и влияющие на них компетенции

Вид инцидента	Влияющая компетенция	Количество компетенций
Травмирование посторонних лиц и работников без допуска в опасной зоне при работе подъемных сооружений	A1, A2, B1, B7, C1, C2, C8, C9, C11, D1, D4, D7, E2, E3, E5, F1, F2, F8, F9, F14	20
Травмирование работников при нарушении выполнения строповочных и грузовых операций	A3, A4, A5, A6, B2, B3, B4, B5, B6, B7, C6, D1, D2, D4, D7, E1, E2, E3, E5, F1, F2, F6	22
Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при нарушении требований к прокладке и содержанию крановых путей	C4, C14, D5, D6, D7, F4	6
Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при нарушении требований к прокладке, содержанию и ремонту крановых путей	C4, C14, D5, D6, D7, F6, H12, I4, I5, I8, J1, M11	12
Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при нарушении требований к складированию грузов	C5, D3, F5	3
Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при поражении электрическим током	C7, C13, E4, F7, F13, H8, K1, K14, M7, M18	10
Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при нарушении правил проведения технического обслуживания и ремонта	C3, F3, F11, G1, G2, G3, G4, G5, G6, H1, H2, H3, H4, H6, H7, H8, H9, H10, H13, H14, H15, H16, H18, H19, H20, I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, J1, J2, J3, J4, J5, J6, J8, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9, K10, K12, K14, L1, L2, L3, L4, L5, M1, M2, M3, M4, M6, M7	63
Причинение вреда здоровью и гибель людей в результате нарушения порядка действий и оказания помощи в чрезвычайных ситуациях	C12, F12, H5, H19, J7, K13, M5, M17	8
Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей вследствие ненадлежащего проведения освидетельствования и выбраковки стальных канатов, грузозахватных приспособлений, грузоподъемных механизмов	C10, F10, H11, H17, K11, M8, M9, M10, M11, M12, M13, M14, M15, M16, M18	15

Указанным в таблице 1 возможным инцидентам присвоены буквенно-цифровые индексы для удобства использования заголовков данных при обучении нейронной сети, а затем расчетным путем определены значения вероятностей возникновения инцидентов в зависимости от полноты освоения компетенций [13, 14] (рис. 2).

Полученные данные были использованы для обучения нейронной среды на языке Python 3.10 в среде разработки PyCharm Community Edition. Для обучения нейронной сети использована открытая библиотека глубокого машинного обучения TensorFlow, а также взаимодействующая с ней открытая библиотека Keras. Открытая библиотека Pandas применена для импорта данных из Excel в Python. Открытая библиотека NumPy использовалась для оптимизации структуры массивов данных с целью ускорения обучения нейронной сети.

С помощью открытой библиотеки Scikit-learn данные для обучения были разделены на тренировочные (train) — 70 %, тестовые (test) — 15 % и проверочные (validation) — 15 %.

Травмирование посторонних лиц и работников без допуска в опасной зоне при работе подъемных сооружений	Травмирование работников при нарушении выполнения строповочных и грузовых операций	Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при нарушении требований к прокладке и содержанию крановых путей	Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при нарушении требований к прокладке, содержанию и ремонту крановых путей	Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при нарушении требований к складированию грузов	Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при поражении электрическим током	Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей при нарушении правил проведения технического обслуживания и ремонта	Причинение вреда здоровью и гибель людей в результате нарушения порядка действий при оказании помощи в чрезвычайных ситуациях	Травмирование персонала и повреждение материальных ценностей вследствие ненадлежащего проведения освидетельствования и выбраковки стальных канатов, грузозахватных приспособлений, грузоподъемных механизмов
EMG1	EMG2	EMG3	EMG4	EMG5	EMG6	EMG7	EMG8	EMG9
0,25	0,27	0,33	0,25	0,33	0,10	0,25	0,38	0,00
0,25	0,23	0,17	0,33	0,67	0,10	0,32	0,25	0,27

Рис. 2. Матрица инцидентов (фрагмент)

В ходе обучения применялся метод «обучение с учителем», которым являлся массив тренировочных данных [15–17]. Обучение длилось 1000 эпох. В качестве модели обучения использовался многослойный перцептрон (MLP) как подкласс класса Model библиотеки Keras. Общая структура обучаемой нейронной сети представлена на рис. 3.

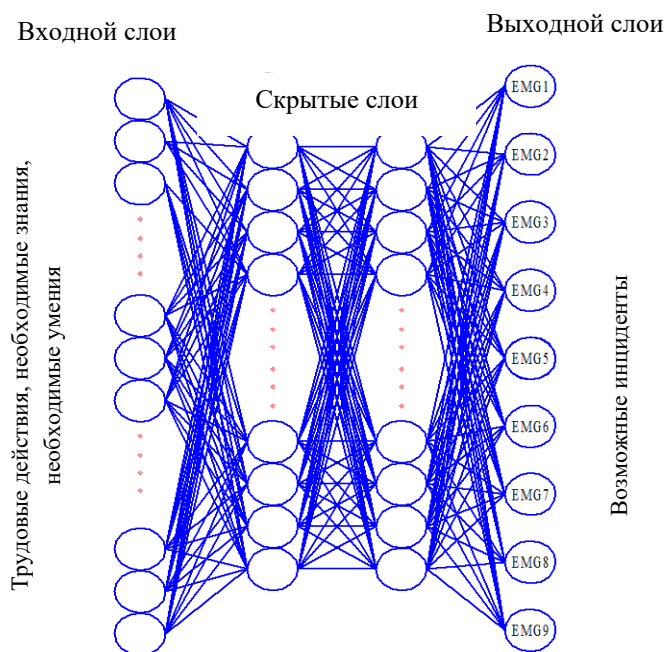


Рис. 3. Схема нейронной сети для оценки вероятности возникновения инцидентов на грузоподъемных кранах

Результаты исследования. В ходе обучения получена нейронная сеть MLP 132-25-9 (25 нейронов находятся в скрытых слоях), которая является программным продуктом, дающим возможность проводить оценку вероятности свершения инцидентов в зависимости от качества освоения профессиональных компетенций специалистами в области применения грузоподъемных кранов.

В процессе обучения нейронной сети использовались различные функции активации для скрытых слоев и выходного слоя. Наилучшие результаты получены при использовании в скрытом слое функции гиперболического тангенса (Tanh), а в выходном слое — тождественной функции (Identity).

В качестве функции ошибок использовалась функция среднеквадратичных ошибок (mean_squared_error). В результате удалось получить следующие значения ошибок на тренировочной, тестовой и проверочной выборке соответственно:

- тренировочная выборка — 0,0034;
- тестовая выборка — 0,0591;
- проверочная выборка — 0,0573.

По представленным значениям можно сделать вывод, что уровень полученных ошибок довольно низкий, значит, нейронная сеть обучена достаточно качественно для практического использования [18–20] (рис. 4).

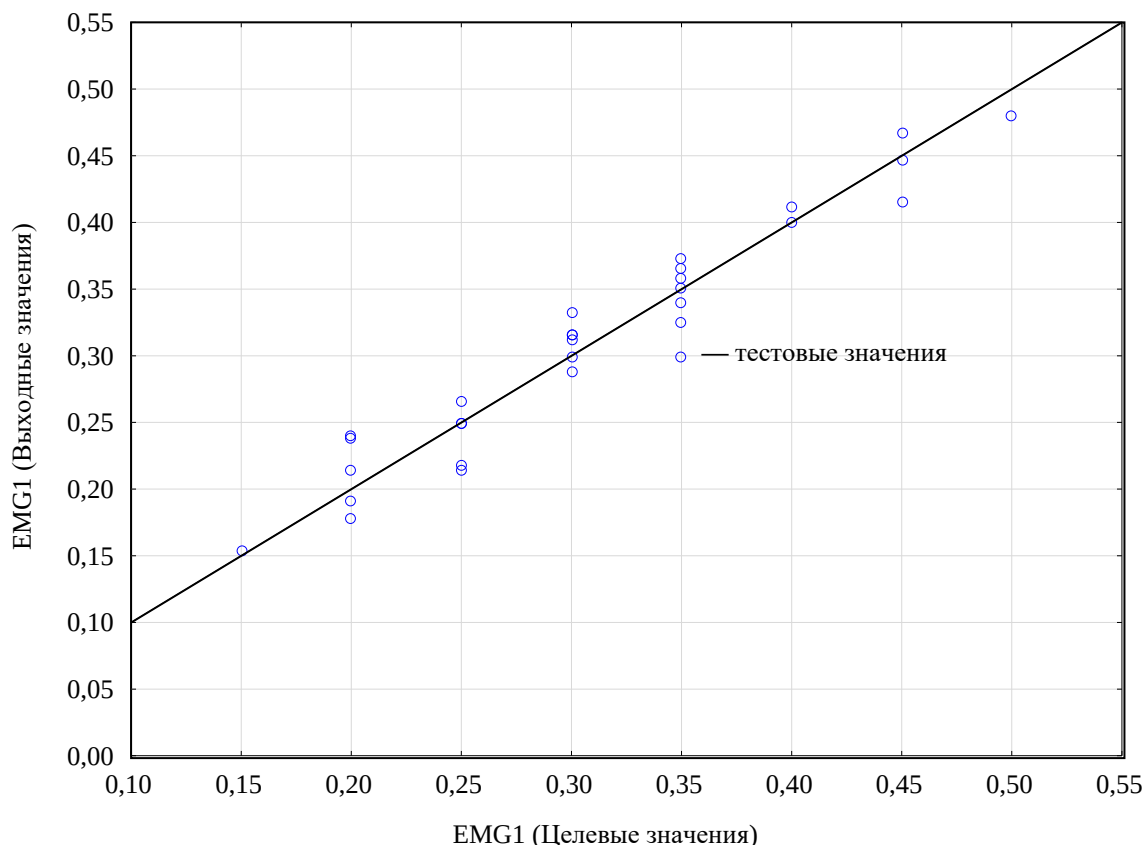


Рис. 4. Графическое представление результатов нейронной сети на тестовых данных

Обсуждение и заключения. Предложенное авторами программное решение, основанное на использовании нейронных сетей для оценки знаний работников объектов, эксплуатирующих грузоподъемные краны, предполагает снижение уровня аварийности, что может быть обеспечено посредством своевременного выявления некомпетентности специалистов не только в рамках аттестаций, но и на любых стадиях их профессиональной деятельности на основании беспристрастного анализа и оценки данных. В качестве результата применения разработанной программы можно ожидать принятия обоснованных решений о назначении или отказе в назначении на ответственные должности, связанные с осуществлением оцененных трудовых функций. Предполагаемым дальнейшим развитием данного решения может быть создание кроссплатформенного приложения, позволяющего оценивать и передавать результаты на устройства с различной архитектурой, в том числе мобильные.

Список литературы

1. Егельская Е.В., Каланчукова В.А. Анализ основных причин травматизма для персонала при эксплуатации подъемных сооружений. *Молодой исследователь Дона*. 2021;4:25–29.
2. Егельская Е.В., Романенко М.Ю. Аспекты применения риск-ориентированного подхода на опасных производственных объектах. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2020;4:45–49. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-45-49>
3. Панфилов А.В., Дерюшев В.В., Короткий А.А. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;5:48–55. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55>

4. Числов О.Н., Лябах Н.Н., Колесников М.Б. и др. Нейросетевое исследование транспортных систем. *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2021;10:9–13. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2021-10-2>
5. Турулев Р.Р. *Нейросети в системах корпоративного управления*. В: Труды II Всероссийской научно-практической конференции «Цифровизация: Россия и СНГ в контексте глобальной трансформации». Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука»; 2021. С. 7–16, <https://doi.org/10.46916/12042021-2-978-5-00174-191-6>
6. Barisic A.F., Barišić J.R., Miloloža I. Digital Transformation: Challenges for Human Resources Management. *ENTRENOVA — ENTERprise REsearch InNOVAtion*. 2021;7(1):365-375. <https://doi.org/10.54820/GTFN9743>
7. Haibin Qiu, Shanghong Shi, Tingdi Zhao, et al. Reference to the Safety Engineering Undergraduate Courses to Improve the Subjects and Contents of the Certified Safety Engineer Qualification and Examination System of China. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013;6(18):3320–3323. <https://doi.org/10.19026/rjaset.6.3641>
8. Kargar V., Jahangiri M., Alimohammadlu M., et al. Risk assessment of mobile crane overturning in Asymmetric Tandem Lifting (ATL) operation based on fuzzy fault tree analysis (FFTA). *Results in Engineering*. 2022;16:100755. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100755>
9. Szpytko J., Salgado Duarte Y. *Exploitation Efficiency System of Crane based on Risk Management*. In: Proceedings of International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics IN4PL. 2020, Vol. 1. P. 24–31. <https://doi.org/10.5220/0010123200240031>
10. Xing Yong, Li Fan, Sun Ke, et al. *Multi-type electric vehicle load prediction based on Monte Carlo simulation*. In: The 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems (CEES 2022). Tokyo, Japan; 2022, Vol. 8, Supplement 10. P. 966–972. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.264>
11. Szpytko J., Salgado Duarte Y. *Assessing Impacts of Vine-Copula Dependencies: Case Study of a Digital Platform for Overhead Cranes*. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics IN4PL. 2021, P. 187–196. <https://doi.org/10.5220/0010709900003062>
12. Stroganov Yu., Belov V., Belova N., et al. Analysis of model for assessing the road train movement stability. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889:042051. [10.1088/1742-6596/1889/4/042051](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042051)
13. Varadaraj A., Wadi Al B.M. A Study on Contribution of Digital Human Resource Management towards Organizational Performance. *International Journal of Management Science and Business Administration*. 2021;7(5): 43-51. <https://doi.org/10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.75.1004>
14. Saarikko T., Westergren U.H., Blomquist T. Digital transformation: Five recommendations for the digitally conscious firm. *Business Horizons*. 2020;63(6):825–839. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2020.07.005>
15. Тимофеев Г.О., Рошин А.Б. Повышение устойчивости тестов САРТСНА к распознаванию сверточными нейросетями. *Электросвязь*. 2022;6:39–45. <https://doi.org/10.34832/ELSV.2022.31.6.006>
16. Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Прогнозирование многомерных нестационарных временных рядов с использованием нейромоделирования. *Морские интеллектуальные технологии*. 2020;4(4):23–27. <https://doi.org/10.37220/MIT.2020.50.4.092>
17. Fuqiang Sun, Fangyou Fu, Haitao Liao, et al. Analysis of multivariate dependent accelerated degradation data using a random-effect general Wiener process and D-vine Copula. *Reliability Engineering and System Safety*. 2020;204:107168. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107168>
18. Kraus S., Jones P., Roig-Tierno N., et al. Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. *SAGE Open*. 2021;11(3). <https://doi.org/10.1177/21582440211047576>
19. Spirina A., Mironova A., Datkhuzheva R., et al. *Analysis of Occupational Injuries in Construction and Offer of a Technical Solution Increasing Tower Crane Stability*. In: XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. — Transportation Research Procedia. 2023, Vol. 68. P. 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.076>
20. Ozkeser B. *Impact of training on employee motivation in human resources management*. In: 3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship (WOCTINE). Procedia Computer Science. 2019, Vol. 158. P. 802–810. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.117>

References

1. Egelskaya EV, Kalanchukova VA. Analysis of the main causes of injuries to personnel in the operation of lifting devices. *Young Researcher of the Don*. 2021;4:25–29. (In Russ.).
2. Egelskaya EV, Romanenko MYu. Aspects of Application of a Risk-based Spproach to Hazardous Production Facilities. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;4:45–49. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-45-49>

3. Panfilov AV, Deryushev VV, Korotkiy AA. Recommended Safety Systems for Risk-Oriented Approach. *Occupational Safety in Industry* 2020;5:48–55. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55> (In Russ.).
4. Chislov ON, Lyabakh NN, Kolesnikov MV, et al. Neural Network Investigation of Transport Systems. *Transport: science, equipment, management*. 2021;10:9–13. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2021-10-2> (In Russ.).
5. Turulev RR. *Neiroseti v sistemakh korporativnogo upravleniya*. In: Trudy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Tsifrovizatsiya: Rossiya i SNG v kontekste global'noi transformatsii". Petrozavodsk: Mezhdunarodnyi tsentr nauchnogo partnerstva "Novaya Nauka"; 2021. P. 7–16. <https://doi.org/10.46916/12042021-2-978-5-00174-191-6> (In Russ.).
6. Barisic AF, Barišić JR, Miloloža I. Digital Transformation: Challenges for Human Resources Management. *ENTRENOVA — ENTERprise REsearch INNOVAtion*. 2021;7(1):365-375. <https://doi.org/10.54820/GTFN9743>
7. Haibin Qiu, Shanghong Shi, Tingdi Zhao, et al. Reference to the Safety Engineering Undergraduate Courses to Improve the Subjects and Contents of the Certified Safety Engineer Qualification and Examination System of China. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013;6(18):3320–3323. <https://doi.org/10.19026/rjaset.6.3641>
8. Kargar V, Jahangiri M, Alimohammadlu M, et al. Risk assessment of mobile crane overturning in Asymmetric Tandem Lifting (ATL) operation based on fuzzy fault tree analysis (FFTA). *Results in Engineering*. 2022;16:100755. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100755>
9. Szpytko J, Salgado Duarte Y. *Exploitation Efficiency System of Crane based on Risk Management*. In: Proceedings of International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics IN4PL. 2020, Vol. 1. P. 24–31. <https://doi.org/10.5220/0010123200240031>
10. Xing Yong, Li Fan, Sun Ke, et al. *Multi-type electric vehicle load prediction based on Monte Carlo simulation*. In: The 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems (CEES 2022). Tokyo, Japan; 2022, Vol. 8, Supplement 10. P. 966–972. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.264>
11. Szpytko J, Salgado Duarte Y. *Assessing Impacts of Vine-Copula Dependencies: Case Study of a Digital Platform for Overhead Cranes*. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics IN4PL. 2021, P. 187–196. <https://doi.org/10.5220/0010709900003062>
12. Stroganov Yu, Belov V, Belova N, et al. Analysis of model for assessing the road train movement stability. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889:042051. [10.1088/1742-6596/1889/4/042051](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042051)
13. Varadaraj A, Wadi Al BM. A Study on Contribution of Digital Human Resource Management towards Organizational Performance. *International Journal of Management Science and Business Administration*. 2021;7(5):43–51. <https://doi.org/10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.75.1004>
14. Saarikko T, Westergren UH, Blomquist T. Digital transformation: Five recommendations for the digitally conscious firm. *Business Horizons*. 2020;63(6):825–839. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2020.07.005>
15. Timofeev GO, Roshchin AB. Improving the resistance of captcha tests against automated recognition by convolutional neural networks. *Electrosvyaz Magazine*. 2022;6:39–45. <https://doi.org/10.34832/ELSV.2022.31.6.006> (In Russ.).
16. Epikhin AI, Kondratyev SI, Khekert EV. Predictiuo of multi-dimensijnal non-stationary time series using neuromodeling. *Marine Intellectual Technologies*. 2020;4(4):23–27 <https://doi.org/10.37220/MIT.2020.50.4.092> (In Russ.).
17. Fuqiang Sun, Fangyou Fu, Haitao Liao, et al. Analysis of multivariate dependent accelerated degradation data using a random-effect general Wiener process and D-vine Copula. *Reliability Engineering and System Safety*. 2020;204:107168. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107168>
18. Kraus S, Jones P, Roig-Tierno N, et al. Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. *SAGE Open*. 2021;11(3) <https://doi.org/10.1177/21582440211047576>
19. Spirina A, Mironova A, Datkhuzheva R, et al *Analysis of Occupational Injuries in Construction and Offer of a Technical Solution Increasing Tower Crane Stability*. In: XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. — Transportation Research Procedia. 2023, Vol. 68. P. 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.076>
20. Ozkeser B. *Impact of training on employee motivation in human resources management*. In: 3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship (WOCTINE). Procedia Computer Science. 2019, Vol. 158. P. 802–810. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.117>

Об авторах:

Егельский Владислав Витальевич, аспирант кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), sp_5sp_6pb_97n14@mail.ru

Николаев Николай Николаевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ScopusID](#), [ORCID](#), nnneks@yandex.ru

Егельская Елена Владимировна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [ORCID](#), egelskaya72@mail.ru

Короткий Анатолий Аркадьевич, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ORCID](#), [ScopusID](#), korot@novoch.ru

Заявленный вклад соавторов:

В.В. Егельский — подготовка данных для обучения нейронной сети. Н.Н. Николаев — разработка методики исследования, обучение нейронной сети. Е.В. Егельская — оценка состояния вопроса и актуальности исследования, участие в формировании исходной концепции, оформление результатов исследования. А.А. Короткий — обобщение результатов исследования, формулирование выводов.

Поступила в редакцию 10.04.2023.

Поступила после рецензирования 23.04.2023.

Принята к публикации 25.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vladislav V Egelskiy, postgraduate student of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), sp_5sp_6pb_97n14@mail.ru

Nikolay N Nikolaev, associate professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci. (Eng.), associate professor, [ScopusID](#), [ORCID](#), nnneks@yandex.ru

Elena V Egelskaya, associate professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci. (Eng.), [ORCID](#), egelskaya72@mail.ru

Anatoliy A Korotkiy, head of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Eng.), professor, [ORCID](#), [ScopusID](#), korot@novoch.ru

Claimed contributorship:

VV Egelskiy: data preparation for neural network training. NN Nikolaev: development of research methodology, neural network training. EV Egelskaya: assessment of the state of the issue and the relevance of the study, participation in the formulation of the initial concept, design of the research results. AA Korotkiy: generalization of the research results, formulation of the conclusions.

Received 10.04.2023.

Revised 23.04.2023.

Accepted 25.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.793.1(620.18+536.2)

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-80-89>

Научная статья



Инженерно-физический метод определения теплопроводности объектов микрометрической толщины со сложной структурой

О.В. Кудряков^{ID}, В.Н. Варавка^{ID}✉, Л.П. Арефьева^{ID}

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ varavkavn@gmail.com

Аннотация

Введение. Нанесение функциональных покрытий на изделия, у которых эксплуатационные свойства локализованы в поверхностном слое, — это тренд в современном машиностроении и науке о материалах. Рассматриваемые в этой связи вопросы актуальны, в частности, для термобарьерных покрытий лопаток турбин паровых и газотурбинных двигателей. Стоит отдельно упомянуть материалы, которые при эксплуатации испытывают значительные тепловые нагрузки. В таком случае представляется проблемой отсутствие надежных методов прогнозирования теплофизических свойств покрытия. Основной целью работы было создание расчетно-аналитической методики для определения теплопроводности покрытий. Данный подход базируется на экспериментальных данных и учитывает структурные параметры материала.

Материалы и методы. Эксперименты проводили с лопатками высокоскоростного газотурбинного локомотивного двигателя из жаростойкого хромоникелевого сплава Inconel 713LC. С помощью вакуумной ионно-плазменной технологии наносили экспериментальное многофазное покрытие интерметаллидной системы Nb-Ti-Al толщиной около 80 мкм. В работе использовали двулучевой сканирующий электронный микроскоп Zeiss CrossBeam 340. Теплопроводность покрытий определяли по экспериментальной методике, основанной на измерении контактной разности потенциалов (КРП). Численные значения этой разности получили с помощью зеркального гальванометра с высокой чувствительностью по напряжению. Для фиксирования показаний задействовали специальный усилитель сигнала и USB-осциллограф.

Результаты исследования. Расчетный аппарат методики определения теплопроводности базируется на экспериментальных значениях $\Delta\varphi$ КРП:

- для основного металла (Inconel 713LC) +846 мкВ;
- для покрытия Nb-Ti-Al — 90 мкВ.

Решение задачи о распределении частиц в силовом поле с разностью потенциалов $\Delta\varphi$ описывается распределением Больцмана. Отталкиваясь от полученного таким образом результата, узнали:

- КРП на границе соприкасающихся металлов;
- энергию и теплопроводность уровня Ферми;
- время релаксации электрона.

Рассмотрено разнонаправленное влияние, которое размерные различия частиц второй фазы оказывают на эффективную теплопроводность. Для этого случая найдено безразмерное значение эффективной теплопроводности в направлении каждой оси и эффективная теплопроводность композита. Пористость учтена по зависимости Максвелла — Эйкена и введена в общую систему расчетов. Установлена теплопроводность Nb-Ti-Al: $\lambda_{\text{NbTiAl}} = 4,76$ Вт/м·К. Таким образом, термобарьерное покрытие Nb-Ti-Al полностью отвечает своему функциональному назначению.

Обсуждение и заключения. Описанная в статье методика определения теплопроводности применима только к проводящим консолидированным материалам или композитам с непрерывной проводящей матрицей. Представленная работа завершает начальную стадию создания расчетно-аналитической модели прогнозирования теплопроводности материалов и покрытий. Итоги тестирования модели для материалов со сложной структурой показали ее удовлетворительную точность. Это свидетельствует о целесообразности использования двух

рассмотренных элементов модели. Первый — инструментальное измерение КРП. Второй — учет особенностей структурно-фазового состояния материала. С развитием модели предполагается преодолеть ее слабые места:

- невозможность использования для определения теплопроводности непроводящих объектов;
- значительное снижение точности определения теплопроводности для материалов и покрытий с градиентной структурой.

Ключевые слова: термобарьерные покрытия лопаток турбин, прогнозирование теплофизических свойств покрытия, Inconel 713LC, Nb-Ti-Al, определение теплопроводности, распределение Больцмана, контактная разность потенциалов, уровень Ферми, пористость по Максвеллу — Эйкену, теплопроводность непроводящих объектов, теплопроводность покрытий с градиентной структурой.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность к.ф.-м.н., проф. Сукиязову А.Г. за предоставление экспериментального оборудования и ценные рекомендации методического характера.

Для цитирования. Кудряков О.В., Варавка В.Н., Арефьева Л.П. Инженерно-физический метод определения теплопроводности объектов микрометрической толщины со сложной структурой. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2):80–89. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-80-89>

Engineering-Physical Method for Determining the Thermal Conductivity of Objects with Micrometric Thickness and a Complex Structure

Oleg V Kudryakov , Valeriy N Varavka ✉, Lyudmila P Arefeva 

Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ varavkavn@gmail.com

Abstract

Introduction. The application of functional coatings on products, the performance properties of which are localized in the surface layer is a trend in modern mechanical engineering and materials science. The issues considered in this regard are relevant, in particular, for thermal-barrier coatings of turbine blades of steam and gas turbine engines. It is worth mentioning the materials that experience significant thermal loads during operation. In this case, the lack of reliable methods for predicting the thermophysical properties of the coating seems to be a problem. The work objective is to create a computational and analytical methodology for determining the thermal conductivity of coatings. This approach is based on experimental data and takes into account structural parameters of the material.

Materials and Methods. The experiments were carried out with the blades of a high-speed gas turbine of a locomotive engine made of heat-resistant chromium-nickel alloy Inconel 713LC. An experimental multiphase coating of the Nb-Ti-Al intermetallic system with a thickness of about 80 microns was applied using vacuum ion-plasma technology. The two-beam scanning electron microscope Zeiss CrossBeam 340 was used in the work. The thermal conductivity of the coatings was determined by an experimental technique based on the measurement of the contact potential difference (CPD). Numerical values of this difference were obtained using a mirror galvanometer with high voltage sensitivity. A special signal amplifier and a USB oscilloscope were used to record the readings.

Results. The calculation apparatus of the thermal conductivity determination technique is based on the experimental values of $\Delta\phi$ CPD:

- for the base metal (Inconel 713LC) +846 mV;
- for the coating Nb-Ti-Al — 90 mV.

The solution to the problem of the distribution of particles in a force field with a potential difference $\Delta\phi$ is described by the Boltzmann distribution. Starting from the obtained result, we get:

- CPD at the boundary of the contacting metals;
- energy and thermal conductivity of the Fermi level;
- electron relaxation time.

The multidirectional influence that the dimensional differences of the particles of the second phase have on the effective thermal conductivity is considered. For this case, a dimensionless value of the effective thermal conductivity in the direction of each axis and the effective thermal conductivity of the composite are found. Porosity is taken into account according to the Maxwell—Aiken dependence and introduced into the general calculation system. The thermal conductivity of Nb-Ti-Al is established: $\lambda_{\text{NbTiAl}} = 4,76 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Thus, the thermal barrier coating Nb-Ti-Al fully meets its functional purpose.

Discussion and Conclusion. The method of determining thermal conductivity described in the article is applicable only to conductive consolidated materials or composites with a continuous conductive matrix. The presented work completes

the initial stage of creating a computational and analytical model for predicting the thermal conductivity of materials and coatings. The results of testing the model for materials with a complex structure showed its satisfactory accuracy. This indicates the expediency of using the two considered elements of the model. The first one is the instrumental measurement of the CPD. The second one is taking into account the features of the structural and phase state of the material. With the development of the model, it is expected to overcome its weaknesses:

- the impossibility of using non-conductive objects to determine the thermal conductivity;
- a significant decrease in the accuracy of determining thermal conductivity for materials and coatings with a gradient structure.

Keywords: thermal barrier coatings of turbine blades, prediction of thermal properties of the coating, Inconel 713LC, Nb-Ti-Al, determination of thermal conductivity, Boltzmann distribution, contact potential difference, Fermi level, Maxwell—Aiken porosity, thermal conductivity of non-conductive objects, thermal conductivity of coatings with gradient structure.

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to Cand. Sci. (Phys.-Math.), Professor Sukiyazov A.G. for providing experimental equipment and valuable methodological recommendations.

For citation. Kudryakov OV, Varavka VN, Arefeva LP. Engineering-Physical Method for Determining the Thermal Conductivity of Objects with Micrometric Thickness and a Complex Structure. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):80–89. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-80-89>

Введение. Полученные в целом ряде ведущих университетов и научно-исследовательских центров мира результаты по ионно-плазменной технологии модифицирования поверхности и нанесения покрытий свидетельствуют о больших возможностях данного метода для формирования физических, механических, коррозионных и функциональных свойств материалов. Одним из наиболее перспективных направлений исследований в этой области признаётся нанесение защитных покрытий на лопатки паровых турбин и турбин газотурбинных двигателей (ГТД). Такие покрытия классифицируются как износостойкие, однако на деле они являются полифункциональными и основной их функцией следует считать тепловую защиту. В рамках функции теплозащиты также существует своя дифференциация. Так, например, к подгруппе термобарьерных покрытий (thermal barrier coating — ТБС) относятся покрытия с низкой теплопроводностью, предназначенные для релаксации тепловой нагрузки на лопатки турбин ГТД. Характерными особенностями таких покрытий ТБС является химический состав на основе тугоплавких элементов и достаточно большая для вакуумных ионно-плазменных покрытий толщина — в пределах 100 мкм [1, 2].

В настоящее время ионно-плазменная технология является хорошо управляемым процессом. Однако прогнозирование и управление многими физическими свойствами остаётся серьёзной проблемой, поскольку, например, теплопроводность гетерофазных покрытий зависит от многих параметров нетехнологического характера: микроструктура матричной фазы, количество и конфигурация вторичных фаз, морфология пористости и др. [3, 4]. То есть проблема состоит в том, что задача формирования необходимой структуры покрытия решается на технологическом уровне, но задача определения теплопроводности сформированного покрытия к настоящему моменту не решена. Отсутствие решений связано со сложностью инструментального измерения свойств тонких пленок и покрытий и с отсутствием расчетного аппарата, учитывающего влияние структурных характеристик на теплопроводность покрытий. В связи с этим, основной целью работы была разработка расчетно-аналитической методики определения теплопроводности вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе легкодоступных измерительных методов и справочных данных.

Материалы и методы. Покрытие системы Nb-Ti-Al наносили с помощью вакуумной ионно-плазменной установки «PLATIT-80» в дуговом трехкатодном режиме с осаждением на литых лопатках ГТД, изготовленных из жаростойкого суперсплава Inconel 713LC. Помимо задачи создания расчетно-аналитической методики и использования её для определения теплопроводности покрытия, в работе стояла задача проверки валидности полученных расчетных значений. С этой целью разработанная методика была использована не только для определения теплопроводности покрытия, которая в настоящее время в научной литературе не встречается, но и для определения теплопроводности подложки — сплава Inconel 713LC, которая в соответствии со справочными данными¹ составляет 11,2–4,5 Вт/м·К в температурном интервале 25–800 °С. Сплавы семейства Inconel, как правило, представляют собой твёрдые растворы с растворёнными в никеле тугоплавкими элементами W, Co, Mo и др. Они стойки к термической усталости и окислению, жаропрочны до температур 950–1000 °С. Однако при

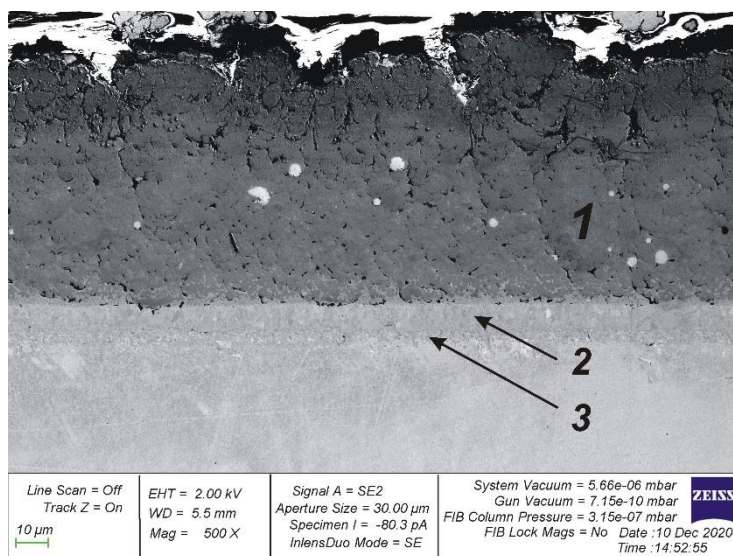
¹ *Engineering Properties of ALLOY 713C*. Brussels: Nickel Institute. URL: https://nickel institute.org/media/2487/alloys-713c_337.pdf (дата обращения: 10.04.2023).

длительной эксплуатации ГТД в интервале более высоких температур они испытывают разупрочнение, для защиты от которого используются термобарьерные покрытия. Среди требований к покрытиям ТВС основными являются условия, которые позволяют реализовать термобарьерный эффект — низкая теплопроводность и достаточно большая толщина [5–9]. Требования к структуре и фазовому составу не предъявляются. Поэтому исследуемое экспериментальное интерметаллидное покрытие Nb-Ti-Al включало тугоплавкие компоненты Nb и Ti с добавками Al, имело многофазный состав, сложную слоистую морфологию и общую толщину ~80 мкм.

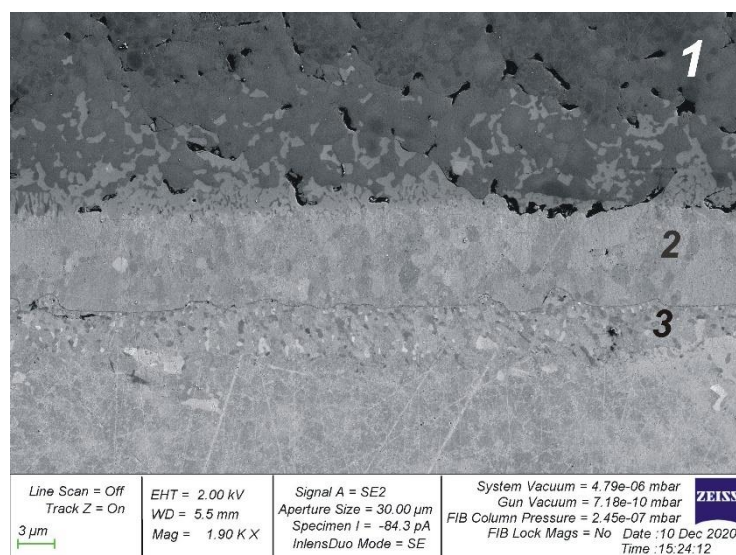
Величина контактной разности потенциалов (КРП), необходимая для вычисления теплопроводности расчетно-аналитическим методом, определялась с помощью экспериментальной лабораторной методики, использующей электроконтактный способ измерения, при котором один из медных электродов нагрет до температуры +60 °С. С точки зрения теории физических измерений данный способ направлен на определение протяженности потенциального барьера в точке контакта нагретого электрода и исследуемого объекта, на основе которого решается задача о равновесии электронов в двух соприкасающихся разнородных металлах. Инструментальная реализация способа осуществлялась с применением высокочувствительного зеркального гальванометра, измеряющего КРП в масштабе микровольт. В измерительной системе также использованы USB-осциллограф и усилитель сигнала для вывода измеряемых значений КРП на печать в заданном масштабе времени.

Поскольку разработанная методика расчета теплопроводности включает характеристики структурно-фазового состояния измеряемого объекта, в работе были выполнены микроструктурные исследования с использованием двулучевого растрового электронного микроскопа (SEM) Zeiss CrossBeam 340. Элементный состав покрытия и подложки изучался на поперечных сечениях с помощью рентгеновского энергодисперсионного анализа (EDAX) методами точечного зондирования и сканирования по площади произвольного контура. На основе данных SEM и EDAX выполнялась реконструкция фазового состава покрытия.

Результаты исследования. Одной из отличительных особенностей и признаков новизны создаваемой расчетно-аналитической методики является учет структурно-фазовых характеристик объекта при расчете его теплопроводности. Поэтому в качестве объекта исследования целенаправленно было выбрано покрытие со сложной структурой, состоящей из нескольких фаз, расположенных по глубине покрытия с различной плотностью распределения. В покрытии наблюдаются поры, имеющие неравномерное распределение по глубине. На рис. 1 в структуре покрытия NbTiAl по сечению выделяются три слоя, обозначенные цифрами. Хорошо видно, что они отличаются друг от друга толщиной, фазовым составом и пористостью. Причем, следует отметить, что самый верхний слой покрытия (наружный, не имеющий на рис. 1 а цифрового обозначения) содержит весьма разветвленную пористость, открыто контактирующую с атмосферой. Поэтому его теплопроводность фактически равна атмосферной. В силу этого обстоятельства наружный пористый слой был исключен из рассмотрения теплопроводности покрытия.



а)



б)

Рис. 1. Микроструктура термобарьерного покрытия NbTiAl в поперечном сечении, SEM: а — общий вид слоистой архитектуры покрытия; б — фрагмент области покрытия, прилегающей к подложке. Цифровые обозначения относятся к слоям с различным структурно-фазовым составом

Основную функцию термобарьерной защиты выполняет слой 1. Результаты детектирования по методу EDAX показали, что его элементный состав включает: 49–54 at. % Ti, 34,7–41,2 at. % Al, 6–8 at. % Nb. Причем по толщине слоя 1 элементы имеют градиентное распределение: Al возрастает к поверхности на 15–20 at. % вследствие облегченной диффузии легкоплавкого элемента при длительном нанесении покрытия и температуре 400–500 °C; Ti от подложки к поверхности убывает на 5–10 at. %, а Nb убывает на 2–6 at. %.

Реконструкция фазового состава слоя 1 на рис. 1, проведенная на базе полученных результатов элементного распределения EDAX-анализа, а также основываясь на данных немногочисленных литературных источников [10–15], дает основания полагать, что фаза с наиболее темным оттенком на рис. 1 является интерметаллидом Ti_3Al — фаза α_2 , легированная ниобием. Она состоит из 49–54 at. % Ti, 34,7–41,2 at. % Al и 6–8 at. % Nb. Фаза с наиболее светлым оттенком на рис. 1 также представляет собой фазу α_2 , помимо ниобия (до 8 at. % Nb), легированную никелем (9 at. % Ni). Как видно из рис. 1 а, светлая фаза — интерметаллид Ti_3Al (Nb,Ni) — занимает небольшую объемную долю в слое 1 (не более 5–7 %), в силу чего не оказывает существенного влияния на теплопроводность слоя. Никель не входит в состав напыляемого ионно-плазменного покрытия. Он обнаруживается в нижней части покрытия в результате диффузии из подложки в период длительного процесса напыления, который суммарно составлял около 20 часов (с учетом 4-х часового диффузионного отжига). За это время никель проникает в покрытие на толщину порядка 10–15 мкм, вытесняя алюминий в верхнюю часть покрытия.

Термобарьерное покрытие эксплуатируется при высоких температурах (>1000 °C) и в агрессивной атмосфере, ввиду чего должно быть стойким к высокотемпературной газовой коррозии. С этой целью при вакуумном ионно-плазменном напылении покрытий ТВС сначала на подложке формируется плотный беспористый подслои (boat coat) NbTiAl относительно небольшой толщины, основная функция которого — защита от проникновения окислителей к поверхности основного металла. В процессе последующего напыления наружного термобарьерного слоя антикоррозионный подслои насыщается элементами подложки, поэтому на рис. 1 б на его месте между подложкой и основным слоем 1 покрытия обнаруживаются два тонких слоя — 2 и 3. Слой 2 почти полностью представляет собой интерметаллид Ti_3Al (Nb,Ni). Он вносит свой небольшой вклад (соответствующий его небольшой толщине) в общую теплопроводность покрытия, что учитывает разрабатываемая расчетно-аналитическая методика. Слой 3 имеет более сложный гетерофазный состав, включающий, помимо основной интерметаллидной фазы α_2 , ещё никелиды титана и алюминия, что усложняет расчеты теплопроводности.

Ввиду большой толщины покрытия для сокращения времени его нанесения применялся форсированный режим напыления с отключенной магнитной сепарацией. Это приводит к формированию в вакуумной камере значительного количества капель. Капельная фаза в ионном потоке ведет к образованию пористости в покрытии. С точки зрения термобарьерного эффекта пористость не ухудшает свойства покрытия, поскольку воздух, заполняющий поры, — хороший теплоизолятор. Если же говорить о толщине покрытия,

то пористость — лимитирующий фактор. Если пор много и они открываются, то сильно разветвляют рельеф поверхности. Покрытие становится нестойким даже к слабым внешним воздействиям. При оценке и расчетах теплопроводности объемная доля пор и их морфология учитываются как одна из фазовых составляющих покрытия с известными теплофизическими характеристиками, присущими воздушной атмосфере.

По глубине покрытия пористость Π имеет градиентное распределение, так как капельная фаза в процессе нанесения покрытия частично залечивает поры нижележащих слоёв. Пористость оценивалась по мультимодальным микроструктурным изображениям покрытия с корреляционными настройками, заданными с помощью программного обеспечения «Zeiss Atlas 5», интегрированного в SEM Zeiss CrossBeam 340. После статистической обработки данных были получены следующие значения, использованные в дальнейшем при вычислениях интегральной теплопроводности покрытия системы Nb-Ti-Al: в верхней половине покрытия пористость Π составила 26 %, в нижней половине — 4 %, среднее значение Π по покрытию в целом находилось на уровне 10 %.

Физические основы и методика расчета теплопроводности. В качестве начальной стадии методика определения теплопроводности включает инструментальное измерение контактной разности потенциалов $\Delta\phi$. При этом разность температур между электродами фиксирована и составляет $\Delta T = 40$ К. Проведенные измерения показали следующие значения:

– $\Delta\phi_{Inconel} = +846$ мкВ — для основного металла лопаток сплава Inconel 713LC (подложка);

– $\Delta\phi_{NbTiAl} = -90$ мкВ — для термобарьерного покрытия трехкомпонентной системы Nb-Ti-Al.

Физический смысл использования величины КРП (при фиксированном значении ΔT) в процессе вычисления теплопроводности состоит в том, что $\Delta\phi$ определяет силовое электромагнитное поле, в котором распределение электронов на границе двух металлов (в нашем случае это медный электрод с концентрацией электронов n_0 и измеряемый металл с концентрацией электронов n_1) задается распределением Больцмана (1), из которого может быть получено значение энергии уровня Ферми E_F [16]:

$$n_0 = n_1 \cdot \exp\left(-\frac{q_e \cdot \Delta\phi}{kT}\right), \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \frac{kT}{q_e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_0}, \quad (2)$$

$$E_F = \frac{h^2}{8m_e} \cdot \left(\frac{3n_0}{\pi}\right)^{2/3} \cdot \exp\left(\frac{2q_e}{3k} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta T}\right), \quad (3)$$

где m_e , q_e — масса и заряд электрона; k , h — постоянные Больцмана и Планка.

Теплопроводность металлов и металлических сплавов определяется их электронной проводимостью. Поэтому в процессе вычислений методический переход от энергии уровня Ферми E_F к теплопроводности металлических систем λ осуществляется опосредованно — через расчет времени релаксации электрона τ , которое определяется по выражению [17]:

$$\tau = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^3} \cdot \frac{a^3 \cdot M \cdot \sqrt{m^*} \cdot k \cdot T_D}{h^2 \cdot C^2} \cdot \left(\frac{T_D}{T}\right) \cdot E_F^{3/2}, \quad (4)$$

где a — постоянная решетки; m^* — эффективная масса электрона, равная 10^{-27} г; M — масса колеблющегося атома; T_D — температура Дебая; $C = h^2 / (2m \cdot a^2)$ — константа интенсивности взаимодействия электрона с колебаниями решетки.

Тогда, в соответствии с классической теорией теплопроводности [17]:

$$\lambda = \frac{1}{3m} \cdot n_1 \cdot k^2 \cdot T \cdot \tau. \quad (5)$$

Расчетная модель, состоящая из выражений (1)–(5), применима для определения теплопроводности любого однофазного металлического сплава с однородной структурой, в том числе и для никелевого суперсплава Inconel 713LC, использованного авторами в виде подложки для термобарьерного покрытия NbTiAl. Однако для самого покрытия она недостаточна. Расчетная модель теплопроводности многофазной системы [18, 19], помимо теплопроводности изотропной матрицы λ_m , должна учитывать количество фаз, их форму, дисперсность распределения и теплопроводность λ_0 . В отношении этих параметров для таких двухфазных систем, к которым относится покрытие NbTiAl, могут быть приняты следующие приближения [19]:

– покрытие NbTiAl в каждом своём слое (см. слои 1, 2, 3 на рис. 1) является двухфазным и может рассматриваться как двухфазный композит, для которого принято определять эффективную теплопроводность λ , усредненную по трём пространственным осям, то есть по значениям $\tilde{\lambda}_\alpha$, где $\alpha = 1, 2, 3$;

– включения второй фазы аппроксимируются формой эллипсоида при соотношении полуосей $\bar{d} = d/l$;

– ориентация эллипсоидов произвольна и равновероятна, что соответствует реальной структуре покрытия NbTiAl, показанной на рис. 1, и позволяет исключить влияние на эффективную теплопроводность покрытия размерных различий включений второй фазы в разных пространственных направлениях;

– пористость также может рассматриваться как вторая фаза в однородной изотропной металлической матрице, что позволяет применять к ней приближения пп. 2 и 3; однако, в отличие от многих интерметаллидных фаз, пористость всегда уменьшает теплопроводность металлов и металлических сплавов; в соответствии с классической теорией [20] для теплопроводности твердого тела с непрерывной матрицей и изолированными пораами, применимо универсальное уравнение Максвелла–Эйкена, в котором пористость Π фигурирует в долях от общего объема твердого тела, который принимается за единицу:

$$\lambda_{\Pi} = \lambda \cdot (1 - \Pi) \cdot (1 + 0,5 \cdot \Pi), \quad (6)$$

Тогда расчетная модель теплопроводности многофазной системы, к которой относится и ионно-плазменное термобарьерное покрытие NbTiAl, наряду с выражениями (1)–(5), дополнится выражением для безразмерной эффективной теплопроводности в направлении каждой пространственной оси:

$$\tilde{\lambda}_\alpha = \frac{1 - (\bar{\lambda} - 1) \cdot (D_\alpha + (1 + D_\alpha) \cdot C_v)}{1 + (\bar{\lambda} - 1) \cdot D_\alpha \cdot (1 - C_v)}, \quad (7)$$

где $\tilde{\lambda}_\alpha = \lambda_\alpha / \lambda_m$, $\bar{\lambda} = \lambda_0 / \lambda_m$, $D_1 = D_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \bar{d}^2 \ln \frac{2}{\bar{d}} \right)$, $D_3 = \bar{d}^2 \left(\ln \left(\frac{2}{\bar{d}} \right) - 1 \right)$, C_v — объемная доля включений,

а также выражением для эффективной теплопроводности композита:

$$\lambda = \frac{2\tilde{\lambda}_1 + \tilde{\lambda}_3}{3} \cdot \lambda_m. \quad (8)$$

Методика определения теплопроводности многофазных металлических систем, основанная на измерении КРП и выражениях (1)–(8), позволяет рассчитать эффективную теплопроводность как основного металла лопаток — сплава Inconel 713LC, так и термобарьерного покрытия системы Nb-Ti-Al, с учетом их структурно-фазового состояния. Опуская подробности выполненных расчетов, ввиду ограниченного объема публикации, приведем лишь конечные результаты, полученные с использованием прикладного программного пакета MathCAD.

По данным рентгеновского энергодисперсионного анализа (EDAX) основной металл подложки — сплав Inconel 713LC — имел элементный состав Ni = 69,6 ат. %, Al = 13 ат. %, Mo = 2,8 ат. %, Cr = 14,6 ат. % и однородную структуру твердого раствора Cr, Al и Mo в никеле. В соответствии с расчетом по выражениям (1)–(8), включая приведенное выше значение КРП ($\Delta\varphi = +846$ мкВ), величина его теплопроводности составляет $\lambda_{\text{Inconel}} = 14,34$ Вт/м·К. Полученное значение с удовлетворительной точностью отвечает приведенным ранее справочным данным, составляющим для сплава Inconel 713LC интервал 11,2–14,5 Вт/м·К.

По сравнению с однофазным основным металлом, наличие многослойности и многофазности покрытия Nb-Ti-Al усложняет расчетную часть разработанной методики, связанную с влиянием структуры материала. Покрытие включало 4 слоя. Их основная фаза — интерметаллид Ti_3Al (Nb) с разной объемной долей присутствия в каждом слое и некоторым разбросом значений состава компонентов. В качестве второй фазы рассматривалась пористость. Только в самом тонком слое, примыкающем к основному металлу, второй фазой с объемной долей около 20 % был твердый раствор на базе интерметаллида Ti_3Al (Nb, Ni), содержащий до 9 ат. % Ni. Пористость в этом слое имела нулевое значение, поэтому каждый слой при расчетах рассматривался как двухфазный. Влияние структурно-фазового состояния покрытия на его теплопроводность учитывалось использованием выражений (6)–(8), исходя из измеренного значения КРП для покрытия в целом ($\Delta\varphi = -90$ мкВ).

Расчет теплопроводности покрытия NbTiAl показал, что $\lambda_{\text{NbTiAl}} = 4,76$ Вт/м·К. Полученное значение существенно ниже теплопроводности основного металла Inconel 713LC и соответствует уровню термостойкой керамики. Таким образом, экспериментальное гетерофазное покрытие, сформированное по вакуумной ионно-плазменной технологии на базе тугоплавких металлов Nb и Ti с присутствием Al, может использоваться в качестве термобарьерного покрытия.

Закключение. Разработанная расчетно-аналитическая методика позволяет прогнозировать и моделировать теплофизические свойства гетерофазных материалов со сложной структурой. Её апробация применительно к покрытиям микрометрической толщины открывает новые возможности в достаточно узком поле для диагностики свойств покрытий и тонких пленок.

Особенности предложенной методики определения теплопроводности через измерение КРП, расчет уровня энергии Ферми и некоторые другие факторы позволяют применять ее только к проводящим консолидированным материалам или композитам с непрерывной проводящей матрицей. Количество фаз в измеряемом сплаве или композите не ограничивается, причем фазы могут иметь неметаллическую и интерметаллидную природу (как в покрытии системы Nb-Ti-Al). Для определения теплопроводности материала или покрытия с помощью разработанной методики важны состав, объемная доля и пространственная морфология фаз. Это позволяет определить вклад каждой фазы в теплопроводность материала, а также применять методику к пористым материалам (при условии непрерывности их проводящей матрицы), идентифицируя поры как одну из фаз неметаллической природы.

Настоящая работа представляет собой завершение начальной стадии создания расчетно-аналитической модели прогнозирования теплопроводности материалов и покрытий. Приведенные результаты тестирования модели, полученные для материалов со сложной структурой, демонстрируют удовлетворительный уровень точности. Таким образом, можно утверждать обоснованность использования в модели описанных физических принципов и алгоритмов. В первую очередь, это методика инструментального измерения КРП и учет особенностей структурно-фазового состояния материала, на базе которых конструируется вычислительная часть модели. Результаты научных изысканий говорят о том, что модель должна развиваться, преодолевая ограничения и слабые места:

- невозможность ее использования для определения теплопроводности непроводящих объектов;
- значительное снижение точности определения теплопроводности для материалов и покрытий с градиентной структурой.

Список литературы

1. Padture N.P., Gell M., Padture N.P. et al. Thermal barrier coatings for gas turbine engine applications. *Science*. 2002;296:280–284.
2. Schulz U. Some recent trends in research and technology for advanced thermal barrier coatings. *Aerospace Science and Technology*. 2003;7:73–80.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД. *Авиационные материалы и технологии*. 2012;5:60–70.
4. Kim G.M., Yanar N.M., Hewitt E.N., et al. Influence of the type of thermal exposure on the durability of thermal barrier coatings. *Scripta Materialia*. 2002;46:489–495.
5. Freund L.B., Suresh S. *Thin film materials: stress, defect formation and surface evolution*. Boston: Cambridge University Press & Assessment; 2009. 750 p.
6. Evans H.E. High Temperature Coatings: Protection and Breakdown. In: *Shreir's Corrosion. Vol. 1: Basic Concepts, High Temperature Corrosion*. Amsterdam: Elsevier; 2010. P. 691–724.
7. Roy M. *Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear*. Wien: Springer-Verlag; 2013. 310 p.
8. Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М. и др. *Вакуумная ионно-плазменная обработка*. Москва: ИНФРА-М; 2014. 160 с.
9. Ellahi R. Recent Trends in Coatings and Thin Film: Modeling and Application. *Coatings*. 2020;10(8):777–785.
10. Banerjee D.A. A new ordered orthorhombic phase in Ti₃Al-Nb alloy. *Acta Metallurgica*. 1988;36:871–872.
11. Chaumat V., Ressouche E., Ouladdiaf B., et al. Experimental study of phase equilibria in the Nb-Ti-Al system. *Scripta Materialia*. 1999;40(8):905–911.
12. Полькин И.С., Колачев Б.А., Ильин А.А. и др. Алюминиды титана и сплавы на их основе. *Технология легких сплавов*. 1999;3:32–39.
13. Peng J.H., Mao Y., Li S.Q., et al. Microstructure controlling by heat treatment and complex processing for Ti₂AlNb based alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2001;209:75–80.
14. Raghavan V. Al-Nb-Ti (Aluminum — Niobium — Titanium). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2005;26(4):360–368.
15. Казанцева Н.В., Лепихин С.В. Исследование диаграммы состояния Ti-Al-Nb. *Физика металлов и металловедение*. 2006;102(2):184–195.
16. Кителъ Ч. *Введение в физику твердого тела*. Москва: Наука; 1978. 792 с.
17. Пчелинцев А.Н., Шишин В.А. Время релаксации электронов проводимости в металле. *Вестник Тамбовского государственного университета*. 2003;9(3):464–468.

18. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. и др. Теплопроводность композита, армированного волокнами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2013;5:75–81.
19. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. Оценка методом самосогласования эффективной теплопроводности трансверсального изотропного композита с изотропными эллипсоидальными включениями. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2015;3:99–109.
20. Карслоу Г., Егер Д. *Теплопроводность твердых тел*. Москва: Наука; 1964. 488 с.

References

1. Padture NP, Gell M, Padture NP et al. Thermal barrier coatings for gas turbine engine applications. *Science*. 2002;296:280–284.
2. Schulz U. Some recent trends in research and technology for advanced thermal barrier coatings. *Aerospace Science and Technology*. 2003;7:73–80.
3. Kablov EN, Muboyadzhyan SA. Zharostoikie i teplozashchitnye pokrytiya dlya lopatok turbiny vysokogo davleniya perspektivnykh GTD. *Aviation Materials and Technologies*. 2012;5:60–70.
4. Kim GM, Yanar NM, Hewitt EN, et al. Influence of the type of thermal exposure on the durability of thermal barrier coatings. *Scripta Materialia*. 2002;46:489–495.
5. Freund LB, Suresh S. *Thin film materials: stress, defect formation and surface evolution*. Boston: Cambridge University Press & Assessment; 2009. 750 p.
6. Evans HE. High Temperature Coatings: Protection and Breakdown. In: *Shreir's Corrosion. Vol. 1: Basic Concepts, High Temperature Corrosion*. Amsterdam: Elsevier; 2010. P. 691–724.
7. Roy M. *Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear*. Wien: Springer-Verlag; 2013. 310 p.
8. Ilin AA, Plikhunov VV, Petrov LM, et al. *Vakuumnaya ionno-plazmennaya obrabotka*. Moscow: INFRA-M; 2014. 160 p. (In Russ.).
9. Ellahi R. Recent Trends in Coatings and Thin Film: Modeling and Application. *Coatings*. 2020;10(8):777–785.
10. Banerjee DA. A new ordered orthorhombic phase in Ti₃Al-Nb alloy. *Acta Metallurgica*. 1988;36:871–872.
11. Chaumat V, Ressouche E, Ouladdiaf B, et al. Experimental study of phase equilibria in the Nb-Ti-Al system. *Scripta Materialia*. 1999;40(8):905–911.
12. Polkin I., Kolachev BA, Ilin AA, et al. Alyuminidy titana i splavy na ikh osnove. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 1999;3:32–39. (In Russ.).
13. Peng JH, Mao Y, Li SQ, et al. Microstructure controlling by heat treatment and complex processing for Ti₂AlNb based alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2001;209:75–80.
14. Raghavan V. Al-Nb-Ti (Aluminum — Niobium — Titanium). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2005;26(4):360–368.
15. Kazantseva NV, Lepikhin .V. Issledovanie diagrammy sostoyaniya Ti-Al-Nb. *The Physics of Metals and Metallography*. 2006;102(2):184–195. (In Russ.).
16. Kitel Ch. *Vvedenie v fiziku tverdogo tela*. Moscow: Nauka; 1978. 792 p. (In Russ.).
17. Pchelintsev AN, Shishin VA. Vremya relaksatsii elektronov provodimosti v metalle. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2003;9(3):464–468. (In Russ.).
18. Zarubin VS, Kuvyrkin GN, Savelyeva IYu, et al. Thermal Conductivity of Composite Reinforced with Fibers. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2013;5:75–81. (In Russ.).
19. Zarubin VS, Kuvyrkin GN, Savelyeva IYu. The Self-Consistent Scheme Estimation of Effective Thermal Conductivity for the Transversally Isotropic Composite with Isotropic Ellipsoidal Inclusions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2015;3:99–109. (In Russ.).
20. Karslou G, Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel*. Moscow: Nauka; 1964. 488 p. (In Russ.).

Об авторах

Кудряков Олег Вячеславович, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), kudryakov@mail.ru

Варавка Валерий Николаевич, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов», директор НОЦ «Материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), varavkavn@gmail.com

Арефьева Людмила Павловна, доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, доцент, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), ludmilochka529@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

О.В. Кудряков — научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, получение экспериментальных данных по определению КРП материалов и покрытий, обсуждение результатов, подготовка текста, формулирование заключения. В.Н. Варавка — планирование и организация экспериментов, проведение металлофизических исследований, анализ результатов, корректировка заключения. Л.П. Арефьева — идея и разработка расчетно-аналитической модели определения теплопроводности, выполнение расчетов, анализ и обсуждение результатов, участие в проведении экспериментальных исследований.

Поступила в редакцию 14.04.2023.

Поступила после рецензирования 27.04.2023.

Принята к публикации 02.05.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Oleg V Kudryakov, professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Eng.), professor, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), kudryakov@mail.ru

Valeriy N Varavka, professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Director of REC "Materials", Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Eng.), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), varavkavn@gmail.com

Lyudmila P Arefeva, associate professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Phys.-Math.), associate professor, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), ludmilochka529@mail.ru

Claimed contributorship:

OV Kudryakov: academic advising, formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, obtaining experimental data on determining the CP of materials and coatings, discussion of the results, preparation of the text, formulation of the conclusion. VN Varavka: planning and organization of experiments, conducting metallophysical studies, analysis of the results, correction of the conclusion. LP Arefieva: the idea and development of a computational and analytical model for determining thermal conductivity, calculations, analysis and discussion of the results, participation in experimental studies.

Received 14.04.2023.

Revised 27.04.2023.

Accepted 02.05.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621. 762. 1

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101>

Научная статья



Влияние содержания углерода на формирование контактной межчастичной поверхности при горячей допрессовке

М.С. Егоров , Р.В. Егорова , М.В. Ковтун

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ aquavdonsk@mail.ru

Аннотация

Введение. Технология получения горячедеформированной порошковой стали является одной из самых энергозатратных в порошковой металлургии, которая включает в себя большое количество операций. Изучение влияния технологических режимов на конечные свойства детали является актуальной задачей. Разработанная научным коллективом под руководством Ю.Г. Дорофеева в конце XX века технология изготовления горячедеформированных порошковых сталей на сегодняшний день является одной из главных в производстве высокоплотных изделий. Однако применение новых материалов, улучшающих механические свойства изделий, требует современного подхода к анализу качества межчастичного сращивания порошковых частиц. Установлено влияние на процесс формирования качественного межчастичного сращивания следующих технологических факторов: плотности заготовки, гранулометрического состава исходной шихты, температуры и времени выдержки заготовки при нагреве, соотношения ее размеров, скорости деформации. Целью данного исследования является анализ влияния графитсодержащего компонента на механические свойства горячедеформированных порошковых сплавов за счет формирования качественного межчастичного сращивания.

Материалы и методы. В работе использовались отечественные и зарубежные порошки производства ПАО «Северсталь» и шведской фирмы Höganaäs с добавлением углерода ГК-1 (ГОСТ 4404-78). Горячая штамповка осуществлялась на кривошипном прессе модели K2232 с максимальным усилием 1600 кН. Температура нагрева заготовок варьировалась в пределах 800–1200 С.

Результаты исследования. В результате проведенных экспериментов было установлено влияние продолжительности спекания на механические свойства материалов. Причиной изменения механических свойств являются локальные включения графита, которые не успели гомогенизироваться в результате длительного спекания. Разработаны технологические режимы горячей штамповки для сталей, влияющие на сохранение или разрушение предварительно сформированной контактной межчастичной поверхности.

Обсуждение и заключения. Исследования показали, что дополнительная горячая пластическая деформация способствует формированию внутрикристаллитного сращивания на всей контактной поверхности. Добавление в шихту графита способствует улучшению сращивания для легированного железного порошка и практически не сказывается при использовании легированного и нелегированного железного порошка.

Ключевые слова: горячая штамповка, сращивание, пластическая деформация, микроструктура поверхности

Благодарности. Авторы выражают благодарность инженерам кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Ю.П. Пустовойту, В.И. Поповку за подготовку образцов и настройку измерительного оборудования, а также научному консультанту, доктору технических наук, профессору Жанне Владимировне Еремеевой за помощь в выборе методик проведения экспериментов.

Для цитирования. Егоров М.С., Егорова Р.В., Ковтун М.В. Влияние содержания углерода на формирование контактной межчастичной поверхности при горячей допрессовке. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2): 90–101. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101>

Original article

Influence of Carbon Content on the Formation of a Contact Interparticle Surface during Hot Post-Pressing

Maksim S Egorov , Rimma V Egorova , Mark V Kovtun

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Introduction. The technology for producing hot-formed powder steel is one of the most energy-intensive in powder metallurgy, which includes a large number of operations. The study of the influence of technological modes on the final properties of the part is an urgent task. Developed by the scientific team under the leadership of Yu.G. Dorofeev at the end of the XX century, the technology of manufacturing hot-formed powder steels is currently one of the main ones in the production of high-density products. However, the use of new materials that improve the mechanical properties of products requires a modern approach to analyzing the quality of interparticle splicing of powder particles. The influence of the following technological factors on the formation of qualitative interparticle splicing was established: the blank density, the granulometric composition of the initial charge, the temperature and holding time of the blank during heating, the ratio of its dimensions, the deformation rate. The study objective is to analyze the effect of a graphite-containing component on the mechanical properties of hot-formed powder alloys due to the formation of high-quality interparticle splicing.

Materials and Methods. The work used domestic and foreign powders produced by PAO Severstal and the Swedish company Höganas with the addition of carbon GC-1 (GOST 4404-78). Hot stamping was carried out on a crank press of the K2232 model with a maximum force of 1600 kN. The heating temperature of the workpieces varied between 800–1200 °C.

Results. As a result of the experiments, the influence of the sintering duration on the mechanical properties of materials was established. The reason for the change in mechanical properties are local inclusions of graphite, which did not have time to homogenize as a result of prolonged sintering. Technological modes of hot stamping for steels have been developed that affect the preservation or destruction of the pre-formed contact interparticle surface.

Discussion and Conclusion. The studies have shown that additional hot plastic deformation contributes to the formation of intracrystalline fusion on the entire contact surface. The addition of graphite to the charge improves splicing for alloyed iron powder and practically does not affect the use of alloyed and unalloyed iron powder.

Keywords: hot stamping, splicing, plastic deformation, surface microstructure

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the engineers of the Materials Science and Technology of Metals Department, Yu.P. Pustovoyt, V.I. Popovko for preparing samples and setting up measuring equipment, as well as to the academic adviser, Dr. Sci. (Eng.), Professor Zhanna Vladimirovna Ereemeeva for help in choosing methods of conducting experiments.

For citation. Egorov MS, Egorova RV, Kovtun MV. Influence of Carbon Content on the Formation of a Contact Interparticle Surface during Hot Post-Pressing. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):90–101. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101>

Введение. Особенностью формирования порошковых пористых заготовок является структурообразование в процессе их обработки, имеющее принципиальное отличие от соответствующей обработки материалов монолитов. Особенности технологических процессов структурообразования в порошковой металлургии обусловлены интенсивным термомеханическим воздействием на обрабатываемую порошковую сталь. Большое количество процессов формования и структурообразования материала в условиях кратковременного термомеханического воздействия приводит к синтезу научных подходов горячего деформирования в порошковой металлургии, материаловедении, сварки давлением, обработки металлов давлением, теории прочности, пластичности [1–3].

Основной задачей авторов статьи является исследование технологических режимов горячей деформации изделий с различным содержанием углерода, а также исследование микроструктуры в различных зонах деформируемых изделий.

Материалы и методы. Формирование контактной поверхности порошкового материала на стадии горячей штамповки рассматривается с позиции ее начального состояния, которое изменяется в процессе уплотнения, т. е. последовательного приращения контактной поверхности.

В работе использовались железные порошки производства фирмы Höganäs (Швеция) и ПАО «Северсталь» (Россия) [2, 4] (таблица 1).

Таблица 1

Виды и характеристики используемых порошков

Марка порошка	Страна-изготовитель	Способ получения порошка
ПЖРВ2.200.26 ТУ 14-1-5365-98	РФ, ПАО «Северсталь»	Распыление сплава потоком сжатого воздуха, восстановительный отжиг
ПЛ-Н4Д2М ТУ 14 -5402 2002	РФ, ПАО «Северсталь»	Отжиг диффузионно-восстановительный распыленного порошка
ABC100.30	Швеция, фирма Höganäs	Распыление железного расплава
Astaloy 85Mo	Швеция, фирма Höganäs	Распыление водой легированного расплава, содержащего 0,85 % Mo
Distaloy HP-1	Швеция, фирма Höganäs	Двойное диффузионное легирование порошка Astaloy 85Mo:1,5 % Mo+4 % Ni,2 % Cu

Данные об общем химическом составе представлены в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав исследуемых порошков

Марка порошка	Содержание элементов, массовая доля, %								
	C	O	Mo	Ni	Cu	Mn	Si	S	P
ПЖРВ2.200.26	0,02	0,25				0,15	0,05	0,015	0,02
ПЛ-Н4Д2М	0,02	0,25	0,4-0,5	3,6-4,4	1,3-1,7	0,15	0,05	0,02	0,02
ABC100.30	0,001	0,04	–	–	–	0,06	0,007	0,01	0,004
Astaloy 85Mo	<0,01	0,07	0,85	–	–	0,06	0,008	0,02	0,005

Основным легирующим элементом в исследуемом материале является углерод, вводившийся в шихту в виде графита карандашного ГК-1 (ГОСТ 4404-78). Химический состав приведен в таблице 3.

Таблица 3

Химический и гранулометрический состав порошка графита

Наименование показателей	Порошок
	ГК-1
Содержание влаги, масс., %	2,0
Зольность, масс., %	5,0
Содержание серы, масс., %	1,0
Гранулометрический состав, мкм	+100-300

На формирование межчастичной поверхности срачивания оказывают влияние включения второй фазы, в частности, не растворившиеся в аустените частицы графита [2, 4, 5]. На основе результатов химического анализа материала формируется понимание процесса растворения углерода в образце, позволяющее полагать, что полное растворение углерода происходит не более 60 минут. Данные механических свойств, представленные в таблице 4, свидетельствуют о том, что для образцов с содержанием 0,5 % C (массовая доля) это время является недостаточным, так как не обеспечивает их высокий уровень.

Таблица 4

Зависимость механических свойств горячедеформируемых сплавов от продолжительности спекания

Металлическая основа шихты	Продолжительность спекания при 1000° С, час.	Механические свойства после доуплотнения		
		σ_b , МПа	Ψ , %	KCU, МДж/м ²
Astaloy 85Mo+0,5% C	0,5	610	0	0
	1,0	640	0	0
	1,5	690	35	0,38
ABC100.30+0,5%С	0,5	350	0	0
	1,0	370	0	0
	1,5	450	45	0,7

Данные, представленные в таблице 4, показывают, что наиболее чувствительны к степени гомогенизации сплавов следующие показатели: пластичность материала и сопротивление ударной вязкости.

Формирование достаточно высоких механических свойств рассматриваемых материалов при добавлении углерода происходит при выборе правильных режимов спекания. От этого зависит полная гомогенизация углерода в железной матрице основы. Для объяснения этой зависимости было проведено исследование изломов заготовок методом Оже-электронной спектроскопии на спектрометре модели РНЖ-680 фирмы Physical Electronics [2, 5, 6]. На рис. 1 представлена фрактограмма поверхности образца, спеченного в течение 60 минут. Внимание заслуживает область этой поверхности, обозначенная точкой 8.

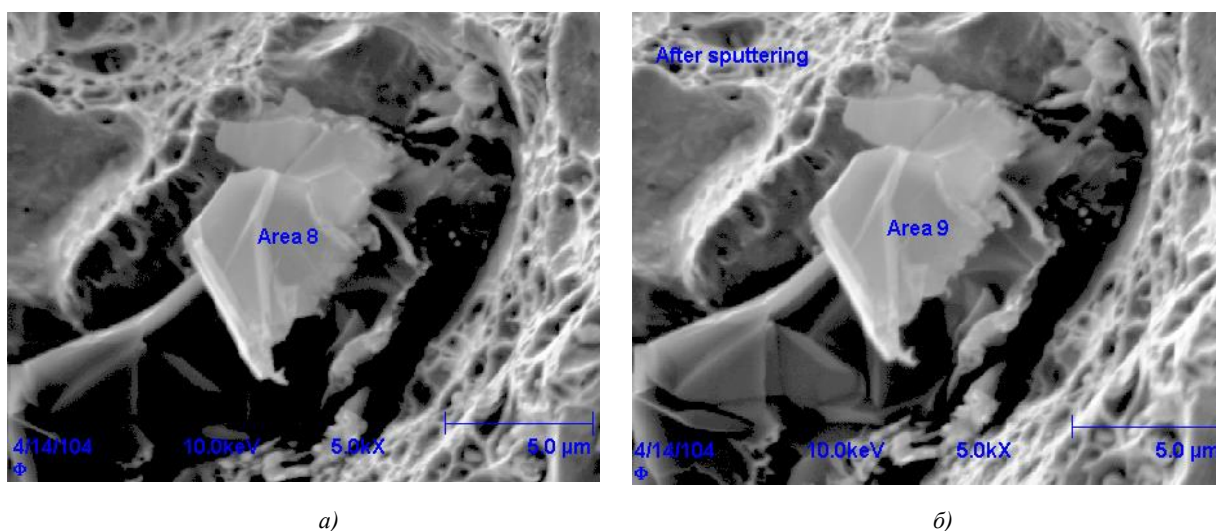


Рис.1. Включение на поверхности разрушения заготовки. Спекание при 1000 °С в течение 1 ч.:
а — до аргонного травления; б — после аргонного травления

Результаты аргонного травления образца в точке 8 показали, что данный морфологический структурный элемент является областью с неравновесным содержанием углерода (рис. 2).

Содержание углерода составляет порядка ~40 ат % при травлении в глубину поверхности 100 нм. Следовательно, рассматриваемый участок характеризует собой трехмерное включение, образовавшееся в результате диффузии во время спекания ионов железа в бывшую частицу графита. Судя по результатам Оже-электронной спектроскопии, ее химический состав соответствует формуле неравновесного карбида $Fe_{0,9}C$. Более ровная поверхность излома рассматриваемой зоны говорит о том, что разрушение образца происходило по механизму скола, свойственному хрупкому разрушению [1, 7, 8]. Структура, в которой находится такой элемент, влечет за собой пониженные механические свойства рассматриваемых сплавов.

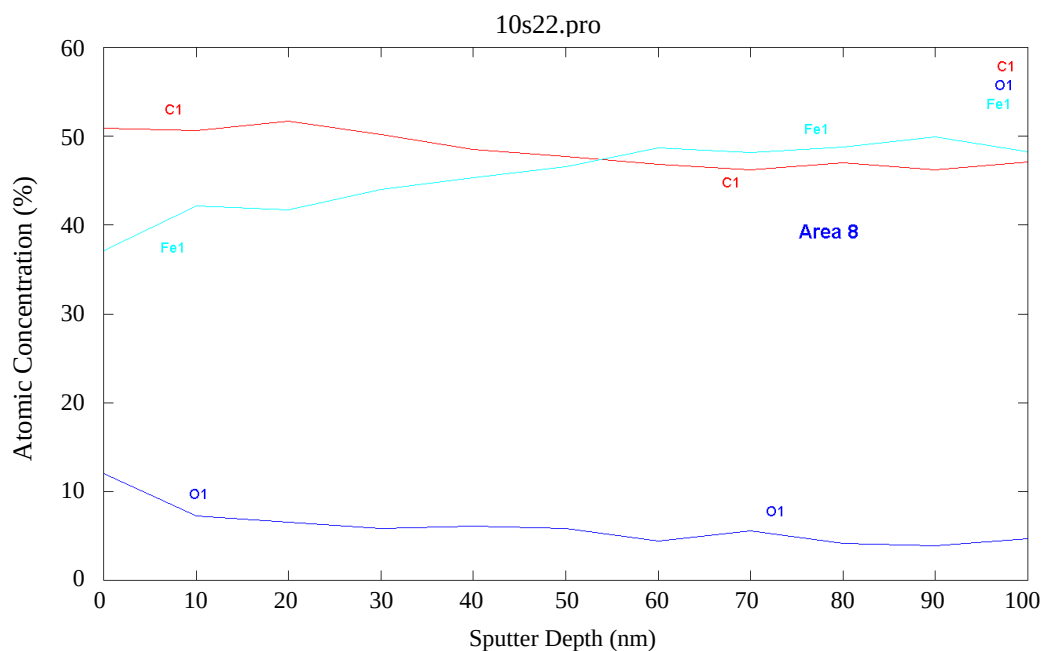


Рис. 2 Зависимость распределения элементов в точке 8 от глубины травления

Результаты исследования. Были проведены исследования зависимости механических свойств горячедеформированных сталей от содержания в шихте углерода. Предварительно образцы спекались при температуре 1000 °С в течение 1,5 час. Далее проводилась операция допрессовки до значений пористости, близкой к нулю, при температуре 1050 °С. Данный режим спекания обеспечивает полное растворение углерода в железной основе стали. Значения предела прочности, относительного удлинения и твердости по Виккерсу горячедеформированных сталей при различном содержании углерода показаны на рис. 3.

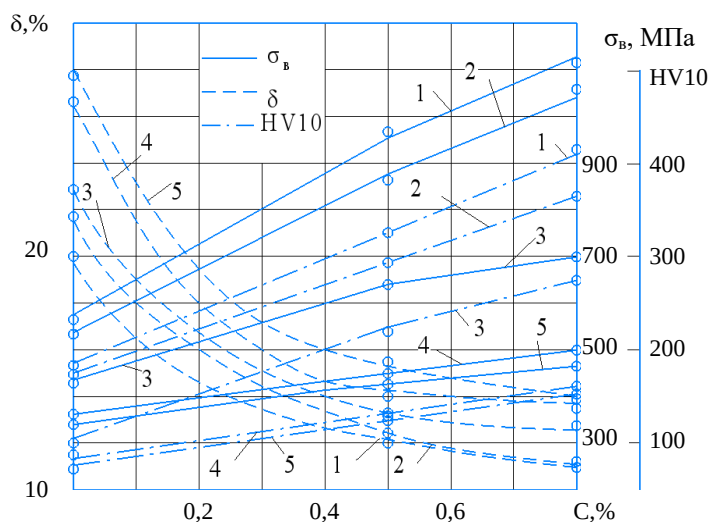


Рис. 3. Влияние содержания углерода на механические свойства горячедеформированных сталей на основе порошков: 1 — Distaloy HP-1; 2 — H4D2M; 3 — Astaloy 85Mo; 4 — ПЖР2.200.26; 5 — ABC100.30

Характер представленных зависимостей согласуется с теоретическими положениями классического и порошкового материаловедения [2, 9, 6], что подтверждается результатами микроструктурного анализа (рис. 4). С повышением содержания углерода в составе стали уменьшается количество ферритной составляющей и повышается количество феррито-цементитной эвтектоидной смеси. При содержании углерода 0,8 % С структура стали состоит из мелкодисперсного троостита.

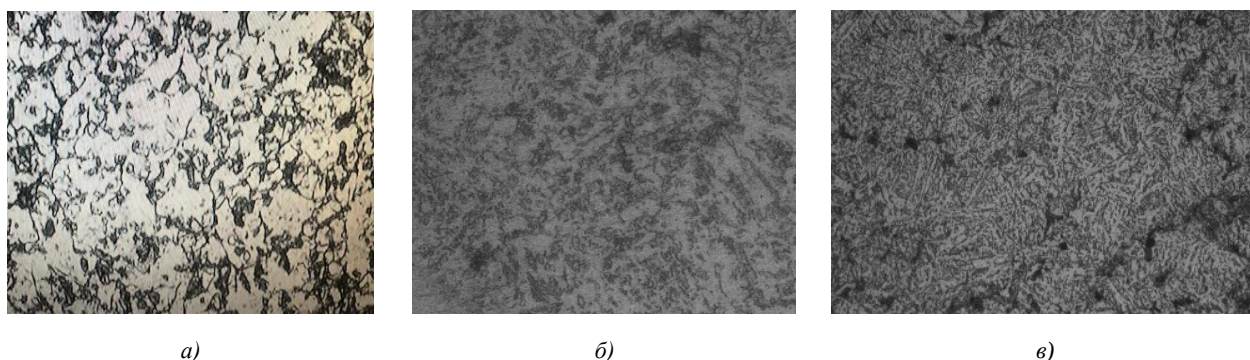


Рис. 4. Микроструктура порошковой горячедеформированной стали на основе порошка ПЖРВ2.200.26 с различным содержанием углерода, х250: а — 0,2 % С; б — 0,5 % С; в — 0,8 % С

На микрошлифах отсутствуют поры, этот факт свидетельствует о практически беспористом состоянии материала.

Влияние углерода на развитие контактной поверхности рассмотрим на зависимости механических свойств порошковой стали от исходной пористости (рис. 5). Испытанные стали с содержанием углерода 0,5 % (мас.) были получены горячей допрессовкой при 1050 °С.

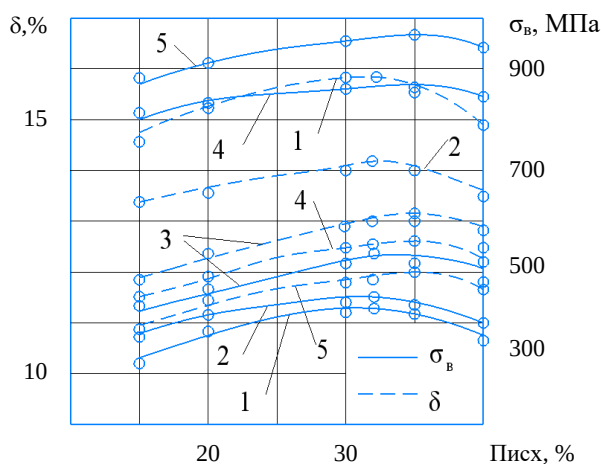


Рис. 5. Зависимость механических свойств горячедеформированных сталей от исходной пористости: 1 — ABC100.30; 2 — ПЖР2.200.26; 3 — Astaloy 85Mo; 4 — H4D2M; 5 — Distaloy HP-1

Сопоставив данные, представленные на рис. 4 и 5, можно отметить идентичный характер зависимости как прочностных, так и пластических свойств от исходной пористости. Для сталей на основе порошков ПЖР2.200.26 и ABC100.30 экстремум свойств наблюдается при исходной пористости заготовки 30 %. У сталей на основе порошков Astaloy 85Mo, H4D2M и Distaloy HP-1 экстремум свойств смещается в сторону увеличения значения исходной пористости. Это обстоятельство может быть истолковано как повышение качества межчастичного взаимодействия, что находит свое отражение в положении линии, разграничивающей области технологических режимов, отличающиеся частичным или полным разрушением или сохранением и развитием предварительно сформированной контактной поверхности на стадии горячей допрессовки (рис. 6) [10–12].

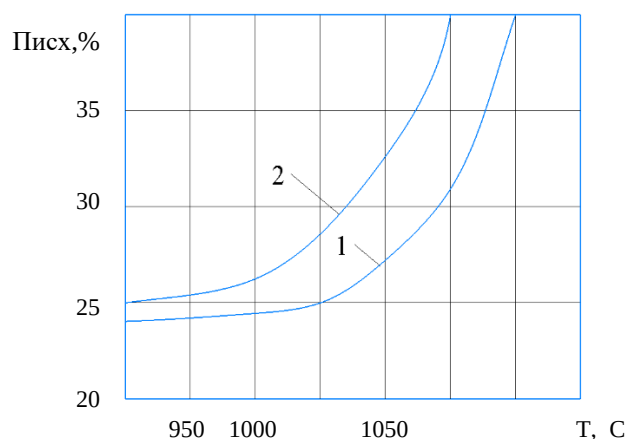


Рис. 6. Области технологических режимов горячей штамповки, влияющих на сохранение или разрушение предварительно сформированной контактной межчастичной поверхности для сталей:

1 — ПЖР2.200.26+0,5 % C; ABC100.30+0,5 % C; 2 — Astaloy 85Mo+0,5 % C; H4Д2М+0,5 % C; Distaloy HP-1+0,5 % C
Сопоставление результатов, представленных на рис. 5 и 6, приведено в таблице 5.

Таблица 5

Определение областей технологических режимов горячей допрессовки для порошковых сталей

Исходный порошок	Содержание углерода, %	Маркировка линии разграничения
ПЖР2.200.26; ABC100.30; Astaloy 85Mo; H4Д2М; Distaloy HP-1	0	Линия 1
ПЖР2.200.26+0,5 % C; ABC100.30+0,5 % C; 2 — Astaloy 85Mo+0,5 % C; H4Д2М+0,5 % C; Distaloy HP-1+0,5 % C	0,5	Линия 1
Astaloy 85Mo; H4Д2М; Distaloy HP-1	0,5	Линия 2

Добавление в шихту порошка углерода практически не влияет на назначение оптимальных режимов горячей допрессовки для материалов на основе нелегированных железных порошков. В случае легирования железных порошков молибденом, медью, никелем при введении в шихту графита и предварительного спекания до полной гомогенизации аустенита рекомендуемое значение исходной пористости смещается в сторону больших значений.

Оценить качество межчастичного сращивания горячедеформированных сталей можно по значению модуля Юнга. За критерий принимается значение модуля Юнга дополнительно прокованных до беспористого состояния образцов исследуемых сталей (таблица 6) [2, 5, 13].

Таблица 6

Параметры порошковых сталей в беспористом состоянии

Материал		Плотность в беспористом состоянии, г/см ³	Модуль Юнга, ГПа
Металлическая основа	Содержание углерода, %		
ПЖРВ2.200.26	0,5	7,79	201
ABC100.30		7,79	201
Astaloy 85Mo		7,83	206
H4Д2М		7,81	203
Distaloy HP-1		7,85	208

Рассмотрим зависимость параметров горячедеформированных сталей с содержанием углерода 0,5 % от температуры режимов горячей допрессовки и удельной работы уплотнения (W). В качестве параметров сталей используем значения плотности (ρ), модуля Юнга (E) и относительной контактной поверхности с внутрикристаллитным сращиванием ($\alpha_{\text{ВКС}}$) (таблица 7).

Таблица 7

Параметры горячедеформированных сталей от режимов горячей допрессовки

Материал	T, °C	W, МДж/м ³	ρ, г/см ³	E, ГПа	α _{ВКС}
ПЖРВ2.200.26	950	60	6,5	112	0,56
		100	7,3	189	0,94
		120	7,5	193	0,96
		160	7,75	194	0,965
		180	7,79	195	0,97
	1050	60	7,25	181	0,9
		80	7,6	193	0,96
		100	7,75	195	0,97
		120	7,79	196	0,975
	1150	60	7,5	190	0,945
		80	7,74	196	0,975
		100	7,79	197	0,98
ABC100.30	950	60	6,6	166	0,82
		100	7,35	184	0,92
		120	7,55	189	0,94
		160	7,79	195	0,97
	1050	60	7,4	187	0,93
		80	7,68	194	0,965
		100	7,79	197	0,98
	1150	60	7,63	194	0,965
		80	7,79	198	0,985
Astaloy 85Mo	950	60	6,57	168	0,81
		100	7,49	191,2	0,92
		120	7,57	193,4	0,94
		160	7,81	199	0,96
		170	7,83	200	0,97
	1050	60	7,42	190,5	0,92
		80	7,69	197,5	0,96
		100	7,83	201	0,975
	1150	60	7,65	197	0,96
		80	7,83	202	0,98
H4Д2М	950	60	6,53	165	0,81
		100	7,32	187	0,92
		120	7,52	190	0,93
		160	7,77	197	0,97
		180	7,81	198	0,98
	1050	60	7,28	185	0,91
		80	7,62	194	0,95
		100	7,77	198	0,97
		120	7,81	199	0,98
	1150	60	7,53	193	0,95
		80	7,76	199	0,98
		100	7,81	200	0,985
Distaloy HP-1	950	60	6,67	172	0,82
		100	7,4	190	0,91
		120	7,59	195	0,94
		160	7,85	202	0,97
	1050	60	7,47	193	0,93
		80	7,73	200	0,96
		100	7,85	203	0,975
	1150	60	7,69	200	0,96
		80	7,85	204	0,98

Экспериментальные результаты, представленные в таблице 7, показывают, что во всем температурном диапазоне исследования достигается значение плотности материала, соответствующее его беспористому состоянию (таблица 8).

Таблица 8

Удельная работа уплотнения (МДж/м³) для достижения беспористого состояния

Т, °С	Железная основа порошковой стали с содержанием 0,5 % С				
	ПЖРВ 2.200.26	ABC100.30	Astaloy 85Mo	H4Д2М	Distaloy HP-1
950	180	160	170	180	160
1050	120	100	100	120	100
1150	100	80	80	100	80

Обсуждение и заключения. Несмотря на достижение беспористого состояния значения модуля Юнга показывают, что имеются возможности для повышения функциональных свойств материалов, то есть при горячей допрессовке не достигается формирование внутрикристаллитного сращивания на всей контактной поверхности. На рис. 7 представлена фрактограмма разрушенного образца горячедеформированной стали на основе порошка ПЖРВ2.200.26 с плотностью 7,81 г/см³. Излом характерен для вязкого разрушения стали. Видны гребни и впадины ямочного рельефа, являющиеся следствием интенсивной пластической деформации в очаге распространения трещины. При преобладании на фрактограмме ямочного рельефа наблюдаются участки с плоским рельефом, характерным для интеркристаллитного или транскристаллитного разрушения. Наличие таких зон на изломе стали свидетельствует о незавершенности межчастичного сращивания. Участки интеркристаллитного скола непосредственно указывают на отсутствие трансформации межчастичной поверхности сращивания в большеугловую межзеренную поверхность. В случае идентификации плоских зон излома как следствие развития трещины по механизму транскристаллитного разрушения можно полагать о наследственном характере структуры в зоне разрушения.

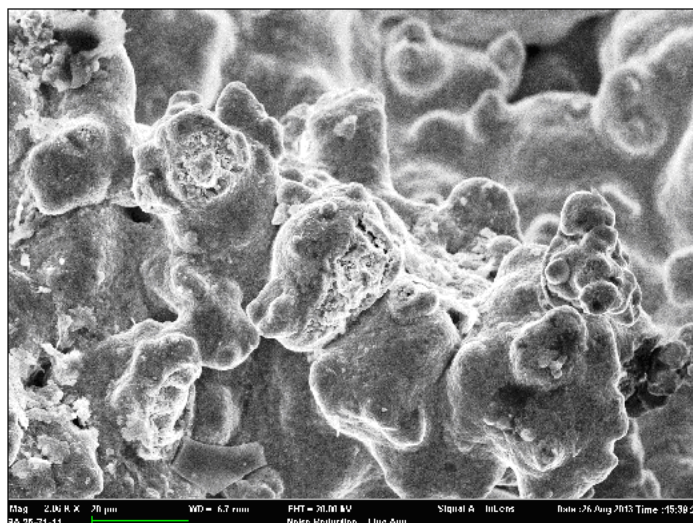


Рис.7. Поверхность разрушения порошковой стали

Отрыв межчастичной поверхности сращивания от субмикронор, сегрегационной атмосферы, дисперсных включений другой фазы приводит к сохранению данных морфологических элементов структуры в зоне бывшей межчастичной контактной поверхности, являющихся факторами, способствующими зарождению зародыша трещины и ее распространению.

Применительно к исследуемым сталям с содержанием 0,5 % С используем технологический прием, предложенный в [14, 15], заключающийся в дополнительной горячей пластической деформации с определением критической степени деформации. Рассмотрим результаты дополнительной пластической деформации порошкового материала на основе порошков ПЖРВ2.200.26 и H4Д2М, проведенной при температуре 1050 °С (рис. 8). В качестве критерия формирования внутрикристаллитного сращивания используется модуль Юнга.

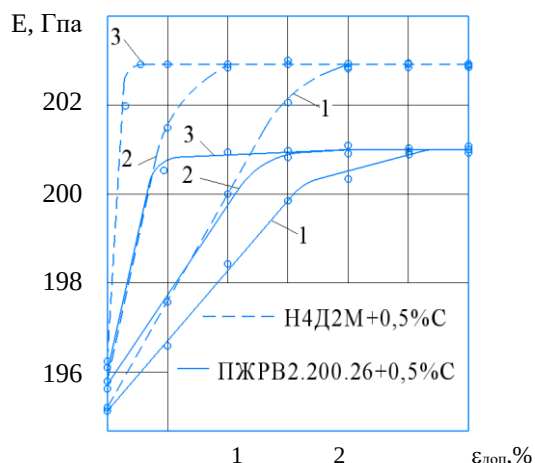


Рис. 8. Зависимость модуля Юнга от степени дополнительной пластической деформации порошковых сталей, сформированных при температуре горячей допрессовки: 1 — 950 °С, 2 — 1050 °С, 3 — 1150 °С

На основании проведенных исследований приведем значения критической степени дополнительной пластической деформации как функции технологических режимов горячей допрессовки (таблица 9). В числителе указаны данные для стали ПЖРВ2.200.26+0,5 %С, в знаменателе — Н4Д2М+0,5 %С.

Таблица 9

Критическая степень деформации при различных температурах горячей допрессовки

Температура, 0 С	Исходная пористость, %	Критическая степень деформации, %
950	40	2/1,5
	30	2,5/2
	20	3/2
1050	40	1,5/1
	30	1,5/1
	20	2/1,5
1150	40	0,5/0,3
	30	0,5/0,3
	20	1/0,5

На основании проведенных исследований можно заключить, что дополнительная горячая пластическая деформация способствует формированию внутрикристаллитного сращивания на всей контактной поверхности. Добавление в шихту графита способствует улучшению сращивания для легированного железного порошка и практически не сказывается при использовании нелегированного железного порошка.

Список литературы

1. Дорофеев В.Ю., Егоров С.Н. *Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов*. Москва: Металлургиздат; 2003. 152 с.
2. Егоров М.С., Егоров С.Н. *Горячедеформированные порошковые низколегированные стали*. Новочеркасск: Волгодонский институт (фил.) Южно-Российского гос. технического ун-та; 2008. 54 с.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоко теплонгруженных деталей газотурбинных двигателей. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2011;SP2:13–19.
4. Егорова Р.В. Микроструктурный анализ поверхности ступенчатой формы. *Металлург*. 2009;6:65–67.
5. Григорьев А.К., Рудской А.И. *Деформация и уплотнение порошковых материалов*. Москва: Металлургия; 2002. 192 с.
6. Robert-Perron E., Blais C., Pelletier S. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state. *Powder Metallurgy*. 2009;52(1):80–83. <https://doi.org/10.1179/174329007X205055>
7. Штерн М. Б., Картузов Е.В. Особенности возникновения и распространения ударных волн в высокопористых материалах. *Порошковая металлургия*. 2016;3:13–22.

8. Глотка А.А., Мороз А.Н. Сравнительное влияние карбидов и неметаллических включений на образование усталостных микротрещин в сталях. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019;8:61–65. <https://doi.org/10.30906/mitom.2019.8.61-65>
9. Гуревич Ю.Г., Анциферов В.Н., Савиных Л.М. и др. *Износостойкие композиционные материалы*. Екатеринбург: УрО РАН; 2005. 215 с.
10. Kondo H., Hegedus M. Current trends and challenges in the global aviation industry. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2020;26(4):141–143. <https://doi.org/10.36547/ams.26.4.763>
11. Ramakrishnan P. *Automotive Applications of Powder Metallurgy*. Advances in Powder Metallurgy. Woodhead Publishing Series: Cambridge, UK; 2013. P. 493–519. <https://doi.org/10.1533/9780857098900.4.493>
12. Rojek J., Nosewicz S., Mazdziarz M., et al. Modeling of a Sintering Process at Various Scales. *Procedia Engineering*. 2017;177:263–270. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.210>
13. Guo J.Y., Xu C.X., Hu A.M., et al. Sintering dynamics and thermal stability of novel configurations of Ag clusters. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2012;73(11):1350–1357. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.06.010>
14. Еремеева Ж.В., Никитин Н.М., Коробов Н.П. и др. Исследование процессов термической обработки порошковых сталей, легированных наноразмерными добавками. *Нанотехнологии: наука и производство*. 2016;1:63–74.
15. Егоров М.С., Егорова Р.В. Пластичность композиционных материалов с определением температурных режимов горячей штамповки, исключающих появление дефектов в структуре материала. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2019;17(2):66–72.

References

1. Dorofeev VYu, Egorov SN. *Mezhchastichnoe srashchivanie pri formirovanii poroshkovykh goryachedeformirovannykh materialov*. Moscow: Metallurgizdat; 2003. 152 p. (In Russ.).
2. Egorov MS, Egorov SN. *Goryachedeformirovannye poroshkovye nizkolegirovannye stali*. Novocherkassk: Volgodonsk Institute (branch) of the South Russian State Technical University; 2008. 54 p. (In Russ.).
3. Kablov EN, Ospennikova OG, Bazyleva OA. Materialy dlya vysoko teplonagruzhennykh detalei gazoturbinnnykh dvigatelei. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2011;SP2:13–19. (In Russ.).
4. Egorova RV. Microstructure analysys of surface for details of stepped form. *Metallurg*. 2009;6:65–67. (In Russ.).
5. Grigorev AK, Rudskoy AI. *Deformatsiya i uplotnenie poroshkovykh materialov*. Moscow: Metallurgiya; 2002. 192 p. (In Russ.).
6. Robert-Perron E, Blais C, Pelletier S. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state. *Powder Metallurgy*. 2009;52(1):80–83. <https://doi.org/10.1179/174329007X205055>
7. Shtern MB, Kartuzov EV. Osobennosti vozniknoveniya i rasprostraneniya udarnykh voln v vysokoporistykh materialakh. *Powder Metallurgy*. 2016;3:13–22. (In Russ.).
8. Glotka AA, Moroz AN. Comparison of the effects of carbides and nonmetallic inclusions on formation of fatigue microcracks in steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2019;8:61–65. <https://doi.org/10.30906/mitom.2019.8.61-65> (In Russ.).
9. Gurevich YuG, Antsiferov VN, Savinykh LM, et al. *Iznosostoikie kompozitsionnye materialy*. Ekaterinburg: UrO RAN; 2005. 215 p. (In Russ.).
10. Kondo H, Hegedus M. Current trends and challenges in the global aviation industry. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2020;26(4):141–143. <https://doi.org/10.36547/ams.26.4.763>
11. Ramakrishnan P. *Automotive Applications of Powder Metallurgy*. Advances in Powder Metallurgy. Woodhead Publishing Series: Cambridge, UK; 2013. P. 493–519. <https://doi.org/10.1533/9780857098900.4.493>
12. Rojek J, Nosewicz S, Mazdziarz M, et al. Modeling of a Sintering Process at Various Scales. *Procedia Engineering*. 2017;177:263–270. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.210>
13. Guo JY, Xu CX, Hu AM, et al. Sintering dynamics and thermal stability of novel configurations of Ag clusters. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2012;73(11):1350–1357. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.06.010>
14. Eremeeva ZhV, Nikitin NM, Korobov NP, et al. Issledovanie protsessov termicheskoi obrabotki poroshkovykh stalei, legirovannykh nanorazmernymi dobavkami. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo*. 2016;1:63–74. (In Russ.).
15. Egorov MS, Egorova RV. Plastichnost' kompozitsionnykh materialov s opredeleniem temperaturnykh rezhimov goryachei shtampovki, isklyuchayushchikh poyavlenie defektov v strukture materiala. *Blanking productions in mechanical engineering*. 2019;17(2):66–72. (In Russ.).

Об авторах:

Егоров Максим Сергеевич, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология металлов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ORCID](#), aquavdonsk@mail.ru

Егорова Римма Викторовна, доцент кафедры «Кибербезопасность» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ORCID](#), rimmaruminskaya@gmail.com

Ковтун Марк Валерьевич, начальник кафедры «Дорожные войска» Военного учебного центра Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Mk222200@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

М.С. Егоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. Р.В. Егорова — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов, подготовка графиков. М.В. Ковтун — формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, подготовка текста, формирование выводов.

Поступила в редакцию 10.04.2023.

Поступила после рецензирования 18.04.2023.

Принята к публикации 21.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Maksim S Egorov, head of the Engineering and Computer Graphics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci. (Eng.), associate professor, [ORCID](#), aquavdonsk@mail.ru

Rimma V Egorova, associate professor of the Cybersecurity Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci. (Eng.), associate professor, [ORCID](#), rimmaruminskaya@gmail.com

Mark V Kovtun, head of the Road Troops Department, Military Training Center, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Mk222200@yandex.ru

Claimed contributorship:

MS Egorov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of the conclusions. RV Egorova: academic advising, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions, preparation of graphs. MV Kovtun: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, academic advising, preparation of the text, formulation of the conclusions.

Received 10.04.2023.

Revised 18.04.2023.

Accepted 21.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.785:669.14.018.29

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-102-112>

Научная статья



Влияние текстурных эффектов на работоспособность лазерно-облученного инструмента

Г.И. Бровер, Е.Е. Щербакова ✉

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, п. Гагарина, 1

✉ sherbakovaee@mail.ru

Аннотация

Введение. Лазерная поверхностная обработка изделий машиностроения позволяет увеличить их долговечность. Однако процесс лазерного упрочнения не отличается стабильностью получаемых результатов, так как при выборе режимов и схем облучения конкретных изделий не учитываются текстурные эффекты в зонах лазерного воздействия. Это приводит к преждевременному износу и даже разрушению рабочих поверхностей облученных изделий. Поэтому целью работы явилось исследование механизма влияния строения лазерно-закаленного слоя на эксплуатационные свойства инструмента.

Материалы и методы. Материалами для данного исследования послужили инструментальные стали Р6М5 и Р18. Импульсное лазерное облучение проводилось на технологической установке «Квант-16» с плотностью мощности излучения 70–250 МВт/м². Использовались сканирующая зондовая и оптическая микроскопия, рентгеноструктурный и дюрметрический методы анализа структуры сталей. Определялись значения прочности сталей на изгиб и ударную вязкость до и после лазерной обработки.

Результаты исследования. Экспериментально доказано, что упрочнять следует участки рабочих поверхностей изделий, подверженные максимальному износу и находящиеся при эксплуатации под действием сжимающих напряжений. Показано, что текстурные эффекты в зонах лазерной обработки приводят к понижению коэффициентов трения и способствуют повышению износо- и адгезионной стойкости поверхностных слоев сталей.

Обсуждение и заключения. Результаты проведенных исследований позволяют осуществлять рациональный выбор режимов и схем поверхностной лазерной обработки изделий различного функционального назначения и гарантированно обеспечивать их работоспособность. Определены возможности повышения конструкционной прочности и свойств инструмента за счет проведения лазерного легирования поверхностных слоев сталей из порошковых покрытий и проведения после лазерного облучения стабилизирующего отпуска.

Ключевые слова: лазерное облучение, легированные стали, структура, свойства, износостойкость, адгезионная стойкость.

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их усовершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Бровер Г.И., Щербакова Е.Е. Влияние текстурных эффектов на работоспособность лазерно-облученного инструмента. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(2):102–112. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-102-112>

Influence of Texture Effects on the Laser-Irradiated Tool Performance

Galina I Brover, Elena E Shcherbakova✉

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ sherbakovaee@mail.ru

Abstract

Introduction. Laser surface treatment of mechanical engineering products makes it possible to increase their durability. However, the laser hardening process is not good at the consistency of results, since choosing the irradiation modes and schemes of specific products, texture effects in the zones of laser exposure are not taken into account. This leads to premature wearing and even destructing the working surfaces of irradiated products. Therefore, the work objective is to study the mechanism of influence of the structure of the laser-hardened layer on the operational properties of the tool.

Materials and Methods. The materials for this study were tool steels: R6M5 and R18 (according to the EN 10027 standard tool steels: 1.3355, 1.3343). Pulsed laser irradiation was carried out at the technological device Kvant-16 with a radiation power density of 70–250 MW/m². Scanning probe and optical microscopy, X-ray diffraction and durometric methods for analyzing the steels structure were used. The values of steel strength in bending and impact strength were determined before and after laser treatment.

Results. It has been experimentally proven that it is necessary to strengthen the sections of the products working surfaces that are subject to maximum wear and are under the action of compressive stresses during operation. It is shown that textural effects in the laser treatment zones lead to a decrease in the friction coefficients and contribute to an increase in the wear and adhesion resistance of the steels surface layers.

Discussion and Conclusion. The results of the research carried out make it possible to rationally select the surface laser processing modes and schemes of products for various functional purposes and ensure their operability with a guarantee. The possibilities increasing the structural strength and properties of the tool due to laser alloying the surface layers of powder-coated steels and stabilizing tempering after laser irradiation are determined.

Keywords: laser irradiation, alloy steels, structure, properties, wear resistance, adhesion resistance.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions contributed to a significant improvement in the quality of this article.

For citation. Brover GI, Shcherbakova EE. Influence of Texture Effects on the Laser-Irradiated Tool Performance. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):102–112. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-102-112>

Введение. В настоящее время на машиностроительных предприятиях большое внимание уделяется вопросам повышения работоспособности инструмента и технологической оснастки, особенно из высоколегированных дорогостоящих сталей.

Проведенный анализ литературных источников показал, что в процессе эксплуатации инструмент испытывает высокие контактные напряжения и давления на рабочие поверхности [1–4]. Кроме того, работе изделий различного функционального назначения сопутствуют нагрев и напряжения изгиба, а также ударные нагрузки или вибрации.

Поэтому стали для изготовления инструмента в целях предотвращения преждевременного разрушения рабочих поверхностей должны иметь высокие значения не только твердости, износо- и теплостойкости, но и прочности при достаточном уровне вязкости. Лазерное облучение инструмента и оснастки, наряду с другими способами поверхностного упрочнения, позволяет увеличить их долговечность, но процесс лазерной обработки не отличается стабильностью получаемых результатов [5–9]. Связано это с тем, что недостаточно четко определены критерии выбора режимов и схем лазерного облучения изделий различного назначения. В частности, не рассмотрена степень влияния текстурных эффектов, возникающих при лазерной обработке с оплавлением поверхности, на конструкционную прочность сталей.

Для решения этих задач необходимы испытания на изгиб, ударную вязкость, износо- и адгезионную стойкость облученных образцов.

Результаты таких экспериментов позволят осуществлять рациональный выбор параметров процесса поверхностной лазерной обработки.

Целью данной статьи являлось исследование влияния строения лазерно-закаленного слоя на эксплуатационные свойства инструмента.

Материалы и методы. Материалами для данного исследования послужили инструментальные стали Р6М5 и Р18.

Импульсное лазерное облучение проводилось на технологической установке «Квант-16» с плотностью мощности излучения 70–250 МВт/м². Идентификация фазового состава и изучение структуры материалов после лазерной обработки осуществлялись металлографическим, сканирующим зондовым, рентгеновским дюриметрическим методами.

Металлографические исследования проводились на микроскопах МИМ-7 и «Neophot-21». Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на дифрактометре типа ДРОН. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 0,49 Н. Прочность образцов на изгиб определялась с использованием машины ИМ-4А, ударная вязкость образцов без надреза — на маятниковом копре КМ-5Т.

Результаты исследования. Металлофизическими исследованиями установлено, что при лазерной обработке сталей на поверхности формируется упрочненный слой, состоящий в общем случае из оплавленной зоны закалки из жидкого состояния и нижележащей зоны закалки из твердого (аустенитного) состояния [10–12].

Оплавляют материал для увеличения общей глубины закаленного слоя или при проведении лазерного легирования облучаемых зон. В последнем случае это вызвано необходимостью оплавления легирующего покрытия и тонкого поверхностного слоя стали.

Особое внимание в работе уделялось изучению особенностей структурообразования сталей в зоне лазерной закалки из жидкого состояния.

Экспериментально установлено, что эта зона имеет дендритное строение (рис. 1 а). Причем дендриты направлены определенным образом — в сторону теплоотвода от облучаемой поверхности в глубину закаленного слоя. Общая толщина упрочненного слоя составляет 80–100 мкм, средняя твердость металла поверхностных слоев — 10–10,5 ГПа.

Рентгеноструктурный анализ показал (рис. 1 б), что в зонах оплавления присутствуют следующие фазы: α -фаза (мартенсит), некоторое количество γ -фазы (остаточный аустенит) и размытые рефлексы неп полностью растворившихся карбидов.

При этом наблюдается аномальное соотношение интенсивностей дифракционных линий (200) и (111) аустенита в зонах лазерной закалки из жидкого состояния (рис. 1 б, кривая 2), по сравнению с зоной закалки из твердого (аустенитного) состояния (рис. 1 б, кривая 1).

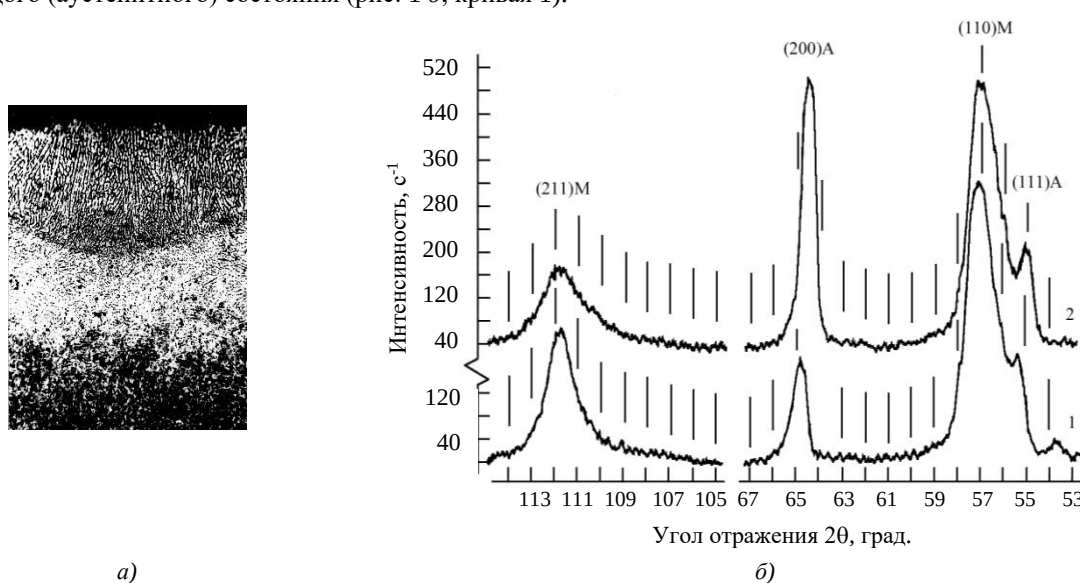


Рис. 1. Зона лазерной закалки из жидкого состояния: а — расположение дендритов в зоне на стали Р6М5; б — фрагменты рентгенограмм стали после лазерной обработки без оплавления (кривая 1) и с оплавлением поверхности (кривая 2)

Это свидетельствует о появлении в поверхностных облученных слоях текстурных эффектов.

Формирование текстуры аустенита связано, видимо, с преимущественной ориентировкой его субзерен в поверхностном слое материалов, возникающей за счет направленной кристаллизации металла после окончания лазерного импульса.

Описанный эффект оказывает положительное влияние на свойства изделий после лазерной обработки. В частности, текстура понижает коэффициенты трения в парах трения, особенно, если тип текстуры согласуется с видом напряженного состояния упрочненных изделий в условиях эксплуатации [13].

В работе рассмотрены некоторые возможности использования текстуры, вызывающей анизотропию свойств в поверхностных слоях сталей, как фактора повышения технологических характеристик облученных изделий.

С этой целью были проведены испытания на изгиб и ударную вязкость образцов из стали Р6М5, облученных на разных режимах и по разным схемам, то есть определялась конструкционная прочность лазерно-облученных сталей.

При выборе методов и методик экспериментов исходили из того, что испытания на изгиб создают в образцах напряженное состояние, близкое к возникающему при работе металлообрабатывающего инструмента. Использовались образцы размером 4×6×55 мм.

Применение образцов нестандартного сечения вызвано необходимостью ужесточения степени влияния тонкого упрочненного слоя на измеряемые свойства.

Перед облучением стали подвергали стандартной термической обработке. Для снятия внутренних напряжений после шлифовки образцов в размер производился отпуск при 400°C, а также визуальный контроль на отсутствие трещин или других дефектов. Одна грань образцов (6×55 мм) была подвергнута лазерному облучению с плотностью мощности излучения 70–150 МВт/м², то есть без оплавления и с оплавлением поверхности образцов. Часть образцов подвергалась лазерному легированию из порошковых обмазок, содержащих дисперсные частички древесного угля с последующим нагревом до температуры 550 °С.

Следует отметить, что при испытаниях лазерно-закаленный слой находился под действием сжимающих или растягивающих напряжений в зависимости от его расположения относительно нагружающего элемента.

В результате испытаний установлено, что в случае действия на облученный слой сжимающих напряжений прочность образцов практически не снижается (таблица 1). В случае воздействия растягивающих напряжений увеличивается склонность образцов к хрупкому разрушению. Это, видимо, связано с тем, что растягивающие изгибающие нагрузки инициируют зарождение и распространение трещин в оплавленных поверхностных слоях стали по междендритным прослойкам.

Таблица 1

Механические характеристики стали Р6М5 до и после лазерной обработки

Режим обработки	$\sigma_{изг} \times 10, \text{ МПа}$		$a \times 10^{-1}, \text{ МДж/м}^2$	
	сжатие	растяжение	сжатие	растяжение
Стандартная термическая обработка (закалка и отпуск)	272±7	270±7	3,2±0,2	3,1±0,2
Лазерная закалка без оплавления поверхности	258±7	32±7	2,8±0,2	0,2±0,2
Лазерная закалка с оплавлением поверхности	238±7	30±7	2,7±0,2	0,3±0,2
Лазерная закалка и отпуск при 550°C	257±7	31±7	2,8±0,2	0,4±0,2
Лазерное легирование из угольного порошка	291±7	33±7	2,9±0,2	0,4±0,2
Лазерное легирование из угольного порошка и отпуск при 550°C	302±7	32±7	3,0±0,2	0,2±0,2

Можно сделать вывод, что для стабилизации конструкционной прочности облученных изделий необходимо подвергать упрочнению участки их рабочей части, которые подвержены при эксплуатации действию сжимающих нагрузок.

Особый интерес, с точки зрения повышения эксплуатационных свойств лазерно-упрочненных изделий, представляют результаты экспериментов, полученные на лазерно-легированных из угольного порошка образцах.

При металлофизических исследованиях выявлены особенности микроструктуры зон лазерного легирования из порошковых покрытий, содержащих активированный уголь (рис. 2).

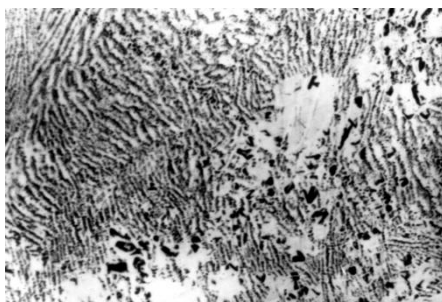


Рис. 2. Структура расплава в закаленной из жидкого состояния стали Р6М5 при лазерном легировании из порошка, содержащего частички угля, ×500

В частности, хорошо заметны дисперсные частички угля, которые располагаются в облученном металле на границах растущих дендритов. Одновременно с текстурными эффектами присутствие графитовых пластин в облученных зонах понижает коэффициенты трения на рабочих поверхностях изделий, выполняя роль твердой смазки [14].

Как видно из таблицы, при действии сжимающих напряжений наиболее эффективно повышают прочность облученных изделий лазерное легирование и последующий отпуск при температуре 550 °С.

Дополнительный вклад отпуска в повышение свойств, в частности твердости, поверхностных слоев стали Р6М5 связан с эффектом дисперсионного твердения в облученных и, тем более, легированных слоях стали. Для подтверждения эффективности проведения процесса лазерного упрочнения и легирования инструмента, с учетом текстурных эффектов в поверхностных слоях [15, 16], в работе проведены натурные испытания на износостойкость резцов из стали Р18 в условиях резания деталей из стали 45.

Резцы из стали Р18 подвергались объемной закалке и отпуску, а также различным вариантам поверхностной обработки: лазерной закалке с оплавлением и без оплавления поверхности, лазерному легированию из порошковых обмазок, содержащих дисперсные включения карбидов вольфрама.

Лазерное облучение осуществлялось по задней грани рабочей части резца, которая при резании подвергается действию сжимающих напряжений. Как показано в статье выше, это исключает хрупкое разрушение режущих кромок инструмента. Проведенные эксперименты по выбору степени перекрытия облученных пятен показали, что коэффициент перекрытия облученных зон должен быть не менее 0,7–0,8. Глубина упрочненного слоя составляла 80–100 мкм, средняя твердость металла поверхностных слоев — 11–11,5 ГПа.

Степень износа оценивалась по величине площадки износа на задней грани резца при одинаковом пути резания для разных вариантов поверхностного упрочнения.

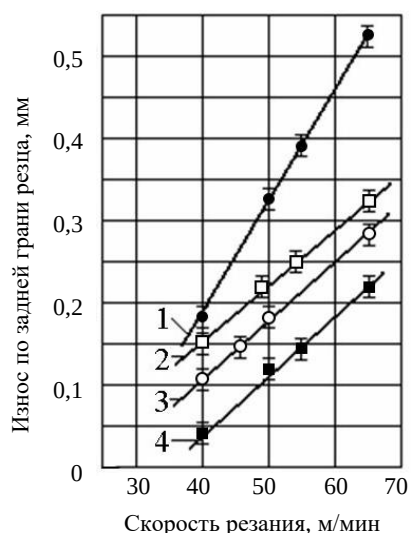


Рис. 3. Износостойкость резцов из стали Р18 после объемной термообработки (кривая 1), лазерной закалки без оплавления (кривая 2), с оплавлением поверхности (кривая 3), лазерного легирования карбидами вольфрама (кривая 4)

Как видно на рис. 3, при всех скоростях резания наблюдается уменьшение износа в 1,5–2 раза у резцов, подвергнутых лазерному упрочнению. Причем минимальный износ достигается в случае лазерного легирования рабочих поверхностей резца карбидами вольфрама. При этом в поверхностных слоях резцов формируются структуры, представляющие собой текстурированную матрицу с вплавленными твердыми частицами карбидами вольфрама WC.

О протекании процесса лазерного легирования поверхности стали Р18 карбидами вольфрама, имеющими высокую твердость (до 15–17 ГПа), свидетельствуют присутствующие на рентгенограммах рефлексы WC, а также результаты проведенных исследований покрытий после лазерной обработки, полученные на сканирующем зондовом микроскопе. На рис. 4 а хорошо различимы выступающие над поверхностью образца частички карбидов [17, 18].

В работе были получены количественные характеристики поверхностных слоев сталей после лазерного вплавления из покрытий частиц WC. Для этого использовали компьютерную программу обработки изображений (КОИ), результаты анализа приведены на рис. 4 б.

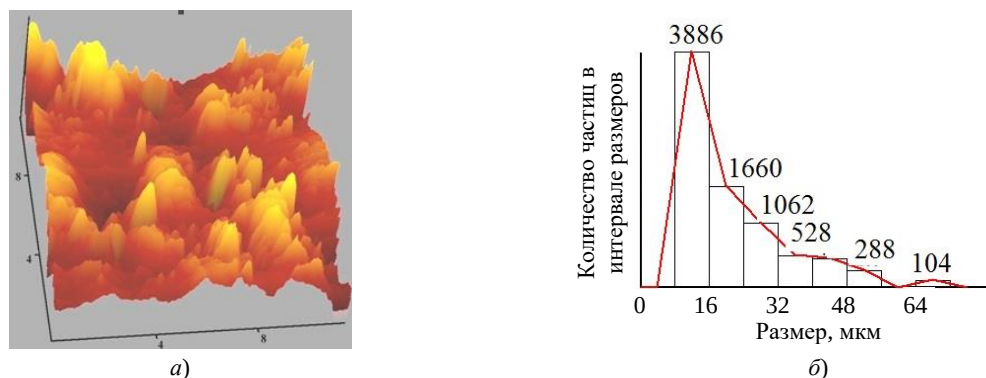


Рис. 4. Сканированное изображение поверхности стали P18: а — после лазерного сплавления карбидов вольфрама; б — гистограммы распределения частиц WC по размерам

Как видно на рис. 4, в поверхностных слоях сталей присутствуют в основном включения размерами 5–10 мкм.

Массив результатов экспериментального определения износостойкости резцов после лазерного легирования, обработанный в программе «Statistica», представлен на рис. 5. Из анализа рисунка можно сделать вывод, что минимальный износ резцов наблюдается после облучения с плотностью мощности излучения 110–130 МВт/м². Белыми точками на рис. 5 обозначены результаты экспериментальной проверки регрессионного моделирования процессов, протекающих в зонах лазерной обработки сталей.

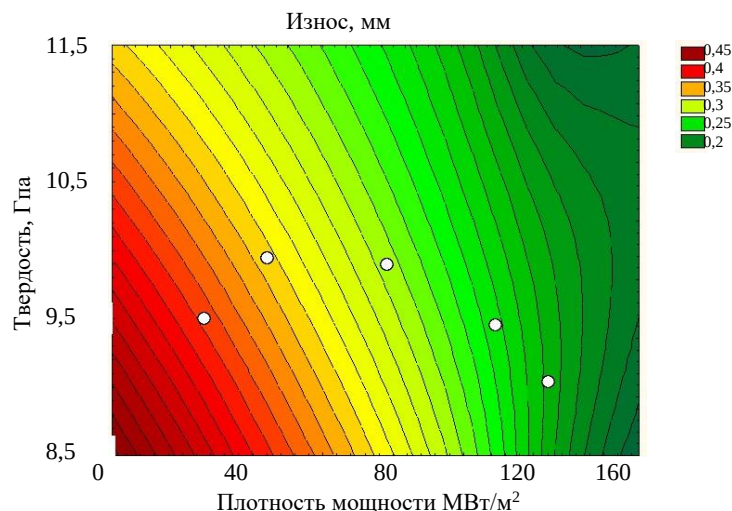


Рис. 5. Карты регрессионного моделирования износостойкости резцов из стали P18 в зависимости от плотности мощности лазерного излучения и твердости поверхностных слоев стали

Полученные результаты имеют практическую значимость, поскольку позволяют гарантированно назначать режимы лазерной обработки для получения требуемой твердости и износостойкости, то есть работоспособности облучаемых изделий.

Следует отметить, что немаловажное значение для гарантированного повышения долговечности изделий, особенно инструмента, имеет адгезионная устойчивость рабочих поверхностей против «налипания» обрабатываемого материала. Это изменяет геометрические размеры рабочих поверхностей, приводит к увеличению действующих в парах трения нагрузок и напряжений, вызывающих разрушение поверхностных слоев изделий.

В работе определялись возможности повышения эксплуатационных свойств лазерно-закаленной инструментальной стали, находящейся в контакте с цветными алюминиевыми сплавами.

Образцы из стали P6M5 подвергали стандартной объемной термообработке и последующей лазерной закалке с плотностью мощности излучения 100–120 МВт/м² для получения на поверхности текстурованного состояния сталей. При проведении лазерного легирования использовали покрытия, содержащие карбиды вольфрама.

Испытания на трение и адгезионную устойчивость проводили на машине МИ-1М по схеме «диск – колодка». Контртелом являлись алюминиевые сплавы, обладающие разной твердостью и вязкостью. Сплав АД31 имел

твердость НВ 32, Д16 — НВ 70 и АМг6 — НВ 90. Повреждения и следы схватывания на поверхностях трения фиксировали с помощью микроскопа МБС-2.

В качестве критерия для оценки склонности к схватыванию инструментальной стали и алюминиевого сплава выбрана величина удельной нагрузки, приложенной к паре трения и приводящая к значительному увеличению коэффициента трения за счет налипания алюминиевого сплава на поверхность стального образца, то есть за счет адгезионного процесса [19, 20].

Как видно на рис. 6 а и б, при контакте лазерно-облученной инструментальной стали с алюминиевыми сплавами типа АМг6 и Д16 перенос алюминиевых сплавов на сталь практически отсутствует. Коэффициенты трения составляют 0,07–0,09, в сравнении с объемно закаленными образцами, для которых коэффициенты трения достигают значений более 0,10. Причем в контакте со сплавом Д16 для них наблюдается скачкообразный рост коэффициентов трения, начиная с удельных нагрузок в паре трения свыше 6 МПа. Это свидетельствует о протекании адгезионных процессов.

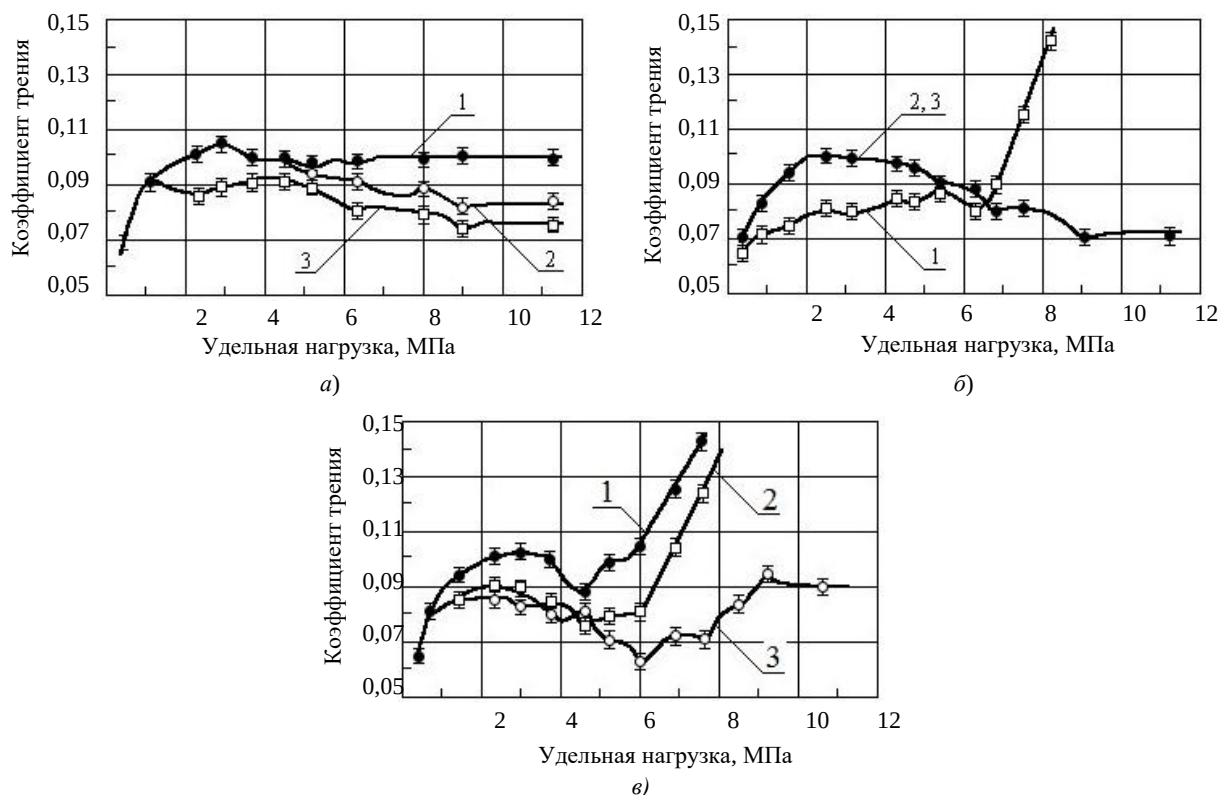


Рис. 6. Коэффициенты трения при контакте стали Р18 со сплавами а — АМг6; б — Д16; в — АД31 до лазерной обработки (кривые 1), после лазерной закалки (кривые 2), после лазерного легирования карбидами вольфрама (кривые 3)

Следует отметить, что в парах трения со сплавом АД31, имеющем самую низкую твердость, у необлученных стальных образцов наблюдается катастрофический рост коэффициентов трения при удельных нагрузках 4,5 МПа, а у лазерно-закаленных сталей при более высоких нагрузках в парах трения — 6 МПа (рис. 6 в). Только лазерно-легированные образцы имеют в этих условиях высокое сопротивление адгезии [21].

Повышение адгезионной стойкости при лазерном облучении связано с достижением не только высокой твердости (11–11,5 ГПа) текстурированного поверхностного слоя, но и как в случае лазерного легирования еще и с вплавлением из покрытий твердых дисперсных карбидов вольфрама.

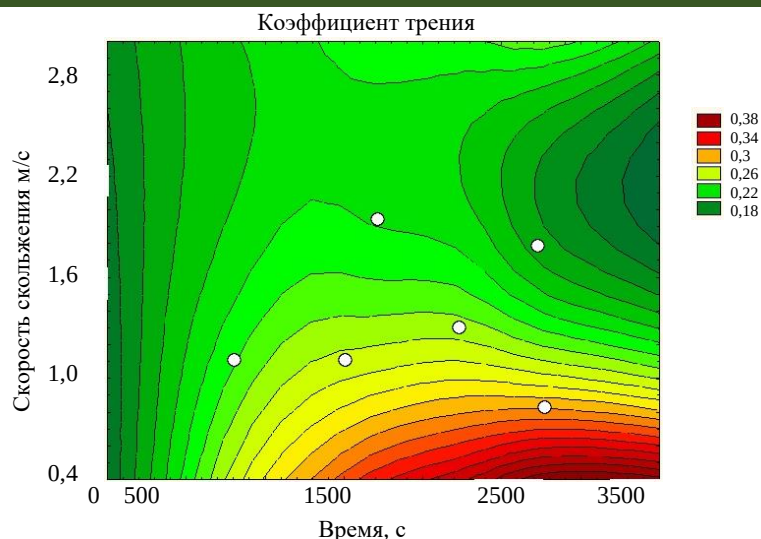


Рис. 7. Регрессионное моделирование значений коэффициентов трения в парах трения «облученная инструментальная сталь — алюминиевый сплав»

С целью прогнозирования и выбора необходимых коэффициентов трения, обеспечивающих заданные величины износо- и адгезионной стойкости стали P18 в контакте с алюминиевыми сплавами после лазерного облучения, в работе проведено регрессионное моделирование результатов экспериментов с помощью программы «Statistica» (рис. 7).

Обсуждение и заключения. В работе экспериментально установлено, что улучшению основных свойств и повышению работоспособности облученных сталей способствуют, в том числе, такие особенности структурного состояния облученных поверхностных слоев сталей, как текстурные эффекты в α - и γ -фазах. Это особенно значимо, если тип текстуры согласуется с видом напряженного состояния упрочненных изделий в условиях эксплуатации.

Установлено, что упрочнять необходимо рабочие поверхности изделий, находящиеся при эксплуатации под действием сжимающих нагрузок. Предпочтительная ориентировка структур лазерной обработки уменьшает склонность поверхностных слоев облученных изделий к хрупкому разрушению, снижает коэффициенты трения в трибосистемах по сравнению с традиционным объемным упрочнением стали на 20–30 %. При этом повышается также и стабильность коэффициентов трения в процессе эксплуатации облученных изделий. Это обстоятельство является важным в обеспечении стационарности процессов в зоне трения, создает предпосылки для интенсификации режимов эксплуатации пар трения.

Практическое использование полученных в работе результатов позволяет путем целенаправленного выбора схем и параметров режима лазерного облучения получать на поверхности структуры, обладающие заданными износо- и адгезионной стойкостью в условиях внешнего нагружения при эксплуатации.

Определена возможность повышения конструкционной прочности и эксплуатационных свойств инструмента за счет проведения лазерного легирования из порошковых покрытий и проведения отпуска после лазерного облучения.

Список литературы

1. Tingting G., Suiyuan C., Xueting C., et al. Effect of laser incident energy on microstructures and mechanical properties of 12CrNi2Y alloy steel by direct laser deposition. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2): 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.024>
2. AlMangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;728:424–435. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
3. Keshavarzkermani A., Sadowski M., Ladani L. Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;736:297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>
4. Su Y., Wang Z., Luet H., et al. Improved wear resistance of directed energy deposited Fe-Ni-Cr alloy via closed-loop controlling laser power. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;75:802–813. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.047>
5. Бровер А.В., Бровер Г.И., Пустовойт В.Н. Повышение эксплуатационных свойств и качества химических покрытий на сталях и сплавах лазерной обработкой. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2015;1:62–67. <https://doi.org/10.12737/10388>

6. Zhang K., Deng J., Ding Z., et al. Improving dry machining performance of TiAlN hard-coated tools through combined technology of femtosecond laser-textures and WS₂ soft-coatings. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;30:492–501. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.018>
7. Li S., Chen H., Ting L., et al. Tribological properties of laser surface texturing modified GCr15 steel under graphene/5CB lubrication. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;18:3598–3611. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.030>
8. Fernández-Lucio P., Villarrón-Osorno I., Pereira Neto O., et al. Effects of laser-textured on rake face in turning PCD tools for Ti6Al4V. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:177–188. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.004>
9. Chu Q., Hao S.J., Li W.Y., et al. Impact of shoulder morphology on macrostructural forming and the texture development during probeless friction stir spot welding. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;12:2042–2054. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.013>
10. Keshavarzkermani A., Sadowski M., Ladani L. Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;736:297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>
11. Yu Z., Zheng Y., Chen J., et al. Effect of laser remelting processing on microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel during laser direct metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;284:116738. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116738>
12. Brover G.I., Shcherbakova E.E. Aspects of Structure Formation in Surface Layers of Steel after Laser Alloying from Various Coatings. *Metallurgist*. 2022;66:672–680. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01375-2>
13. Mao B., Siddaiah A., Menezes P.L., et al. Surface texturing by indirect laser shock surface patterning for manipulated friction coefficient. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;257:227–233. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.041>
14. Yan H., Chen Z., Zhao J. et al. Enhancing tribological properties of WS₂/NbC/Co-based self-lubricating coating via laser texturing and laser cladding two-step process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):9907–9919. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.001>
15. Wang T., Wang C., Li J., et al. Microstructure and wear properties of laser-clad NiCo alloy coating on Inconel 718 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;879:160412. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160412>
16. Jiang P.F., Zhang C.H., Zhang S., et al. Microstructure evolution, wear behavior, and corrosion performance of alloy steel gradient material fabricated by direct laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11702–11716. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.074>
17. Liu S., Li Y., Wang Y., et al. Selective laser melting of WC-Co reinforced AISI 1045 steel composites: microstructure characterization and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:1821–1835. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.158>
18. Brover G.I. Shcherbakova E.E. Features of Steel Structure Formation in Areas of High-Speed Laser Hardening from Liquid State. *Metallurgist*. 2022;66:529–538. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01357-4>
19. Liu L., Wang D., Deng G., et al. Laser additive manufacturing of a 316L/CuSn10 multimaterial coaxial nozzle to alleviate spattering adhesion and burning effect in directed energy deposition. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;82:51–63. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.038>
20. Liu Y.-X., Zhang C.-C., Wang R.-Z., et al. Quantitative evaluations of improved surface integrity in ultrasonic rolling process for selective laser melted in-situ TiB₂/Al composite. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;77:412–425. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.026>
21. Meng X., Zhang K., Guo X., et al. Preparation of micro-textures on cemented carbide substrate surface by plasma-assisted laser machining to enhance the PVD tool coatings adhesion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116870. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116870>

References

1. Tingting G, Suiyuan C, Xueting C, et al. Effect of laser incident energy on microstructures and mechanical properties of 12CrNi2Y alloy steel by direct laser deposition. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2):395–402. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.024>
2. AlMangour B, Grzesiak D, Yang J-M. Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;728:424–435. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
3. Keshavarzkermani A, Sadowski M, Ladani L. [Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation.](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130) *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;736:297–305.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>

4. Su Y, Wang Z, Luet H, et al. Improved wear resistance of directed energy deposited Fe-Ni-Cr alloy via closed-loop controlling laser power. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;75:802–813. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.047>

5. Brover AV, Brover GI, Pustovoyt VN. Improving quality and performance properties of chemical coatings on steels and alloys by laser treatment. *Vestnik of Don State Technical University*. 2015;1:62–67. <https://doi.org/10.12737/10388> (In Russ.).

6. Zhang K, Deng J, Ding Z, et al. Improving dry machining performance of TiAlN hard-coated tools through combined technology of femtosecond laser-textures and WS₂ soft-coatings. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;30:492–501. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.018>

7. Li S, Chen H, Ting L, et al. Tribological properties of laser surface texturing modified GCr15 steel under graphene/5CB lubrication. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;18:3598–3611. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.030>

8. Fernández-Lucio P, Villarón-Osorno I, Pereira Neto O, et al. Effects of laser-textured on rake face in turning PCD tools for Ti6Al4V. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:177–188. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.004>

9. Chu Q, Hao SJ, Li WY, et al. Impact of shoulder morphology on macrostructural forming and the texture development during probeless friction stir spot welding. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;12:2042–2054. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.013>

10. Keshavarzkermani A, Sadowski M, Ladani L. Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;736:297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>

11. Yu Z, Zheng Y, Chen J, et al. Effect of laser remelting processing on microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel during laser direct metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;284:116738. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116738>

12. Brover GI, Shcherbakova EE Aspects of Structure Formation in Surface Layers of Steel after Laser Alloying from Various Coatings. *Metallurgist*. 2022;66:672–680. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01375-2>

13. Mao B, Siddaiah A, Menezes PL, et al. Surface texturing by indirect laser shock surface patterning for manipulated friction coefficient. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;257:227–233. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.041>

14. Yan H, Chen Z, Zhao J, et al. Enhancing tribological properties of WS₂/NbC/Co-based self-lubricating coating via laser texturing and laser cladding two-step process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):9907–9919. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.001>

15. Wang T, Wang C, Li J, et al. Microstructure and wear properties of laser-clad NiCo alloy coating on Inconel 718 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;879:160412. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160412>

16. Jiang PF, Zhang CH, Zhang S, et al. Microstructure evolution, wear behavior, and corrosion performance of alloy steel gradient material fabricated by direct laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11702–11716. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.074>

17. Liu S, Li Y, Wang Y, et al. Selective laser melting of WC-Co reinforced AISI 1045 steel composites: microstructure characterization and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:1821–1835. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.158>

18. Brover GI Shcherbakova EE. Features of Steel Structure Formation in Areas of High-Speed Laser Hardening from Liquid State. *Metallurgist*. 2022;66:529–538. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01357-4>

19. Liu L, Wang D, Deng G, et al. Laser additive manufacturing of a 316L/CuSn10 multimaterial coaxial nozzle to alleviate spattering adhesion and burning effect in directed energy deposition. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;82:51–63. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.038>

20. Liu Y-X, Zhang C-C, Wang R-Z, et al. Quantitative evaluations of improved surface integrity in ultrasonic rolling process for selective laser melted in-situ TiB₂/Al composite. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;77:412–425. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.026>

21. Meng X, Zhang K, Guo X, et al. Preparation of micro-textures on cemented carbide substrate surface by plasma-assisted laser machining to enhance the PVD tool coatings adhesion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116870. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116870>

Об авторах:

Бровер Галина Ивановна, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, abrover@mail.ru

Щербакова Елена Евгеньевна, доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, кандидат технических наук (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), bsherbakovaee@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г.И. Бровер — постановка задачи, выбор методов и методик исследований, участие в проведении металлофизических экспериментов и в обсуждении их результатов, построение математической и компьютерной модели. Е.Е. Щербакова — критический обзор литературных источников по теме исследования, участие в проведении металлофизических экспериментов и в обсуждении их результатов.

Поступила в редакцию 01.04.2023.

Поступила после рецензирования 27.04.2023.

Принята к публикации 27.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Galina I. Brover, professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Eng.), abrover@mail.ru

Elena E. Shcherbakova, associate professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), bsherbakovaee@mail.ru

Claimed contributorship:

GI Brover: problem statement, selection of research methods and techniques, participation in conducting metallophysical experiments and in discussion of their results, construction of a mathematical and computer model. EE Shcherbakova: critical review of literature sources on the subject of research, participation in conducting metallophysical experiments and in discussion of their results.

Received 01.04.2023.

Revised 27.04.2023.

Accepted 27.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.